



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA**

**“PROPUESTA DE UN MODELO INTEGRAL PARA LA
RECUPERACIÓN DE UN ACUÍFERO INTRUSIONADO, SOMETIDO
A USO INTENSIVO DE AGUA SUBTERRÁNEA: EL ACUÍFERO
COSTA DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO.”**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(AGUAS SUBTERRÁNEAS)**

PRESENTA

MIGUEL RANGEL MEDINA

CIUDAD UNIVERSITARIA

OCTUBRE, 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

“Nunca un hombre ha caído tan profundo como para no volver a levantarse”.

Séneca

DEDICATORIA

A mis hijos con todo mi amor, Bran, Carla, Renato, Vianney.
No espero su reconocimiento, solamente correspondencia.

Al viento nuevo que impulsó mi vida y que gracias a ello,
salgo siempre adelante con su paciencia y amor,
a la dueña de mis neurosis, mi esposa...Nelly.
Gracias muñeca.

A mis padres Gigio y Mimí y hermanas Blan, Sarita y Licha,
a la “familia”, suave espuma donde caen mis sueños, alegrías y tristezas.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a las siguientes personas e instituciones:

Este trabajo no hubiera sido posible sin la confianza que depositara el Gobierno estatal de Sonora en los académicos de la Universidad de Sonora a partir de 1999, para la ejecución del estudio de la migración y caracterización de la intrusión marina en la Costa de Hermosillo, el financiamiento de casi 750 mil dólares, permitió realizar toda una gama de trabajos, nunca antes realizados por una Universidad para un solo propósito; CONOCER UN ACUIFERO COSTERO. Esto revirtió una tendencia histórica en la que los estudios hidrogeológicos se realizaban siempre con empresas de la ciudad de México. La información generada de esta manera era prácticamente escasa o nula en la región, la experiencia se iba y no se formaban cuadros de profesionistas. Hoy, esta acción enriqueció a nuestra alma mater, que ha formado graduados y posgraduados en agua subterránea desde el año 2000, los cuales se encuentran bien posicionados en nuestros días en diversos empleos y siguiendo doctorados. Al Grupo del Agua del Departamento de Geología que continúa activo con esta tarea, además de seguir recibiendo aún los beneficios de dar continuidad a los estudios hidrogeológicos cada año, para la Comisión Estatal del Agua y la Comisión Nacional del Agua. Gracias a ello no se ha detenido desde entonces la producción de tesis, trabajos académicos, colaboraciones e intercambios nacionales e internacionales, así como el conocimiento del recurso en estas áridas regiones que tanto lo requieren. Por ello, mi más profundo agradecimiento a las instituciones mencionadas.

Entre las personas involucradas en el desarrollo y apoyo técnico para que este estudio lograra integrarse, doy mi agradecimiento al Dr. Rogelio Monreal S., siempre activo y propositivo; al Dr. José Castillo G. por su aportación desinteresada; al maestro Mariano Morales por su apoyo en la prospección geofísica; al maestro Martín Molinar en la modelación del flujo; al maestro Ismael Minjarez S. por su aportación de ideas que me ayudaron en los nudos gordianos que se formaban y al maestro Francisco J. Grijalva N. por su apoyo administrativo en nuestro Departamento. A mi buen amigo Emilio Custodio por sus palabras reconociendo el trabajo e invitaciones para sustentarlo en congresos.

A la UNAM mi casa, y en ella al Dr. Ramiro Rodríguez Castillo, amigo y acicate en este trabajo, paciente y aleccionador. A los Dres. Diana Meza, Christopher Watts, Felipe Arreguín, Oscar Campos y Raúl Flores Berrones, por su paciencia en la revisión de esta tesis y aportaciones necesarias para concluirla, en un esfuerzo que, por sus aciertos se debe a ellos, los errores son míos.

A la Lic. Verónica Guevara, quien realizó una muy profesional corrección de estilo al documento, brindándome confianza con su trabajo.

Finalmente a mis estudiantes que trabajaron en estos proyectos, colaboradores, profesores, amigos y compañeros, todos aquellos que de una otra forma comparten conmigo esta meta y me auxiliaron para alcanzarla.

**PROPUESTA DE UN MODELO INTEGRAL PARA LA RECUPERACIÓN DE UN
ACUÍFERO INTRUSIONADO, SOMETIDO A USO INTENSIVO:
EL ACUÍFERO COSTA DE HERMOSILLO, SON., MÉXICO.**

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

	Página
1. INTRODUCCIÓN	01
1.1 Descripción del problema.	01
1.1.1 Localización del acuífero Costa de Hermosillo.	01
1.1.2 Concepción y bases del estudio.	02
1.2 Estudios previos.	04
1.3 Definición legal del acuífero.	04
1.4 Evolución histórica de la extracción de agua subterránea.	06
1.5 La intrusión del agua de mar.	09
1.6 Objetivo.	11
1.6.1 Metas específicas.	11
1.7 Métodos de la investigación.	12
1.7.1 Recopilación y análisis de estudios previos.	15
1.7.2 Interpretación de la geología del subsuelo con información geofísica y geológica existentes.	16
1.7.3 Muestreo y análisis fisicoquímico de muestras de agua.	16
1.7.4 Definición de parámetros hidráulicos (hidráulica de pozos).	17
1.7.5 Censo de aprovechamientos.	18
1.7.6 Nivelación de brocales.	18
1.7.7 Modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico.	18
1.7.8 Balance de aguas subterráneas.	18
2. ANTECEDENTES Y GENERALIDADES	20
2.1 El ciclo hidrológico en Sonora.	20
2.2 Panorama del uso de agua en la cuenca del río Sonora.	23
2.2.1 Generalidades.	23
2.2.2 Geografía sonoreense.	24
2.2.2.1 Orografía.	24
2.2.3 La geografía y el uso de la tierra.	27
2.2.4 El uso de los recursos hídricos en Sonora.	28

3. LA CUENCA DEL RÍO SONORA	30
3.1 Descripción de la zona de estudio.	30
3.2 Climatología.	30
3.2.1 Estaciones climatológicas.	30
3.2.2 Distribución y variación climática en la cuenca del río Sonora.	31
3.2.3 Evapotranspiración real y zonas potenciales de recarga.	34
3.3 Hidrología de la Cuenca.	34
3.3.1 Hidrografía.	34
3.3.2 Hidrometría de la cuenca.	36
3.4 Fisiografía y Geomorfología.	37
3.4.1 Provincias fisiográficas de Sonora.	38
3.4.2 Fisiografía de la cuenca del río Sonora.	38
3.4.3 Análisis geomorfológico de la cuenca del río Sonora.	40
3.4.3.1 Hidrogeomorfología.	40
3.4.3.2 Análisis geomorfo-estructural de la cuenca.	42
3.4.3.3 Perfil hidráulico del río Sonora.	43
3.4.3.4 Origen de la cuenca hidrográfica del río Sonora.	44
3.4.4 Suelos.	45
3.4.5 Vegetación.	45
4. MARCO GEOLÓGICO	47
4.1 Geología regional.	47
4.1.1 Geología superficial.	47
4.2 Geología estructural y tectónica.	49
4.3 Geología del subsuelo.	50
4.3.1 Hidroestratigrafía.	51
4.3.2 Análisis hidroestratigráfico.	55
5. DEFINICIÓN GEOFISICO-ESTRUCTURAL DE LA CUENCA	58
5.1 Estudios previos.	58
5.2 Análisis de imagen de satélite del área de estudio.	59
5.3 Tridimensional del basamento cristalino.	60
5.4 Integración geofísica.	61
5.5 Posicionamiento del frente de intrusión marina.	64
5.6 Conclusiones de la geofísica aplicada en la Costa de Hermosillo.	67
5.7 Zona Siete Cerros.	68
5.8 Propiedades hidrogeofísicas del medio.	70
5.9 Análisis de resultados.	71
6. HIDROGEOLOGÍA	73
6.1 Introducción.	73
6.2 Acuíferos de la región.	74
6.3 Piezometría histórica.	74
6.4 Comportamiento hidráulico del sistema.	80

6.5 Análisis piezométrico del Siete Cerros.	81
7. CÁLCULO DE LA RECARGA	83
7.1 Balance hidrometeorológico.	83
7.2 Recarga en acuíferos del valle del río Sonora.	83
7.3 Recarga por agua de lluvia en el acuífero de la Costa de Hermosillo.	85
7.4 Cálculo de la recarga horizontal.	86
7.4.1 Métodos de estimación de recarga.	87
7.4.2 Método de balance de agua subterránea.	87
7.4.3 Tasa neta de recarga de agua subterránea.	88
7.4.3.1 Cálculo de entradas y salidas horizontales (método de celdas).	90
7.4.3.2 Cálculo del rendimiento específico (Sy).	90
7.4.3.3 Cálculo del cambio de almacenamiento período 2000-2001.	93
7.5 Extracciones por bombeo.	94
7.6 Recarga analizando el período 1997-2001.	95
8. HIDROGEOQUÍMICA	96
8.1 Generalidades.	96
8.1.2 Muestreo y análisis fisicoquímico.	97
8.1.2.1 Plan de muestreo.	97
8.1.3 Muestreo de agua para análisis isotópicos.	98
8.2 Zona de intrusión marina.	98
8.2.1 Conductividad eléctrica vertical en pozos abandonados.	98
8.2.2 Resultados de los registros de conductividad eléctrica vertical (CEV).	100
8.3 Geoquímica del agua subterránea.	101
8.3.1 Caracterización geoquímica del agua subterránea mixta.	101
8.3.2 Resultados de la conductividad eléctrica dinámica (mixta).	102
8.3.3 Distribución de CE a profundidad.	102
8.3.4 Resultados de la CE contra el tiempo de bombeo.	104
8.3.5 Muestreo en pozos de observación (PM, PO) y centinelas (PCH).	105
8.3.6 Muestreo discreto en pozos abandonados (MD).	108
8.3.7 Resultados de la interpretación hidrogeoquímica.	109
8.3.8 Calidad del agua en términos de salinidad (STD).	111
8.4 Hidrología isotópica.	115
8.4.1 Caracterización isotópica del agua.	115
8.5 Regionalización de acuíferos con base en el oxígeno e hidrógeno.	123
8.6 Interpretación de resultados isotópicos.	124
8.6.1 Velocidad del flujo del agua subterránea.	124
8.6.2 Direcciones de flujo y mecanismos de recarga y descarga	125
8.7 Origen del flujo subterráneo.	125

9. MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL SISTEMA EN ESTUDIO	131
9.1 Modelo conceptual hidrogeológico.	131
9.1.1 Hidromorfoestructura.	131
9.1.2 Hidrogeología.	132
9.1.3 Condiciones de frontera.	133
9.1.4 Entradas.	133
9.1.5 Salidas.	134
9.1.6 Hidrodinámica y piezometría.	134
9.1.7 Parámetros hidráulicos.	134
9.1.8 Hidrogeoquímica.	135
9.1.9 Origen del agua subterránea.	135
9.1.10 Breviario del modelo conceptual hidrogeológico del acuífero Costa de Hermosillo, Son.	136
9.2 Modelo de simulación.	139
9.2.1 Métodos.	139
9.3 Resultados.	149
10. PROPUESTA DE MANEJO HIDROGEOLÓGICO	150
10.1 Bases de la propuesta de manejo operacional.	150
10.2 Desarrollo del modelo de sustentabilidad.	156
10.3 Análisis de escenarios de bombeo para restituir el manejo sustentable: Índice de Disponibilidad y Uso Sustentable (IDUS).	161
10.4 Acciones a realizar para una recuperación del sistema	166
10.5 Propuesta de administración hidrogeológica	170
10.5.1 Acuífero Costa de Hermosillo.	171
10.5.2 Acuífero Siete Cerros.	171
10.5.3 Acuífero Hermosillo-Calle Cero (La Manga).	171
10.6 Condición hidrodinámica.	172
10.7 Recarga al sistema acuífero Costa de Hermosillo.	172
11. DISCUSIÓN	174
11.1 Sustentabilidad de los recursos.	174
11.2 Experiencias en el manejo integrado.	176
11.3 Condición histórica de la extracción.	177
11.4 Síntesis del diagnóstico actual.	179
11.4.1 Principales factores.	179
12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	183
13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	186

Lista de Figuras

	Página
Figura 1.1	Plano que muestra localización del área de estudio. 01
Figura 1.2	Ubicación de las zonas de acuíferos en el área de estudio 05
Figura 1.3	Mapa de las 21 etapas de veda. En color, zona de libre alumbramiento (CNA, 1999). 06
Figura 1.4	Evolución de la extracción de agua subterránea en el acuífero. Costa de Hermosillo (1954-1999). Fuente CNA (2000). 07
Figura 1.5	Superficie regada y volúmenes de extracción en la Costa de Hermosillo (1969-1998) (CNA, 1999). 08
Figura 1.6	Riego por inundación típico de una huerta de nogales en la Costa de Hermosillo, Son. 09
Figura 1.7	Modelo hidrogeológico y volúmenes de recarga-descarga del acuífero Costa de Hermosillo (Ariel Construcciones, S.A., 1968). 10
Figura 2.1	Ciclo del agua en Sonora (Modificado de Castillo y Ríos, 2004). 21
Figura 2.2	Porcentaje de usos del agua subterránea en Sonora (CEA, 2004). 22
Figura 2.3	Ubicación de la región Noroeste de la CNA en Sonora y Chihuahua. 24
Figura 2.4	Orografía de la cuenca del río Sonora, cuenca alta y media. 26
Figura 3.1	Precipitación media anual en la Costa de Hermosillo (1960-1997). 32
Figura 3.2	Ubicación de las principales zonas de recarga de la cuenca del río Sonora, basado en el balance hidrometeorológico. 34
Figura 3.3	Hidrografía de la cuenca del río Sonora. 35
Figura 3.4	Escurrimiento total para la cuenca del río Sonora, período 1960-1997. 36
Figura 3.5	Filtraciones en la presa Abelardo Rodríguez Período (1960-1997). 37
Figura 3.6	Derrames en la presa Abelardo Rodríguez período (1960-1997). 37
Figura 3.7	Diferencia entre entradas y salidas de la presa Abelardo Rodríguez durante el período 1960-1997. 37
Figura 3.8	Provincias fisiográficas del Norte de Sonora (Modificado de Lugo Hubp y Córdova Fernández, 1990). 39

Figura 3.9	Esquema hidromorfotectónico de la parte central de Sonora que muestra la forma en cómo éste define las cuencas Alta, Media y Baja (Rangel, 1996).	41
Figura 3.10	Perfil hidráulico del río Sonora y sus tributarios (Rangel, 1996).	44
Figura 4.1	Mapa geológico regional que muestra el área de estudio (recuadro). Tomado del Consejo de Recursos Minerales y Cartas Geológicas Hermosillo y Sierra Libre (1999).	50
Figura 4.2	Sección esquemática SW-NE de la parte norte del área de estudio mostrando el basamento, estructuras y unidades geológicas (CoReMi, 1999).	50
Figura 4.3	Columna estratigráfica general del subsuelo en el área de Estudio.	52
Figura 4.4	Correlación estratigráfica NW-SE de la Unidad Superior (0-200 m) entre pozos PCH-9, PCH-1, PCH-2, PHB-17, PCH-6 y PCH-4. Mostrando unidades hidrogeológicas con capacidad de contener fluidos. Azul oscuro = permeabilidad alta, azul claro = permeabilidad media, blanco = permeabilidad baja.	52
Figura 4.5	Correlación estratigráfica NW-SE de la Unidad Superior (0-200 m) entre pozos PHO-10, PHO-9, PHB-15, PHB-3, PHB-8, PHO-7. Mostrando unidades hidrogeológicas con capacidad de contener Fluidos. Azul oscuro = Permeabilidad alta, azul claro = permeabilidad media, blanco = permeabilidad baja.	53
Figura 4.6	Correlación de pozos centinelas (PCH's) y mapa de localización a la extrema izquierda.	53
Figura 4.7	Correlación de pozos de observación (PHO's y PHB's).	54
Figura 4.8	Sección compuesta SW-NE; NW-SE.	56
Figura 4.8a.	Localización de pozos y secciones, Figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10.	56
Figura 4.9	Sección hidroestratigráfica SW-NE, perpendicular a la línea de costa.	57
Figura 4.10	Sección hidroestratigráfica NW-SE sensiblemente paralela a la línea de costa.	57
Figura 5.1	Ubicación de exploración geofísica en la Costa de Hermosillo, realizada en diferentes años por diversos autores. Izquierda, SEV's y gravimetría A; a derecha, sondeos TEM en una franja costera de 32 x 80 km (Modificado de Monreal y otros, 2001).	59
Figura 5.2	Interpretación de imagen de satélite de la Costa de Hermosillo.	59

Figura 5.3	Plano gravimétrico del área (Modificado de Monreal y otros, 2000).	60
Figura 5.4	Vista tridimensional del basamento mostrando una propuesta paleohidrológica del río Sonora.	60
Figura 5.5	Topografía del basamento cristalino en la Costa de Hermosillo. Línea discontinua representa el posible paleocauce del Río Sonora (Modificado de Monreal y otros, 2000).	61
Figura 5.6	Sección hidroestratigráfica SW-NE perpendicular a la línea de costa (Modificado de Morales, M., en Monreal y otros, 2000).	63
Figura 5.7	Sección hidroestratigráfica NW-SE sensiblemente paralela a la línea de costa (Modificado de Morales, M., en Monreal y otros, 2000).	63
Figura 5.8	Distribución de STD. En azul valores menores e iguales a 1000 ppm, en verde de 1000 y 10,000 ppm, zona de interfase, y en amarillo mayores a 10,000 ppm (Modificado de Monreal y otros, 2000).	64
Figura 5.9	Distribución de resistividad del fluido. Las flechas muestran los canales preferenciales.	65
Figura 5.10	Avance de la intrusión marina en la Costa de Hermosillo, los perfiles muestran las lenguas de penetración para los años 1978, 1990 y 2001. En los cuadros se presentan las resistividades (Modificado de Monreal y otros, 2000, 2001).	66
Figura 5.11	Mapa de resistividad para elevación -50m (Tomado de Monreal y otros 2000).	67
Figura 5.12	Mapa de resistividad obtenido por SEV, para elevación -100m que muestra los canales preferenciales en color azul. Los puntos muestran ubicación de los TEM (Tomado de Monreal y otros, 2000).	67
Figura 5.13	Configuración tridimensional del basamento; sección El Águila-Gorgus (Hernández, 2003).	69
Figura 5.14	Perfil gravimétrico NE-SW entre Hermosillo y Siete Cerros, mostrando el callamiento entre fosa Siete Cerros y pilar Loma Lencho (Modificado de Hernández, 2003).	69
Figura 5.15	Configuración 3D del basamento; sección Hermosillo-Siete Cerros. Viendo al NW (Modificado de Hernández (2003).	69
Figura 5.16	Sección geoelectrica z3-1, en dirección SW-NE (Tomado de Monreal y otros, 20001).	70
Figura 5.17	Sección geoelectrica z3-2, con dirección N-S. Nótese las resistividades sobre la zona del antiguo cauce del río Sonora (Modificado de Monreal, 2001).	71
Figura 6.1	División administrativa de acuíferos en la región de la cuenca baja del río Sonora (CNA, 2005).	74

Figura 6.2	Piezometría para el año 1945 en el área de estudio (condiciones iniciales).	75
Figura 6.3	Piezometría para el año 1949.	75
Figura 6.4	Piezometría para el año 1967.	76
Figura 6.5	Piezometría para el año 1970.	76
Figura 6.6	Piezometría para el año 1975.	77
Figura 6.7	Piezometría para el año 1980.	77
Figura 6.8	Piezometría para el año 1985.	77
Figura 6.9	Piezometría para el año 1997.	77
Figura 6.10	Piezometría para el año 2000 (Modificado de CNA, 2003).	78
Figura 6.11	Piezometría para el año 2003 (Modificado de CNA, 2003).	78
Figura 6.12	Piezometría actual en el acuífero Costa de Hermosillo. Nótese la posición de la curva cero.	78
Figura 6.13	Evolución piezométrica 2000-2001 en el acuífero Costa de Hermosillo.	79
Figura 6.14	Piezometría zona Siete Cerros 2003 (Modificado de Hernández, 2004).	79
Figura 6.15	Distribución de transmisividades a partir de pruebas de bombeo.	80
Figura 6.16	Configuración piezométrica 2003 entre Siete Cerros, Calle Cero y Hermosillo en 3D; nótese la interpretación estructural (Modificado de Hernández, 2004).	81
Figura 6.17	Imagen en 3D del basamento gravimétrico entre Siete Cerros y Hermosillo (Hernández, 2004).	81
Figura 6.18	Localización del perfil gravimétrico entre Siete Cerros y Hermosillo, mostrando la ubicación de pozos PHB-13, 14 (centro) y 15 (suroeste) y PHO-04 (Modificado de Hernández, 2003).	82
Figura 6.19	Perfil gravimétrico, representando la posición hidrodinámica para cada fosa o acuífero (Rangel, 2004).	82
Figura 7.1	Precipitación efectiva calculada para cada estación climatológica de la cuenca del río Sonora.	84
Figura 7.2	Diagrama de flujo para el cálculo de la recarga.	89
Figura 7.3	Celdas utilizadas en el cálculo	90
Figura 7.4	Volumen total extraído de 1954 al 2003	92
Figura 7.5	Plano de curvas de igual evolución entre los años 2000-2001 acuífero Costa de Hermosillo.	94
Figura 8.1	Perfiles de conductividad eléctrica (CEV) en la zona de intrusión de la Costa de Hermosillo. Columna izquierda, salinidad uniforme; centro, salinidad estratificada; derecha, interfase salina.	101
Figura 8.1a	Diagramas de Stiff y Piper; muestra las facies hidroquímicas y los procesos de salinización e intercambio catiónico en el acuífero Costa de Hermosillo en el sentido de la dirección del flujo.	101

Figura 8.2	Distribución de la C.E. en la Costa de Hermosillo. En azul, agua con menos de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$; en amarillo, agua entre 2500 y 7500; en rojo, entre 7500 y 40,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.	102
Figura 8.3	C.E. a 40 m de profundidad.	103
Figura 8.4	C.E. a 100 m de profundidad.	103
Figura 8.5	Comparación de la CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de 1995 con los mismos pozos en el año 2000.	105
Figura 8.6	Distribución de familias de agua con énfasis en el frente de intrusión e interfase salina marcada en amarillo en límite con el agua dulce del acuífero.	107
Figura 8.7	Distribución de familias de agua en los acuíferos Costa de Hermosillo y valle del río Sonora.	108
Figura 8.8	Derecha, distribución de la concentración de bromuros, e izquierda de cloruros (meq/l). Ambos iones generan una distribución que es consistente con la posición de la máxima salinidad mostrada en términos de CE y STD, para definir la zona de interfase marina y el frente de intrusión.	110
Figura 8.9	Comportamiento de bromuros y cloruros.	110
Figura 8.10	Distribución del índice $r\text{Cl}/r\text{HCO}_3^-$. Nótese la semejanza con la distribución de CE para el agua mixta.	111
Figura 8.11	Relación entre la CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y cloruros en el acuífero Costa de Hermosillo.	112
Figura 8.12	Concentración de STD para aguas bicarbonatadas y cloruradas.	112
Figura 8.13	Índice geoquímico de $r\text{Na}/r(\text{Ca}+\text{Mg})$. Las abscisas denotan el índice geoquímico y las ordenadas el número de muestras.	113
Figura 8.14	Composición isotópica de aguas subterráneas y su relación Con LMM.	117
Figura 8.15	Recta de la composición isotópica del agua subterránea de la Costa de Hermosillo.	118
Figura 8.16	Relación de O-18 vs cloruros.	119
Figura 8.17	Composición isotópica del agua subterránea en la región.	122
Figura 8.18	Relación Cl y O18 en el sistema acuífero Costa de Hermosillo.	122
Figura 8.19	Relación O18 y SO_4 en el sistema acuífero Costa de Hermosillo.	122
Figura 8.20	Distribución de O-18 en el área de estudio.	124
Figura 8.21	Regímenes de flujo encontrados en la cuenca baja del Río Sonora. Los flujos se sobreponen a las zonas acuíferas modificadas de las definidas por la CNA (2004).	130
Figura 9.1	Modelo conceptual hidrogeológico para el Sistema Acuífero Costa de Hermosillo.	138
Figura 9.2	Detalle de la distribución de la transmisividad en el acuífero.	140
Figura 9.3	Malla del modelado de la Costa de Hermosillo.	141
Figura 9.4	Vista del área hacia el noroeste mostrando la planicie costera.	142

Figura 9.5	Ubicación de pozos de bombeo utilizados en la modelación.	142
Figura 9.6	Comparación de condiciones iniciales reales (arriba) y simuladas (abajo) para 1945.	143
Figura 9.7	Escenarios piezométricos intermedios. Arriba, 1991 (3D); Abajo, 1995. Elevación mínima, -55 mbnm.	144
Figura 9.8	Comparación de las piezometrías real (arriba) y simulada (abajo) Para el año 2003 con condiciones actuales (configuraciones sobrepuestas calculada y observada).	145
Figura 9.9	Resultado de calibración, cargas calculadas contra observadas (1991).	146
Figura 9.10	Simulación de escenario a cinco años (Piezometría año 2010)	147
Figura 9.11	Perfil hidrodinámico suponiendo la operación del acuífero bajo las condiciones actuales de extracción.	147
Figura 9.12	Evolución piezométrica 1990-2010.	148
Figura 9.13	Piezometría al año 2010.	148
Figura 10.1	Modelo de funcionamiento hidrogeológico generalizado para un acuífero costero (Elaborado a partir del esquema de infiltración de recarga a los acuíferos, Custodio, 1997).	150
Figura 10.2	Esquema del modelo de balance en una cuenca para la Generación del Índice de Equilibrio.	151
Figura 10.3	Condiciones de balances de agua en una cuenca. Izquierda, Acuífero continentales; Derecha, acuíferos costeros.	152
Figura 10.4	Balance de agua para acuíferos costeros, condición de penetración de la intrusión marina.	152
Figura 10.5	Elementos del uso sustentable del agua en la agricultura.	154
Figura 10.6	Elementos de la producción agrícola que intervienen en el Beneficio sustentable, en función del bombeo disponible (QD) (Modificado de Mayer, 2004).	154
Figura 10.7	Esquema de recuperación de un acuífero costero en la escala del tiempo dentro de un marco de uso sustentable.	156
Figura 10.8	Objetivo de la sustentabilidad como criterio para los recursos naturales.	156
Figura 10.9	Escenario "A" de modelo operativo del acuífero de la Costa de Hermosillo.	158
Figura 10.10	Escenario "B" de modelo operativo del acuífero de la Costa de Hermosillo.	159
Figura 10.11	Escenario "C" de modelo operativo del acuífero de la Costa de Hermosillo.	160
Figura 10.12	Evolución del IDUS histórico y su proyección al 2020 con escenario de descenso del bombeo.	163
Figura 10.13	Comparación del comportamiento de bombeo, recarga e intrusión, con IDUS-1.	163

Figura 10.14	Evolución del IDUS histórico y su proyección al 2020 con escenarios de descenso del bombeo y aplicación de recarga artificial al acuífero Costa de Hermosillo.	165
Figura 10.15	Comparación del comportamiento de bombeo, recarga e Intrusión, con IDUS-2.	165
Figura 10.16	Evolución del IDUS histórico y su proyección al 2020 con escenario de sostenimiento del bombeo a una tasa de extracción actual estimada en 600 hm ³ .	166
Figura 10.17	Comportamiento de la precipitación pluvial en la estación El Orégano I y II, en la cuenca baja del río Sonora, en los últimos 50 años.	167
Figura 10.18	Actual distribución administrativa de acuífero en la Región Noroeste (CNA-2004a).	170
Figura 10.19	Propuesta administrativa con tres acuíferos.	170

Lista de Tablas

	Pagina	
Tabla 2.1	Clasificación de tipos de climas promedio anual de precipitación (Bull, 1991).	20
Tabla 2.2	Comparación entre el producto interno bruto y la demanda de Agua (PIB), la cual demuestra que el mayor demandante, la agricultura, tiene el costo más bajo.	29
Tabla 3.1	Distribución de unidades superficiales de la región no. 9, cuenca río Sonora.	30
Tabla 3.2	Resumen del análisis climatológico de la cuenca del Río Sonora.	33
Tabla 3.3	Régimen hidrológico de la presa Abelardo Rodríguez Luján (1960-1997).	37
Tabla 6.1	Valores de transmisividad de las pruebas por bombeo.	80
Tabla 7.1	Valores de cloruros de agua de lluvia en ppm.	86
Tabla 7.2	Valores de Rendimiento específico en por ciento.	91
Tabla 7.3	Relación de campos agrícolas con cultivos anuales, perennes y hortalizas de la zona de Siete Cerros.	92
Tabla 7.4	Resultados del cálculo de recarga del sistema acuífero Costa de Hermosillo.	94
Tabla 7.5	Cálculo de la recarga vertical para las evoluciones de los últimos cuatro años, de 1997 a 2001.	95
Tabla 8.1	Evolución de la conductividad eléctrica en función del tiempo.	105
Tabla 8.2	Edades relativas de ¹⁴ C del agua subterránea, Costa de Hermosillo.	121

Tabla 9.1	Volumen oficialmente concesionados en el acuífero Costa de Hermosillo (CNA, 2004).	140
Tabla 10.1	Resumen de resultados del escenario "A", para condiciones actuales.	157
Tabla 10.2	Resumen de resultados del escenario "B", para condiciones actuales.	159
Tabla 10.3	Resumen de resultados del Escenario "C", para condiciones con 163 hm ³ /año.	160
Tabla 10.4	Aplicación del IDUS-1 con los diferentes escenarios. Disminución paulatina del bombeo de 450 hm ³ /año (cifra actual) a 150 hm ³ /año en los próximos 15 años.	162
Tabla 10.5	Aplicación del IDUS-1 con los diferentes escenarios. Disminución paulatina del bombeo a una tasa de 12.0 hm ³ /año por año, de 450 hm ³ /año (cifra actual) a 150 hm ³ /año en los próximos 15 años.	164
Tabla 10.6	Aplicación del IDUS-2 con los diferentes escenarios; a) disminución paulatina del bombeo y aplicación de recarga artificial que alcance 300 hm ³ /año de agua dulce dentro de los próximos 15 años.	164
Tabla 10.7	Aplicación del IDUS con los diferentes escenarios de extracción e hidrodinámica del acuífero Costa de Hermosillo.	166
Tabla 10.8	Características hidrogeológicas y administrativas de los acuíferos de la Costa de Hermosillo y valle del río Sonora.	172
Tabla 11.1	Situación histórica y actual del balance hidráulico en la zona de estudio.	178
Tabla 11.2	Rentabilidad negativa de diversos cultivos en el Distrito de Riego 051 Costa de Hermosillo (Fuente: OMM, 2005).	180
Tabla 11.3	Subsidios recibidos por agricultores de la Costa de Hermosillo (Fuente: OMM, 2005).	180

PROPUESTA DE UN MODELO INTEGRAL PARA LA RECUPERACIÓN DE UN ACUÍFERO INTRUSIONADO, SOMETIDO A USO INTENSIVO DE AGUA SUBTERRÁNEA: EL ACUÍFERO COSTA DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO.

RESUMEN

Se presenta una propuesta de un modelo integral de fácil aplicación y entendimiento para seguir una restauración y un manejo de un acuífero costero intrusionado, el cual es aún sometido a bombeo intensivo. Esta propuesta se apoya en la integración de un nuevo modelo hidrogeológico como una medida de prevención. Los resultados pueden ser considerados como apoyo en la aplicación de un nuevo modelo de política de operación y de un programa de restauración, con el fin de ayudar a los usuarios y planeadores a tomar decisiones que prolonguen la vida del sistema, asumiendo que el bombeo no se detendrá. El acuífero estudiado ha disminuido su almacenamiento inicial en hasta un 60%. En un acuífero costero el agua salina es inducida como intrusión porque se pierde la carga hidráulica y el almacenamiento en una franja próxima a la línea de costa. Es bien sabido que la intrusión marina hacia el acuífero de la Costa de Hermosillo es el secuela de un desequilibrio físico y químico, causado por sobrebombeo ante la ausencia de una adecuada administración del agua. Bajo las condiciones y circunstancias actuales, este proceso de contaminación salina es considerado no reversible en el acuífero de la Costa de Hermosillo. Por ello es importante establecer que antes de iniciar cualquier acción que intente revertir el proceso, es necesario identificar la posición y migración del frente de agua de mar, con el objeto de evaluar el balance de agua subterránea, definir el comportamiento hidrodinámico y su evolución histórica, para establecer el modelo hidrogeológico conceptual y sus interrelaciones físico-químicas.

El acuífero Costa de Hermosillo tiene una superficie aproximada de 14,900 km², se encuentra localizado al suroeste de la ciudad de Hermosillo entre las coordenadas 28°14' y 28°57' de latitud norte y 111°15' y 111° 45' de longitud al oeste de Greenwich. Es una cuenca exorreica localizada al noroeste de México y sus aguas drenan hacia el Golfo de California con una pendiente de 0.18%. El clima es seco con lluvias en verano, durante Julio a Septiembre; la isoyeta de 200 mm cruza cerca de Hermosillo en forma paralela a la línea de costa. La temperatura media anual varía de 22 a 24 °C.

La explotación de agua subterránea del acuífero de la Costa de Hermosillo inició en 1945 con 17 pozos; en el año 1965 alcanzó su máximo volumen de extracción con 800 pozos y cerca de 1100 hm³/año. Después de ese año la extracción ha ido disminuyendo hasta quedar actualmente en un volumen estimado de 527 hm³ al año. Desde 1949 se fue perdiendo carga hidráulica en el acuífero, originando un cono de abatimiento y un flujo invertido de agua de mar desde el litoral hacia el centro de la planicie. Como consecuencia, el gobierno federal inició un programa para disminuir y prohibir la explotación cerca de la costa. El primer decreto fue publicado en 1951; ampliaciones subsecuentes fueron publicadas en 1954 y 1963-1964, cuando se generó una ley reglamentaria para las zonas de veda que tuvo ampliaciones posteriores en 1967. En el año 1968 un estudio geohidrológico realizado para el gobierno federal definió la existencia de un sistema compuesto por dos acuíferos, uno inferior y otro superior, con una recarga anual calculada en 350 hm³/año; de ellos, 280 hm³ de recarga ascendente proveniente del acuífero inferior y 70 hm³/año de infiltración superficial. Con base en este esquema fueron relocalizados 105 pozos afectados por salinidad cerca de la costa. Tal decisión implicó también la reducción gradual de la extracción de agua subterránea, hasta acercarse a un volumen semejante a la recarga calculada. Este modelo hidrogeológico permaneció por 34 años (1968-2001); sin embargo, el nivel dinámico continuó abatiéndose hasta alcanzar 135 m de profundidad en el año 2000 (65 m bajo el nivel del mar).

Para definir e integrar un nuevo modelo hidrogeológico y la posición de la interfase de la intrusión salina, se utilizaron una variedad de técnicas, tales como el análisis de la imagen LANDSAT y las anomalías de gravedad de estudios previos, con las que fue posible localizar diversas estructuras que limitan la cuenca baja del río Sonora y sus relaciones tectónicas. También se obtuvo, con la gravimetría, un mapa tridimensional del basamento cristalino, el cual forma parte del llamado Batolito Larámide de Sonora; las fosas muestran el desarrollo de una alternancia de fosas tectónicas (grabens) y bloques elevados (horsts)

sensiblemente orientados NW-SE que alcanzan profundidades de 1500 metros. Se caracterizó la geoquímica del agua salina y el agua dulce, así como el proceso de migración, utilizando métodos geoquímicos y geofísicos para explicar cómo y dónde las aguas marinas penetran en formas preferencial. Por lo tanto, es posible decir que la morfología de la zona de costa es un producto de dos eventos neotectónicos (distensivos) llamados la Provincia del "Basin and Range Sonorense" y la apertura del Golfo de California. Como resultado, existen una serie de cuencas tectónicas sedimentarias formadas por bloques caídos del basamento cristalino regional. Estas cuencas representan canales de alta permeabilidad que facilitan el proceso de intrusión marina hacia el continente y por ello se consideran de la mayor relevancia hidrogeológica para el control de este proceso. El escenario neotectónico y estructural Basin and Range Sonorense es de suprema importancia en la distribución, almacenamiento y movimiento del flujo de agua subterránea, porque existen depósitos deltaicos y aluviales que constituyen acuíferos aislados en cada cuenca. En algunas de estas cuencas los sedimentos tienen una fuerte presencia de interestratos de baja permeabilidad que restringen su movimiento lateral y vertical, formando semiconfinamientos. Actualmente el balance de aguas subterráneas muestra que existe un bombeo de $527 \text{ hm}^3/\text{año}$, con una recarga total $150 \text{ hm}^3/\text{año}$. Además no se encontró evidencia de algún acuífero inferior. Este desequilibrio mantiene el cono de abatimiento localizado con la máxima depresión de 65 m bajo el nivel del mar, a 45 km tierra adentro, con una entrada de agua de mar de $98 \text{ hm}^3/\text{año}$, y el frente de agua salina ubicado tierra adentro a una distancia de entre 32 y 36 km de la línea de costa.

Tomando la conductividad eléctrica (CE) en 30 perfiles a lo largo de la franja costera en una red de pozos, fue posible configurar la salinidad a 40, 70 y 100 m de profundidad, la cual muestra la distribución vertical de la intrusión salina. La distribución de parámetros físicos y químicos se realizó utilizando una red de 107 pozos de monitoreo con los que se obtuvo la consistencia para mostrar las calidades representativas en 3D, y se distinguieron tres áreas de diferentes calidades de agua: a) agua de intrusión marina, de 10,000 a 40,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; b) zona de interfase, de 2,000 a 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (agua mezcla); c) zona de agua dulce, <2,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, promedio de calidad del agua dulce del acuífero. Adicionalmente se empleó la información de 408 sondeos electromagnéticos (TEM's) para correlacionar la calidad química del agua y la resistividad del fluido, generándose una representación espacial y tridimensional de la posición de la pluma de agua salina. El sobrebombeo ha excedido a la recarga de los últimos 50 años; desde entonces, el frente de intrusión ha penetrado a una tasa de 650 m por año, así que la posición actual del frente se localiza a 36 km tierra adentro, con dos áreas preferenciales de intrusión, relacionadas con el marco tectónico. En la zona de interfase, la mezcla ha empobrecido la calidad, obteniéndose valores de 2,000 a 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de CE; esta zona de dispersión tiene al menos 80 m de espesor y entre 5 y 10 km de anchura. La intrusión salina, por su parte, de 10 a 20 km de anchura con valores de hasta 40,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de CE. Con este nuevo modelo hidrogeológico, se puede decir que el acuífero de la Costa de Hermosillo requiere de un plan de manejo integral para su administración y control futuros.

Finalmente, siguiendo esa premisa, se encontró con un modelo de simulación de flujo: que el acuífero probablemente alcanzará la depresión máxima en algunos sitios, en zonas cercanas a Siete Cerros, para el año 2012; ello significa que se perderá la saturación y que el nivel dinámico alcanzará el basamento local. Con la aplicación de un modelo de proyección (Índice de Equilibrio) se establece que el primer paso antes de iniciar una restauración es colocar el bombeo anual en equilibrio con el volumen de recarga; el segundo paso consiste en aplicar diferentes acciones para ayudar al acuífero a restaurar su equilibrio en la línea de costa, tal como la inyección de agua tratada, ya sea residual o desalinizada de la franja salobre. Simulando escenarios de sustentabilidad, aplicando estas dos acciones se obtuvieron diferentes índices que muestran que sería posible reducir el volumen de intrusión marina a un tercio del actual, si se mantienen por un período de al menos 50 años. Hasta entonces será advertido el resultado.

Un último pensamiento es que si se preservan las condiciones actuales, el daño al acuífero será irreversible y continuará la insustentabilidad, lo cual implica olvidarse del futuro. Para revertir el impacto ambiental generado se requiere de la toma de decisiones duras y de habilidad política, dado que se tendrá un alto costo social y económico, y tomará varias décadas regresarlo, al menos parcialmente, a su condición natural.

PROPOSAL OF AN INTEGRAL MODEL TO GET THE RECOVERY IN AN INTRUDED AQUIFER, UNDERGO TO AN INTENSIVE USING. THE COSTA DE HERMOSILLO, SONORA., MEXICO

ABSTRACT

It is presented a proposal of an integral model of easy application and understanding to follow a restoration and management of an intruded coastal which is still under heavy pumping conditions. This proposal is supported in a new hydrogeological model and as a prevention measurement, my results can be taken in advantage to support a new management policy model and a restoration program, in order to help users and planners who must take decisions for the life of the system, assuming that the pumping will not stop. The studied aquifer has diminished its initial storage up to near 60%. In a coastal aquifer it is induced the salt water intrusion water because of the hydraulic loss and storage in a fringe of the shoreline. The well known seawater intrusion into the aquifer of Hermosillo's coast is the result of a physical disequilibrium, caused by overpumping in absence of an adequate groundwater administration. This saline contamination process under the circumstances and actual conditions it is considered non reversible for the Costa de Hermosillo aquifer. That is why before to start any action to revert this process it is necessary to identify the position and migration of the the sea water intrusion, in order to evaluate the groundwater balance, to define the hydrodynamic behavior and historic evolution, to know the hydrogeological conceptual model, and physico chemical interrelations.

The coast of Hermosillo aquifer includes an approximate surface of 14,900 km², is located to the southwest of Hermosillo city between the coordinates 28°14' and 28°57' of latitude North and 111°15' and 111° 45' of length West of Greenwich. It is an exorreic basin located on the northwestern of Mexico and its superficial waters drains towards the Gulf of California with an slope according to Horton criteria of 0.18 %.. The climate is dry, with rains in summer, during June to September, the line of 200 mm crosses the area in a paralel pattern to the shoreline. The mean annual temperatures vary from 22 to 24 °C.

The aquifer of coast of Hermosillo initiated its exploitation in 1945 with 17 wells, in the year 1965 it reached its maximum volume of extraction, with 800 and about 1100 Hm³/. Since then there has been diminishing the extraction of ground water, up to stooping at present to a value estimated in 527 Hm³ per year. Since 1949 this loss of hydraulic head in the aquifer originated a depletion cone and inverted the flow from the littoral towards the center of the plain. As consequence, the government started a program to diminish and forbid the exploitation near the coast. The first statement was published in 1951, subsequent amplifications in 1954 and in 1963-1964 the Law of Regulation in the forbidden zone and later amplifications were given due to the strong discouragement in 1967. In 1968 it was defined a system of two aquifers; lower (confined) and upper (unconfined) and the total recharge was calculated in 350 Hm³/year; 280 hm³ of vertical rising infiltration, coming from a low aquifer and 70 Hm³/year from superficial infiltration. With base in this scheme, there were relocated 105 affected wells by salinity near the coast. This decision was implying also, to reduce gradually the extraction of groundwater, up to a volume near to its recharge. This hidrogeologic model remained for 34 years (1968-2001) and the dynamical level continued being deepened up to 135 m in the year 2000 (65 m under the sea level).

A variety of techniques were used to define and to integrate a new hydrogeological model and the current position of the interface of the saline intrusion. With the analysis of the image LANDSAT and the gravity anomalies from previous studies were located the diverse structures that limit the low basin of the Rio Sonora and its neotectonic relations, also it was obtained with gravimetric surveying a tridimensional map of the crystalline basement that shows the depth and the development of an alternation of tectonic basins (grabens) and elevated blocks (horsts) sensitively orientated NW-SE that reach top depths to 1500 meters. It was characterized the

geochemistry of the saline and fresh waters and the process of migration using geochemical and geophysical methods to explain how and where the marine water penetrates preferentially.

Therefore is possible to say that the morphology of the coastal zone is a product of two neotectonic events (distensive) called the Province of "Basin and Range Sonorensis" and to the opening of the Gulf of California. As a result there exist a series of tectonic sedimentary basins formed by fallen blocks of crystalline regional basement constituted of granitic rocks composition, which they form a part of the so called Batolito Larámide of Sonora. These basins represent wide channels of high permeability that facilitate the process of marine intrusion towards the continent and that's why we consider they are the bigger hidrogeologic relevance and control in this process. The neotectonic and structural scenary of the Basin and Range Sonorensis is of supreme importance in the distribution, storage and movement of the groundwater flow, because there exists deltaic and alluvial deposits which constitute isolated aquifers in each basin. In some of this basins the sediments have strong presence of impervious interstrata that restrict its lateral and vertical movement, forming local semiconfinements. The pumping rate from the aquifer has been evaluated in $527 \text{ Hm}^3/\text{year}$, and the total recharge in $150 \text{ Hm}^3/\text{year}$. I did not find evidence of any lower aquifer. This disequilibrium have got a depression cone with a maximum deep of 65 m under the sea level located 45 km inland. I calculate the intrusion of seawater in $98 \text{ Hm}^3/\text{year}$, and the front of the saline water is currently inland up to a distance of 32 km.

Taking the electrical conductance (EC) in 30 profiles along the coast in a net of deep wells we configure the salinity to 40, 70 y 100 m depth and it shows us the vertical distribution of the saline intrusion. With the espacial distribution of physical and chemical parameters, using a monitoring net of 107 wells we got the consistency to show the representative quality of water in 3D vision, I could distinguish three main zones; a) saline intrusion 10,000 to 40,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; b) interface zone 2,000 to 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (mixing water) and; c) fresh water zone $< 2,000 \mu\text{S}/\text{cm}$. The EC average of fresh groundwater quality is 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Additionally I use the surveying of 408 electromagnetic soundings (TEM's) to correlate the chemical quality and the fluid resistivity and they all gave us the final espacial and tridimensional distribution of the saline intrusion, and the current position of the plume of saline water. The excessive pumping rate in the aquifer exceeded the natural recharge since 50 years ago, since then the front of the saline intrusion have been migrating at 650 m a year, however the current position is of 36 km inland, with the two preferential areas for the saline intrusion related with the tectonic settings. In the interface zone has been getting poorer and goes from 2,000 to 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, this dispersion zone has at least a depth of 80 m and 5 to 10 km width. The saline intrusion zone has 10 to 20 km width and I found electrical conductances up to 40,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. With all this new hidrogeological model it can say that the aquifer of Costa de Hermosillo needs an integrated water management plan for future administration and control.

Finally following that premise I found with the use of a simulation model that the aquifer will reach the maximum depletion in some sites near Siete Cerros area by the year 2012, when the groundwater level will touch the local basement, this means the end of the saturation thickness. With the application of a projection model (Equilibrium index), It is possible to establish that the first step to start the restoration is to set the annual pumping rate in equilibrium with the recharge volume, second step to apply different actions to help the aquifer to restart its equilibrium in the shoreline, such as injection wells using residual and desalination water. With these two actions according with the application of my sustainable index it will be possible to reduce the intrusion volume to a 1/3rd of the actual one in a period of at least 50 years. The last thought is; if we preserve the actual condition we will take the aquifer to an irreversible damage and it will continue the system untenability, this means forgetting the future. Unfortunately, to revert the generated environmental impact will require hard decisions and political ability, since it will have a high social and economic cost and will take several decades to partially give back its natural condition.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema.

1.1.1 Localización del acuífero Costa de Hermosillo.

El área del acuífero en estudio comprende una planicie costera que se extiende entre la ciudad de Hermosillo, cabecera municipal, ubicada en la porción central-oeste del Estado de Sonora, y Bahía Kino por el norte y el estero de Tastiota al sur. Bahía Kino junto con Miguel Alemán son las poblaciones más importantes del área. El área es conocida como acuífero Costa de Hermosillo y fue enmarcada para su estudio dentro de un polígono irregular casi alargado, conforme a la sinuosidad del litoral del Golfo de California (Figura 1.1).

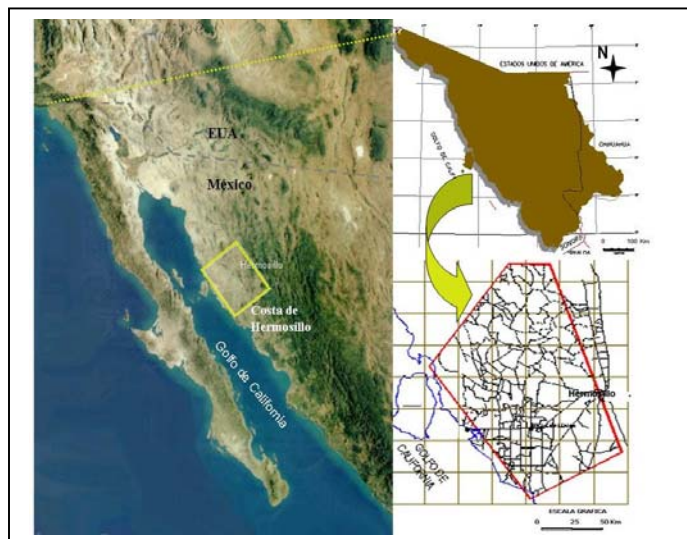


Figura 1.1 Localización del área de estudio. En oscuro, esquina superior derecha, la región noroeste de la CNA sobre el Estado de Sonora.

El polígono del área de estudio está delimitado con los siguientes puntos de coordenadas: $110^{\circ}56'$ y $29^{\circ}00'$, $111^{\circ} 20'$ y $30^{\circ} 00'$, $111^{\circ} 40'$ y $30^{\circ} 00'$, $112^{\circ} 15'$ y $29^{\circ} 17'$ y $111^{\circ} 29'$ y $28^{\circ} 20'$, con un área de aproximadamente $14,900 \text{ km}^2$.

La Comisión Nacional del Agua (CNA) ubica al acuífero dentro de la Región Hidrológica # 9, Sonora Sur, Cuenca "E" Río Bacoachi, Subcuenca "b" Arroyo La Manga. Es una cuenca exorreica ubicada sobre la vertiente occidental de México con sus marcas de drenes superficiales en dirección hacia el Golfo de California.

En el área denominada Costa de Hermosillo los escurrimientos superficiales más importantes son el río Sonora y el arroyo Bacoachi. Las marcas de drenaje del río Sonora prácticamente han sido cubiertas por la mancha urbana de la ciudad de Hermosillo y desde 1992 quedó encauzado para desembocar hacia bahía Tastiota. Por su parte el arroyo Bacoachi tiene escurrimientos superficiales temporales de menor importancia, que descargan en la laguna de San Bartolo. El área queda limitada al este por la Sierra La Cobriza y la ciudad de Hermosillo, en donde hace frontera con la región del valle del río Sonora y la Sierra Libre; al norte por la Sierra López y el Cerro El Volteadero; al oeste por el Golfo de California, mientras el resto del área está rodeada por cerros aislados y sierras de poca extensión, que representan las barreras laterales del agua subterránea, importantes unidades de baja permeabilidad que definen las condiciones de frontera de la zona acuífera. Los rasgos característicos del área son: en la porción occidental, una amplia planicie aluvial con formación de lagunas en línea

costera; mesetas volcánicas en la parte central y vestigios de montañas sedimentarias en la parte oriental, así como plutones de composición félsica distribuidos ampliamente.

La planicie tiene una pendiente suave del orden de 2%, su forma es irregular y se encuentra limitada al este por pequeñas serranías formadas por los cerros La Morada, La Panocha, Recortado, Prieto, La Pirinola, Las Cuevas, El Tordillo, Mina El Agua, Chupadero, La Puerca y el Gorgus, cuyas alturas máximas apenas rebasan los 250 m.s.n.m. Hacia el norte sólo existe el valle aluvial, y hacia el oeste y suroeste limita con el Golfo de California o Mar de Cortés.

1.1.2 Concepción y bases del estudio.

Entender un régimen de flujo moderno, conceptualizarlo y evaluar su disponibilidad requiere de una gran cantidad de información, recursos materiales y humanos, así como del uso de herramientas multidisciplinarias que puedan aportar modelos hidrogeológicos conceptuales y de funcionamiento, con los cuales los administradores del recurso tengan la capacidad de ordenar y normar un acuífero y controlar o sustentar su extracción en tanto se mantiene el equilibrio hidrodinámico. Sin embargo, identificar el probable origen, edad y movimiento de la recarga del agua subterránea de un acuífero con tránsito de flujo regional, es de la mayor importancia en la administración del recurso. Estos sistemas de flujos regionales coinciden con la teoría de Tóth (1963), en que tienen el área de recarga en las divisorias de agua y el área de descarga en los fondos de los valles; entonces, en términos de esta definición, los regímenes suelen tener períodos de recarga de miles de años; los orígenes de su recarga pueden llegar inclusive a remontarse a los períodos interglaciares holocénicos, cuyos regímenes climáticos diferían de los actuales. Lo anterior, si se considera que la reposición de un sistema hidrológico subterráneo regional lleva, y en la práctica para administrarla hay que entenderlo así, el estigma de tener que considerarla en la escala temporal del hombre como agua fósil, dado su bajo o nulo nivel de recuperación en el corto plazo.

Existe otro factor sobresaliente que se adiciona a los anteriores en el caso de los acuíferos regionales: la ubicación. Si se trata de acuíferos costeros, el sobrebombeo reduce el almacenamiento y el frente de intrusión salina vence la carga hidráulica del agua dulce para penetrar sistemáticamente tierra adentro; es conceptualmente definida como la entrada de agua salina en un sistema acuífero (Van Dam, 1999).

En México, las experiencias sobre acuíferos costeros detríticos son limitadas; las reportadas por diversos autores se centran geográficamente en el noroeste de México, principalmente en el Estado de Sonora y muy concretamente en los acuíferos de Peñasco, Caborca, Costa de Hermosillo, El Sahuaral, Guaymas-Empalme, Valle del Yaqui y Valle del Mayo, y en el acuífero de Guasave, en Sinaloa. Si bien otras experiencias han sido reportadas en el Estado de Yucatán, se trata de un medio cárstico, cuyas características, por sí mismas, separan un tipo de otro, inclusive en métodos de

investigación y disciplinas de estudio (González, 2005; Casares, 2005; Graniel, 2005 en Congreso 2005). Tradicionalmente se ha admitido como norma general que los acuíferos cársticos presentan numerosas singularidades que afectan la organización del flujo (Morell, 2003).

De los trabajos reportados sobre acuíferos costeros intrusionados, el de la Costa de Hermosillo es tal vez no solamente el más antiguo en haberse analizado, sino sobre el que se han realizado más investigaciones en México; aunque el hecho de haber iniciado los primeros estudios en la década de los 60 (CNA, 2002) haya inducido a sentar las bases sobre un modelo hidrogeológico conceptual erróneo, que permitió que una estrategia mal soportada incrementara el deterioro del agua subterránea y la aceleración del proceso de intrusión salina, como se dio en este caso, a menudo este tipo de problemas hidrogeológicos no son, o no pueden ser, suficientemente cuantificados debido a la escasez de datos (Van Dam, 1999). Ello se refiere a que, desafortunadamente, en ese tiempo las herramientas de campo para la investigación con métodos directos e indirectos, así como los medios computacionales, no estaban disponibles, por lo que el modelo conceptual se simplificó en exceso para sentar las bases de un conocimiento que resultó inadecuado de la geometría del sistema y del funcionamiento hidrodinámico; en cierta forma el valor de la recarga se ajustó de manera convencional simplemente para que ayudara a detener el excesivo sobrebombeo del acuífero.

Sin embargo, para entender el porqué y cómo se dio la carrera acelerada en esos años para la extracción de agua subterránea en la Costa de Hermosillo, se debe reconocer que se conjuntaron, además de los elementos técnicos mencionados, el marco jurídico que con algunos ordenamientos permitió el inicio de la explotación de agua subterránea a gran escala. En enero de 1945 se decretó la integración de las "aguas subterráneas" a la propiedad de la nación, se reconoce su existencia, lo que incluyó la modificación del párrafo 5º del artículo 27 constitucional. Lo más importante fue sin duda la Ley de Riegos de 1946, que sustituyó a la Ley sobre irrigación de aguas federales de 1926; su expedición, según afirma Moreno (2004), se dio en forma paralela a la creación de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). En esta ley se declara como de utilidad pública (Art. 2º) "el alumbramiento de aguas subterráneas, la colonización de las tierras beneficiadas con obras de riego, el aprovechamiento de éstas"... y hasta la formación de centros urbano-agrícolas, y se legalizó la existencia de Distritos de Riego, todo como una política nacional. El nuevo texto asienta que "las aguas del subsuelo pueden ser libremente alumbradas...y apropiarse por el dueño del terreno; cuando lo exija el interés público, o se afecten a otros aprovechamientos, el ejecutivo federal podrá reglamentar...y aún establecer zonas vedadas". Desgraciadamente, como afirma Moreno (2004) con toda razón, al surgir los conceptos de "libre alumbramiento" o "libre bombeo", en la práctica se tradujeron como una extracción de agua sin regulación ni control, y es así como en esos años se dio inicio a la colonización de la Costa de Hermosillo.

1.2 Estudios previos.

Al conceptualizar el desarrollo de un acuífero costero como el de este trabajo, se deben analizar cuatro etapas principales: exploración, explotación, restauración y manejo. Las dos primeras etapas se cumplieron desde 1945, con un descubrimiento un tanto inesperado de agua subterránea. 20 años después, el acuífero había sido explorado y estaba por alcanzar su grado máximo de explotación para 1967. Sin embargo, como escribe Arreguín (1998), "la perforación de pozos fue anárquica, siempre en el predio del interesado y fuera de consideraciones geohidrológicas regionales. Al paso de los años se fueron notando los efectos de interferencias durante la operación conjunta de los pozos, el abatimiento generalizado de los niveles de agua por sobreexplotaciones locales primeramente y regionales después, con sus variados efectos secundarios colaterales". Por ello, en escena la existencia de información del subsuelo es nula para esos años; los especialistas entraron décadas después. Como menciona Arreguín (1998), en esos años la búsqueda de agua subterránea estuvo regida por la "rabdomancia y los zahoríes".

Los primeros estudios para este acuífero proceden de los años 60's (Ariel Construcciones, S.A., 1967 y 1968). El estudio realizado en 1968 por Ariel Construcciones, para la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), es no solamente el más importante por haber cuantificado el volumen de recarga media anual en 350 hm³ que recibía el acuífero, sino que además definió un modelo hidrogeológico conceptual que sustentó la extracción por los siguientes 31 años.

Sobre éste se basaron los autores de trabajos posteriores y la normatividad de su explotación (Payne y otros, 1978; Steinich y otros, 1997; Flores-Márquez y otros, 1998; Fimbres, 1999). Sin embargo, llama la atención que la mayoría de los autores retomaron sistemáticamente no sólo el mismo modelo conceptual, sino inclusive las mismas descripciones geológicas del primer estudio (Ariel Construcciones, S.A., 1967). Siete de los trabajos subsecuentes que se enfocan específicamente a los aspectos geohidrológicos del área entre la ciudad de Hermosillo y su Costa reproducen los aspectos geomorfológicos y la geología ya obsoleta, por lo que su aplicación es inapropiada al interpretarse (Payne y otros, 1978; Rodríguez y Pérez, 1991; Marín y otros, 1996; Steinich y otros, 1997⁽¹⁾ y 1997⁽²⁾; Flores-Márquez y otros, 1998; Fimbres, 1999). Explícitamente, algunos de los autores de dichos estudios hacen referencia a geología efectuada en 1968, ignorando avances fundamentales existentes, tanto conceptuales como en la acumulación de una vasta cantidad de datos que han mejorado los conocimientos de la región en los últimos 30 años.

1.3 Definición legal del acuífero.

La Comisión Nacional del Agua administra el manejo del agua del acuífero Costa de Hermosillo, como Distrito de Riego por bombeo (DR-051), creado mediante decreto presidencial en diciembre de 1953. Sin embargo, para entender la situación

hidrogeológica del agua subterránea de la región se debe subdividir en: a) **acuífero de la Costa de Hermosillo** y b) **acuíferos del valle del río Sonora**, los cuales se encuentran gradiente arriba de la cabecera del acuífero Costa de Hermosillo y son su zona de recarga, como se refiere más adelante en este trabajo (Figura 1.2).

Las unidades hidrogeológicas del valle del río Sonora son reconocidas administrativamente como acuíferos: San Miguel, El Zanjón, Mesa del Seri, río Sonora, La Poza y Sahuaral, las cuales se encuentran interconectadas con el de la Costa de Hermosillo. Todos estos acuíferos, excepto La Poza, están sobre bombeados. La zona de estudio comprende, entonces, lo que podría denominarse la Cuenca Baja del Río Sonora (CBRS), desde la presa Abelardo Rodríguez Luján hasta el Mar de Cortés. Por lo tanto, queda contenida como Distrito de Desarrollo Rural-144, DR-051 y área urbana de la ciudad de Hermosillo, cabecera municipal.

El acuífero Costa de Hermosillo es el más antiguo en explotación intensiva, por lo que en numerosas ocasiones ha sido motivo de veda para la extracción de agua subterránea. La veda se entiende en términos de la normatividad mexicana, donde un acuífero no es libre de explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales (DOF, 1992).

La primera veda fue decretada el 11 de julio de 1951. Se pretendió proteger una superficie muy pequeña de la Costa de Hermosillo, comprendida en los municipios de Villa de Seris y Hermosillo, muy al interior de la línea de costa. El 11 de diciembre de 1954 se decretó la primera ampliación del área de veda para la Costa de Hermosillo, pero sólo abarcó hasta los límites del Distrito de Riego. Una segunda ampliación de veda fue decretada el 2 de marzo de 1963.

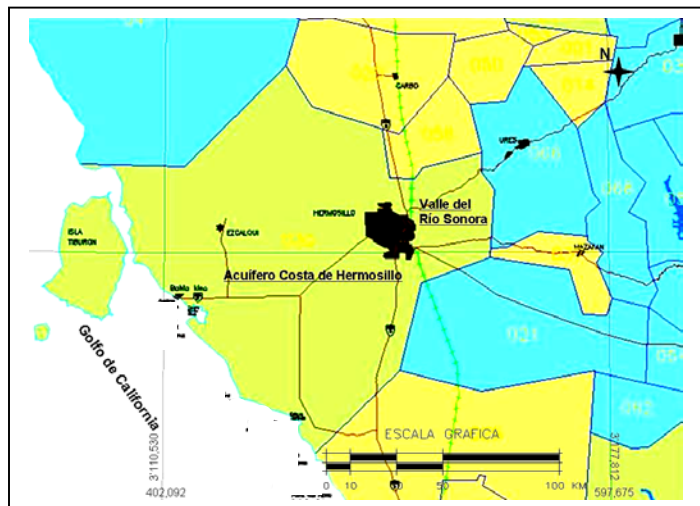


Figura 1.2 Ubicación de las zonas de acuíferos en el área de estudio (Los colores en el mapa representan diferentes distritos de desarrollo rural, DDR). En verde el DDR 141, Costa de Hermosillo.

Finalmente, el 2 de junio de 1967 fue decretada la tercera ampliación de la veda, que se puede interpretar genéricamente como la primera gestión integral del acuífero de la Costa de Hermosillo, puesto que protegió a toda la cuenca del río Sonora y sus tributarios San Miguel y Zanjón. Es decir, la zona de extracción y sus zonas de recarga. El agua del acuífero de la Costa de Hermosillo se destina principalmente a uso agrícola en 86%; el resto en aprovechamiento público urbano y actividades pecuarias y de servicios (Figura 1.3).

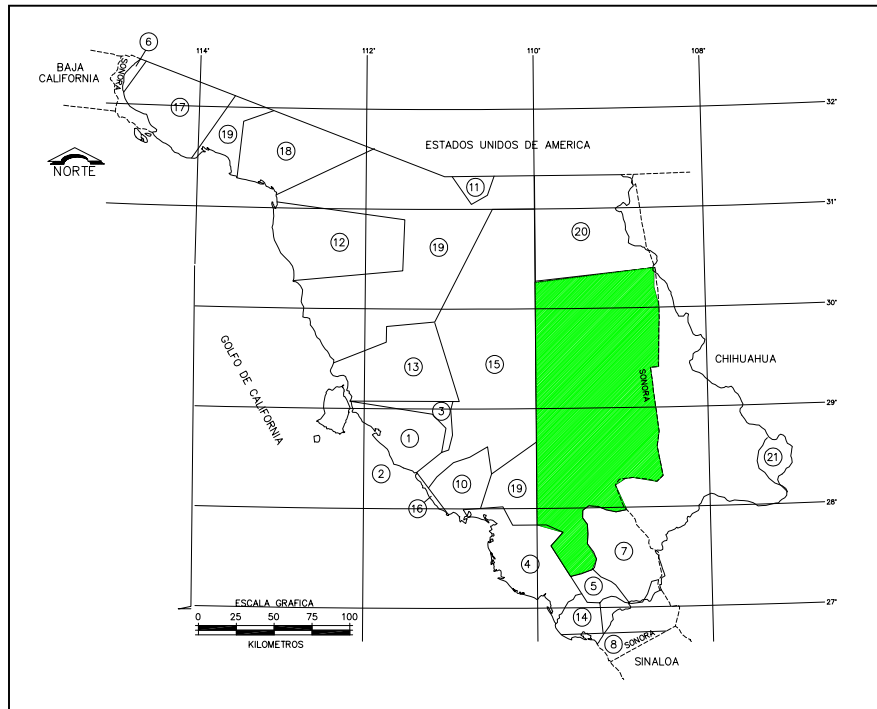


Figura 1.3 Mapa de las 21 etapas de veda. En color verde, zona de libre alumbramiento (CNA, 1999).

1.4 Evolución histórica de la extracción de agua subterránea.

La construcción de la presa Abelardo Rodríguez Luján en el año 1947 tuvo por objetivo almacenar agua superficial para la zona de riego del ejido Villa de Seris; sin embargo, canceló a los colonos de la Costa de Hermosillo la posibilidad de recibir agua superficial para continuar con sus prácticas agrícolas ya arraigadas, si bien de bajo rendimiento por ser de temporal. El control del río prácticamente impulsó a los colonos a buscar agua en el subsuelo, con resultados tan exitosos en rendimiento y calidad que se desencadenó en pocos años una infraestructura hidráulica que alcanzó grandes dimensiones (Oroz, 2003).

Los primeros pozos de la Costa de Hermosillo datan de 1945, cuando existían 14, pero los exitosos resultados de 1947 hicieron que proliferara el número de perforaciones, alcanzando en 1949 la cifra de 400. Estas obras se operaron en dos formas: 1) **masiva**, ya que con el temor al fallo, la distancia entre alumbramientos llegó a ser de unas cuantas decenas de metros a un máximo de 400m, y 2) **intensiva**, pues los pozos se perforaron sin control técnico y con un total desconocimiento de la capacidad del acuífero: de un pozo se extraía el agua que podía extraer la bomba instalada, y si rendía 100 litros por segundo (LPS) se le consideraba de bajo caudal. La consecuencia fue el sobrebombeo, que provocó abatimientos, los cuales indujeron la inversión del gradiente hidráulico del mar hacia el continente.

En 1953, luego de la imposición de la primera veda, se creó el Distrito de Riego No. 051 con el fin de controlar el bombeo de los pozos existentes. El objetivo del ordenamiento gubernamental y la planeación fueron ambiciosos, pero mal operados y peor organizados, quedando rebasada la normatividad por la realidad. Como consecuencia del descontrol del acuífero y el desorden administrativo, la extracción, lejos de regularse, se incrementó en los siguientes años. Esto motivó la necesidad oficial de ampliar la zona de veda para proteger las zonas de recarga de la costa. Se observó que las restricciones impuestas no fueron suficientes, ya que el resultado del sobrebombeo fue la intrusión del agua marina en la zona de bombeo más próxima a la línea de costa. A partir del ciclo agrícola 1963-1964, la Secretaría de Recursos Hidráulicos puso en práctica el Reglamento para la Explotación de las Aguas Subterráneas en la zona vedada de la Costa de Hermosillo, basada en el decreto de ese año.

Con esta nueva reglamentación ejecutada "en el papel" se pretendió restringir las extracciones de agua, reduciendo en 40% con respecto al promedio de las extracciones de los últimos tres ciclos agrícolas, plan a ejecutarse en cuatro años. Fue también en el ciclo agrícola 1963-64 cuando los concesionarios del agua del subsuelo recibieron la obligatoriedad de instalar en sus alumbramientos, medidores de las extracciones de cada pozo. Éstos fueron parcialmente colocados, asumiendo pretextos, por lo que desde entonces a la fecha, durante más de 40 años, no existen o no funcionan.

Las buenas intenciones por controlar el acuífero no se vieron reflejadas en la realidad, ya que siguió incrementándose el bombeo y tres años después, en 1967, alcanzó la cifra más alta de la historia con 1,150 hm³ (Figura 1.4).

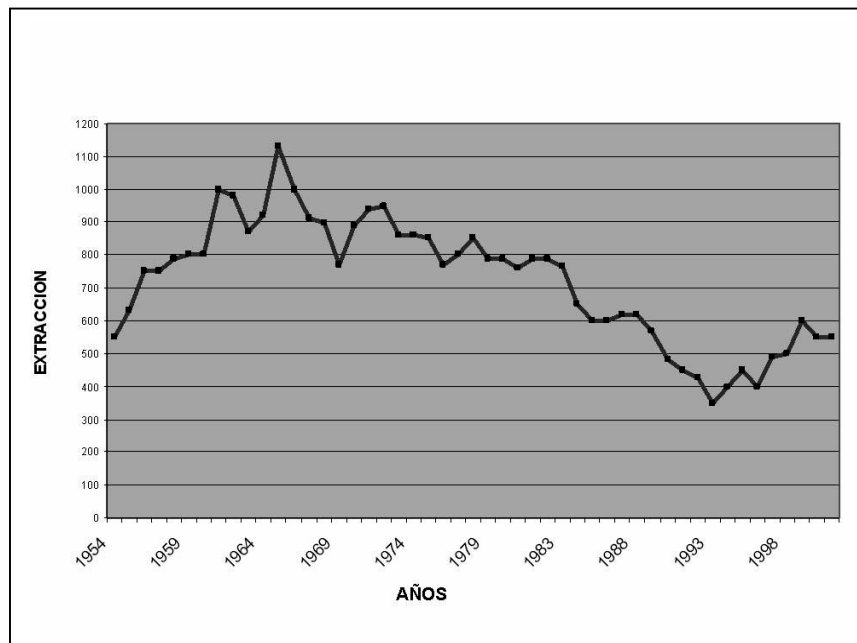


Figura 1.4 Evolución de la extracción de agua subterránea en el acuífero Costa de Hermosillo (1954-2003). Fuente CNA. 2000.

La fase positiva de la aplicación de los decretos mencionados inició a partir de 1968, cuando las condiciones de operación del acuífero se modificaron sustancialmente. En primera instancia, la superficie de siembra se redujo paulatinamente de 132,000 has. que se regaban en el año de 1967, a unas 52,000 ha que se beneficiaban 31 años después. Actualmente el área de cultivo promedia 45,000 has. con un descenso paralelo en el consumo de agua de riego por bombeo, que cayó de casi 1,200 a 450 hm³, cifra oficial de los usuarios desde el último año del período citado al presente (Figura 1.5).

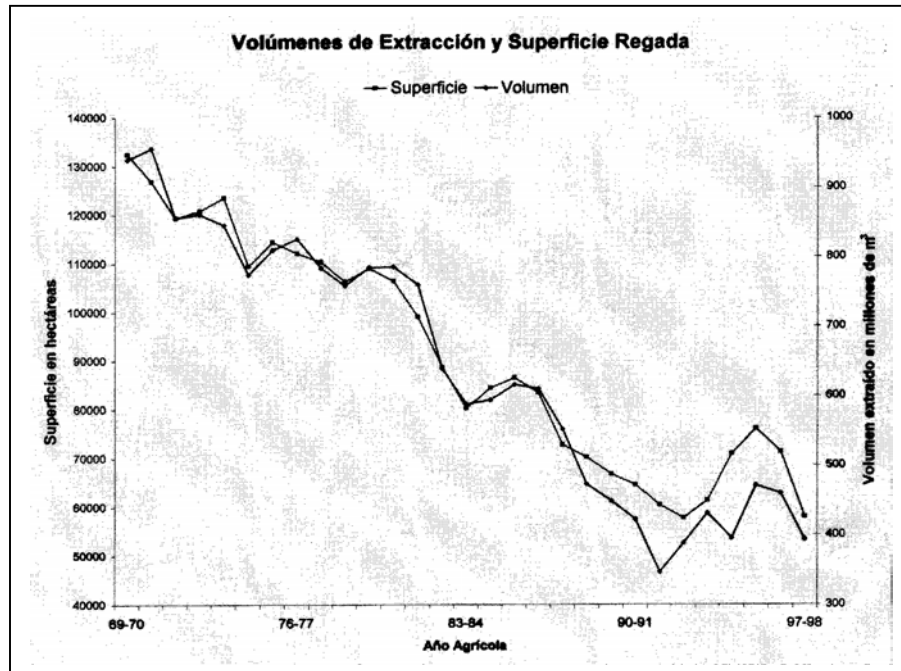


Figura 1.5 Superficie regada y volúmenes de extracción en la Costa de Hermosillo (1969-1998) (CNA, 1999).

Igualmente, a raíz de la política de reducción, se empezó a dar mayor énfasis a la plantación de frutales y al establecimiento de riegos presurizados, básicamente riego por goteo y microaspersión, para incrementar el beneficio-costos en el uso del agua. Todo ello aunque estudios como el de Busch y Matlock (en Moreno, 2004) concluyeron que "se podrían extraer 500 hm³ por un largo período de tiempo" sin causar ninguna depresión acumulativa del nivel del agua (Jiménez, 1965). No obstante, el producto hidrodinámico se observó con la formación de un gran cono de abatimiento en la región central del acuífero. A partir del año 1990 se dio por concluido el plan de reducción de extracciones a pesar del resultado hidrodinámico, si bien el acuífero tendería a mejorar 10 años después, al extraerse un volumen de 448 hm³ en lugar de 800 hm³ de las dos décadas previas.

En la actualidad, de las 45,000 has. bajo cultivo, 15,000 (aproximadamente un 34%) cuentan con sistemas de riego presurizado; el resto es por inundación (Figura 1.5). La técnica de optimización reduce el uso de agua aplicada al cultivo, principalmente en 4,000 has. de frutales y hortalizas; esto ha reducido considerablemente la lámina de riego en esa área. Una consecuencia de ello es la reducción del volumen de recarga por retorno de riego en esas zonas, si bien el porcentaje de baja eficiencia es aún muy alto. Por lo que aunado a lo anterior, más el descenso en la superficie de cultivo y la reducción del bombeo desde hace 30 años, el ritmo del abatimiento medio anual bajó de 1.33 a 0.29m en zonas específicas y el avance de la intrusión salina en los últimos cuatro años ha sido con un ritmo más lento (Oroz. 2003).



Figura 1.6 Riego por inundación típico de una huerta de nogales en la Costa de Hermosillo, Son. Nótese la gran separación entre árboles y la extensión de agua entre ellas, por lo que dada la alta evaporación potencial, se genera una alta ineficiencia en el manejo del recurso.

1.5 La intrusión del agua de mar.

Hasta el año 2000 estuvo aceptado, por múltiples estudios realizados, que la capacidad de recarga anual que recibía el acuífero era del orden de 350 hm³, de acuerdo con el modelo hidrogeológico de Ariel Construcciones (1967) que definía un sistema de dos acuíferos, uno superior, en explotación, y otro inferior, que aportaba una recarga vertical ascendente de 280 hm³/año; el resto de la recarga era lateral con 70 hm³. Esta concepción permitió dos vertientes de interpretación: una positiva al lograr reducir el volumen que hasta antes de 1968 se extraía, pues se tomaron acuerdos para equilibrar la extracción-recarga de este acuífero, ya que el bombeo anual autorizado era de 802.3 hm³ por año con las consecuencias descritas. La parte negativa fue que indujo a pensar en que si este acuífero se agotaba, existía otro de reserva (Figura 1.7).

En todos los planes para conservación del acuífero, desde 1968, la base del volumen de recarga anual fue de 350 hm³, aun cuando las condiciones de manejo eran muy diferentes, toda vez que los efectos negativos de la sobreexplotación (descenso de niveles y degradación de la calidad del agua por intrusión marina) fueron cada vez más evidentes y no se lograron detener.

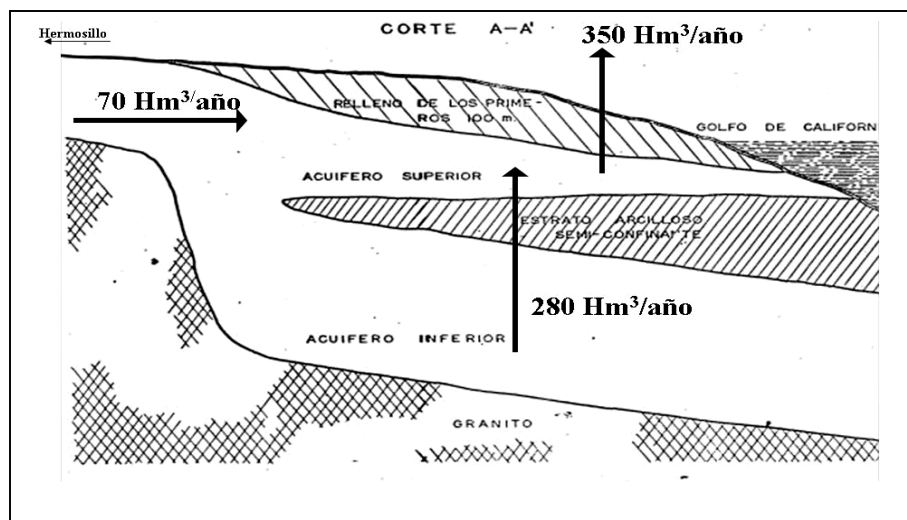


Figura 1.7 Modelo hidrogeológico y volúmenes de recarga-descarga del acuífero Costa de Hermosillo (Ariel Construcciones, S. A., 1968).

Nuevamente el 6 de octubre de 1977, para detener “en definitiva” el sobrebombeo del acuífero y lograr el equilibrio hidrodinámico, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) y los usuarios agrícolas del Distrito de Riego 051, acordaron un plan con duración de 13 años para reducir en un 50% las extracciones en forma gradual, su aplicación inició ese mismo año y concluyó en 1990 (Monreal y otros 2000). En 1980 el gobierno federal expidió el Decreto (D.O.F. 25 de enero de 1980) en el que se declaró de utilidad pública la rehabilitación del Distrito de Riego 051 Costa de Hermosillo, en el cual se ratifica la aplicación del plan y estableció acciones que a la postre afectarían severamente al sistema, tales como la relocalización de 105 pozos afectados por alta salinidad, con lo que se pretendió resolver el avance de intrusión salina hacia el continente. Sin embargo estas relocalizaciones fueron hechas gradiente arriba del cono de abatimiento generado, por lo que paulatinamente disminuyeron la recarga horizontal que recibía lateralmente el acuífero, acentuando más la pérdida de recarga de agua dulce. De igual manera y paralelamente en la región del valle del Río Sonora, cabecera del acuífero, se incrementó desde mediados de los años 80 la extracción de agua subterránea, al abrirse nuevas zonas de cultivo y para cubrir la demanda de uso público-urbano de la ciudad de Hermosillo.

La extracción anual autorizada a partir del ciclo 1989-90 fue de 409 hm³, asignándose a cada pozo una dotación de agua para cada ciclo agrícola y quedando autorizada a la “Asociación de Usuarios del Distrito de Riego 051 Costa de Hermosillo, A. C.”, una sola concesión global para el acuífero, que libró a los usuarios, en lo individual, de la responsabilidad sobre el uso del agua subterránea y ha producido abatimientos medios anuales de 1.0m prácticamente desde 1950 (CNA, 2002), evolución que llevó en 1999 a una posición del nivel estático de 65m abajo del nivel medio del mar, en la zona de depresión más crítica de la planicie. Este desequilibrio hidráulico invirtió el gradiente provocando la invasión de agua con un frente de intrusión marina que afectó pozos ubicados en una franja de entre 10 y 32 km del

litoral y la inutilización de una superficie agrícola por salinización de suelos, aceleración de la desertificación en 30,000 has. y la degradación en la calidad del agua subterránea (Monreal y otros, 2000).

1.6 Objetivo.

El objetivo del presente trabajo es generar un modelo integral de fácil aplicación y entendimiento general que pueda seguirse para la restauración y manejo de un acuífero costero intrusionado y que sigue siendo sometido a bombeo intensivo, ajustado bajo un esquema tipo que genera un Índice de Disponibilidad y Uso Sustentable (IDUS).

1.6.1 Metas específicas.

Las metas específicas se planearon para, en primer término, obtener el modelo conceptual hidrogeológico del acuífero Costa de Hermosillo, que fue tomado para el estudio de caso. La elaboración del modelo, integrando metodológicamente información, considerando la baja definición hidrogeológica existente, fue muy ambiciosa y exhaustiva; la abundancia de información a veces generó más confusiones que ayuda, sobre todo considerando que su calidad no siempre fue generosa. Las metas, sin embargo, ligeramente modificadas, de acuerdo con el caso de estudio, se ajustaron al modelo metodológico de Van Dam (1999):

- a) En el subsuelo:
Definir la estructura geológica; se obtuvo la litología a detalle.
Obtener las constantes hidrogeológicas.
- b) En la entrada natural:
Analizar la hidroclimatología, con particular énfasis en los datos de precipitación y evapotranspiración.
Evaluar la recarga natural.
- c) Niveles de agua:
Procesar los datos de elevación de niveles piezométricos, configurar y analizarlos.
Integrar los niveles superficiales al análisis; en este caso es cero.
- d) Calidad del agua:
Obtener e interpretar la composición química e isotópica, en particular la salinidad, así como la contaminación.
Identificar fuentes de contaminación de agua subterránea.
- e) Agua superficial:
Evaluar la descarga natural; en este caso es cero.
Evaluar la disponibilidad y calidad del agua superficial de recarga artificial (retorno del riego).
- f) Presente y pasado de la explotación:
Analizar el presente y pasado de las extracciones de agua subterránea dulce y salina (hidrometría histórica, prospectiva de la explotación).

En caso de existir, analizar el presente y pasado de la recarga artificial.

- g) Analizar presente y pasado de la demanda y estimar el futuro.
- h) Observar el levantamiento relativo del nivel del mar.
- i) Intrusión del agua de mar:

En este caso se determinaron como parte de los trabajos para caracterizar el frente de intrusión salina, las propiedades hidráulicas del acuífero y la distribución espacial de la salinidad del agua subterránea en sectores prefijados de la planicie costera del acuífero Costa de Hermosillo.

- j) Evaluación hidrogeológica del acuífero y conceptualizar a detalle la intrusión salina y las perspectivas futuras del comportamiento de los niveles hidrodinámicos, así como el comportamiento de la intrusión salina, en la Costa de Hermosillo.

1.7 Métodos de la investigación.

Para lograr las metas descritas, se realizaron diversas actividades a lo largo de los últimos 4 años, o bien se integraron resultados de otras investigaciones previas y contemporáneas al presente estudio, que siguieron la metodología propuesta por Van Dam (1999). Se adicionaron trabajos realizados bajo convenio de colaboración entre la Universidad de Sonora y la Comisión Nacional del Agua.

El listado resumido de las actividades efectuadas es el siguiente:

1. Se elaboró e integró la información de subsuelo en la zona de transición (interfase salina), realizando las siguientes actividades:

- 1) Perforación y aforo de un pozo de 200m de profundidad.
- 2) Perforación de 2 pozos de observación de 150m de profundidad.
- 3) Perforación de 5 piezómetros o pozos de monitoreo de 150m de profundidad.
- 4) Prueba de bombeo con duración de 72 horas en el pozo de bombeo.
- 5) Realización de 15 pruebas de bombeo en pozos existentes en la Costa de Hermosillo.
- 6) Realización de 8 registros geofísicos en los pozos perforados.
- 7) Realización de 7 registros geofísicos en pozos (ya existentes) inactivos.
- 8) Medición de conductividad eléctrica vertical en 30 pozos existentes.
- 9) Ejecución de 411 sondeos geofísicos electromagnéticos (TEM).
- 10) Levantamientos topográficos con GPS diferencial.
- 11) Colección y análisis de 107 muestras de agua subterránea.
- 12) Rehabilitación de 8 piezómetros profundos o pozos centinelas ya existentes.

Con esta información fue posible obtener:

- a) Medición de la profundidad del nivel estático en el pozo de bombeo y en los pozos de observación y sus niveles dinámicos.
- b) Se determinó la transmisividad, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento en el acuífero, así como el radio de influencia del bombeo.

- c) Se elaboraron cortes litológicos y análisis granulométricos de los sedimentos colectados durante la perforación de los pozos.
- d) Se obtuvieron columnas litológicas y correlaciones estratigráficas.
- e) Se levantaron mediciones verticales de conductividad eléctrica y su interpretación.
- f) Se recolectó la elaboración de plano de topografía del basamento cristalino y secciones geológicas orientadas.
- g) Se definió la morfología de la cuenca y las unidades hidrogeológicas que la componen.
- h) Se obtuvo la geoquímica del agua subterránea y la posición del frente de intrusión marina, incluyendo la caracterización isotópica.

2. Se determinó el balance de aguas subterráneas del acuífero de la Costa de Hermosillo, definiendo explícitamente las componentes de la ecuación de balance, y se comprobó su potencial y disponibilidad actual.

3. Se determinaron cuantitativamente los volúmenes de agua que recibe el acuífero como recarga total anual, desglosando claramente los volúmenes de entradas y salidas, como son: recarga natural y recarga inducida, así como las salidas por bombeo, flujo subterráneo, cambio de almacenamiento, etc. Se definió también la disponibilidad actual.

4. Se determinó la hidrodinámica del flujo subterráneo.

5. Se evaluó el estado actual de explotación de las aguas subterráneas con relación a los volúmenes históricos extraídos del acuífero.

6. Se desarrolló un Índice de Equilibrio buscando que la operación para cualquier acuífero se guiara con un número, el cual tiende a cero cuando el bombeo se reduce.

7. Se estableció el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico subterráneo (ambiente hidrogeológico y régimen del agua subterránea), con base en los sistemas de flujo.

8. Con base en el modelo conceptual, se desarrolló e implementó un modelo de simulación y predicción de flujo hidrodinámico del acuífero utilizando el software "Visual Modflow".

9. Se desarrolló e implementó un modelo de manejo caracterizado por un Índice de Disponibilidad Sustentable (IDUS).

10. Se analizó la situación integral actual del acuífero para proponer políticas de operación.

11. Finalmente, se proponen políticas de operación futura del agua subterránea del acuífero, determinando el volumen óptimo explotable a partir del IDUS.

El concepto del manejo integral del recurso hidráulico ha sido planteado como la medida necesaria para enfrentar las crecientes demandas de la sociedad para su desarrollo y evitar el uso irracional del recurso, y la cuenca hidrológica es la unidad de planeación más adecuada para el aprovechamiento de los recursos hidráulicos, ya que dentro de ella es posible tomar en cuenta los efectos que pueden causar las acciones relacionadas con el aprovechamiento y control del agua (Rangel, 2004b).

Los trabajos realizados, de donde surge la información para integrar este trabajo doctoral, abarcan un período de cuatro años, que se pueden ubicar en tres eventos principales:

1) Participación del autor como responsable del "Estudio geohidrológico del comportamiento del acuífero mediante la realización de pruebas de bombeo y conceptualización a detalle de la intrusión salina en el acuífero de la Costa de Hermosillo", y en particular de los estudios hidrogeoquímicos e isotópicos y de la exploración directa "Informe Final de Proyecto en colaboración con la Comisión Nacional del Agua-Universidad de Sonora", realizado entre febrero y agosto del año 2000.

2) Participación del autor como responsable del "Estudio de cuantificación de la recarga del acuífero Costa de Hermosillo, municipio de Hermosillo, Sonora", en particular de la hidrogeoquímica e isotopía e hidrogeología, realizado entre noviembre de 2000 y agosto de 2001.

3) Participación del autor como responsable de los estudios de hidroclimatología, hidrogeología e hidrogeoquímica del "Estudio de actualización de los acuíferos Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri-La Victoria y Río Sonora en la cuenca del río Sonora, México", entre mayo de 2004 y marzo de 2005.

Todos realizados dentro del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora.

Dentro del período de ejecución de este trabajo de investigación se encontró que la región enfrenta problemas severos de escasez, sobreexplotación, contaminación del agua, intrusión salina en acuíferos, salinización de suelos agrícolas, rezago en infraestructura que permita acceder a todos los habitantes a los servicios básicos de agua potable, alcantarillado y saneamiento, además de que se requiere mejorar la infraestructura agrícola para reducir el alto consumo del recurso. De estos conceptos, el de sobreexplotación tal vez sea el más discutido, sin embargo aquí es aplicado en los términos que lo explica Tulipano (2003): "Significa que la extracción de agua subterránea de un acuífero es mayor que cierto límite, que si se sobrepasa, vienen una serie de consecuencias observables. Estas son la depresión del nivel freático y en el caso de acuíferos costeros, la degradación de calidad del agua por intrusión marina".

El conocimiento del modelo hidrogeológico conceptual es la parte más importante de las actividades necesarias para sustentar la administración del agua de un acuífero. Solamente a partir de éste será posible crear modelos de funcionamiento hidrodinámico, proyecciones de la extracción a futuro, y generar políticas de manejo, control y gestión. El conocimiento de la recarga real del acuífero, sin duda, permite hacer un manejo más adecuado del recurso, así como formular planes acordes a las condiciones actuales y buscar la estabilización y conservación del acuífero en el futuro mediano.

Para obtener lo anterior se siguió una serie de métodos de trabajo realizados en varias etapas pero que cumplen con lo descrito por Van Dam (1999):

1.7.1 Recopilación y análisis de estudios previos.

Se obtuvo toda la información útil y necesaria para definir la situación actual del conocimiento geológico, hidrogeológico y geofísico del área de estudio.

Se analizó la información existente del número de aprovechamientos, volúmenes de extracción y piezometría histórica.

Con esta información se estableció el grado de explotación actual, al igual que la distribución de los volúmenes de extracción en los diferentes usos.

Se describió el entorno fisiográfico y se analizó e integró el marco geológico, geomorfológico, climatológico e hidrológico.

Se describió la fisiografía del área de estudio y se explicó la génesis y evolución de sus topoformas.

Se analizaron características climatológicas que incluyen, entre otros aspectos: tipo(s) de clima, precipitación, evaporación y temperaturas medias anuales. La información se utilizó para la cuantificación de volúmenes que participan en el ciclo del agua subterránea, mediante la aplicación de la ecuación de balance.

Se presentan y explican aspectos de hidrología superficial y la interacción que guarda con el agua subterránea.

Se presenta el modelo geomorfológico que define y sustenta el contexto hidrogeológico de la zona de estudio, mediante la determinación de los parámetros geomorfológicos que controlan la dinámica del agua subterránea.

De la información existente se elaboró un modelo geológico que define y sustenta el contexto hidrogeológico que conforma la zona de estudio, y se indica el marco geológico detallado (geometría del subsuelo) con la ayuda de análisis e interpretación de registros eléctricos (potencial espontáneo, resistividad, rayos gama, neutrones, perfiles de isorresistividades, magnetométricos, sismológicos, descripciones litológicas, descripción de muestras de canal, imágenes aéreas y de satélite, etc). Este modelo geológico contiene, entre otros aspectos sobresalientes: unidades litoestratigráficas, ambientes de depósito y un esquema tectónico regional.

1.7.2 Interpretación de la geología del subsuelo con información geofísica y geológica existentes.

Se recopiló información generada entre el año 1999 y 2001 de estudios gravimétricos y geoelectricos complementarios a los contenidos en estudios anteriores, sobre todo en zonas de aportación de agua superficial (áreas potencialmente más importantes de recarga al acuífero). Así, se definió la profundidad del basamento y el espesor de materiales permeables.

Se recopiló información de estudios geofísicos previos y contemporáneos al presente trabajo, tales como levantamientos de gravimetría y resistividad (modalidad de sondeo eléctrico vertical). Éstos generaron secciones transversales de las zonas potenciales de entrada del agua subterránea al acuífero y ayudaron a definir la topografía del basamento cristalino. Con su apoyo se pudo precisar la presencia de antiguos paleocauces y, por ende, las zonas de mayor permeabilidad y flujo que se correlacionaron con la distribución de parámetros hidráulicos.

Se recopiló, verificó e integró el censo de aprovechamientos, hidrometría y piezometría históricos, apoyándose en los paros anuales de bombeo que realiza en los meses de octubre la Gerencia Regional Noroeste de la Comisión Nacional del Agua.

Se llevó a cabo la verificación e integración al censo de aprovechamientos a 200 pozos relocalizados por la vía de Transmisión de Derechos o Asociaciones de Derechos, ubicando ambas posiciones con GPS. De éstos se investigó el número, localización, uso y demás características, los motivos de relocalización, transmisión de derechos, así como de aprovechamientos que históricamente han venido operando bajo el esquema de "bombeo en batería". Asimismo, se evaluaron los volúmenes de extracción de dichos aprovechamientos, direcciones de flujo a partir del análisis potenciométrico tridimensional y nivelación de brocales.

Se cuantificó el volumen de extracción (hidrometría histórica) controlando las condiciones actuales de explotación del agua subterránea para ser incorporadas a la ecuación de balance. Para ello, se utilizó la información de la Gerencia Regional Noroeste y el Distrito de Riego 051. La determinación de estos volúmenes permitió conocer el régimen de explotación de los aprovechamientos y su variación con el tiempo.

La información se procesó y representó en cartografía, tablas y figuras para ilustrar los resultados.

1.7.3 Muestreo y análisis fisicoquímico de muestras de agua.

El muestreo se hizo con base en el censo de aprovechamientos hidráulicos, a partir del cual se seleccionaron los pozos monitores; en cada aprovechamiento se

obtuvieron valores de conductividad eléctrica, pH y temperatura. Los sitios de toma de muestras y sus análisis respectivos estuvieron en función de las características de la zona. Las muestras de agua recolectadas fueron enviadas para su análisis al laboratorio Analítica del Noroeste, certificado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA). Se realizaron análisis fisicoquímicos en dos períodos distintos: a 205 muestras en el año 2000 y a 46 en el 2001 por concentraciones de Ca, Mg, Na, Mn, NO₃, K, HCO₃, Cl, SO₄, CO₃, alcalinidad, dureza, pH, temperatura y conductividad eléctrica, metaloides y metales pesados. Las determinaciones del contenido de sodio y potasio se realizaron por el método de flamometría o por absorción atómica. En la interpretación hidrogeológica se utilizó el software "Aquachem" para clasificar familias de agua por los métodos de Stiff Piper y obtención de índices geoquímicos de Langelier.

Con objeto de identificar las zonas de recarga, tiempos de residencia del agua en el acuífero, direcciones de flujo, estratificación de acuíferos, edades del agua, relaciones entre acuíferos regionales y velocidades de flujo en el sistema acuífero estudiado, se recopilaron estudios previos de hidrología isotópica. Para este estudio se seleccionaron pozos y descargas naturales del acuífero para su análisis por concentraciones de isótopos ambientales: deuterio, oxígeno-18 y carbono-14 radiactivo. El detalle se describe en el capítulo de hidrogeológica.

1.7.4 Definición de parámetros hidráulicos (hidráulica de pozos).

Se determinaron los parámetros hidráulicos para cuantificar las propiedades del subsuelo y su relación con la dinámica del flujo subterráneo (transmisividades, conductividades hidráulicas, almacenamiento específico, rendimientos específicos, etc.). En la ubicación de sitios para ejecución de las pruebas de bombeo o recuperación, se consideró una distribución representativa del área de estudio.

Para la interpretación se utilizó el software Aquitest (Waterloo Hydrogeologic, Inc., 1999) para comparar con los diversos métodos disponibles (Theis, Jacob, Hantush, etc.) y bajo diferentes condiciones. Se aplicó el método geoestadístico para manejar la distribución espacial de los parámetros geohidrológicos como transmisividad, piezometría y coeficiente de almacenamiento.

Se llevaron a cabo 15 pruebas de bombeo de larga duración en etapas de abatimiento y recuperación, bajo el siguiente procedimiento, y se recopilaron 60 existentes:

Se interpretaron los datos de estas pruebas de bombeo con las diferentes metodologías de interpretación tradicionales apropiadas (Theis, Jacob, Hantush, etc.).

Se reinterpretaron los datos de pruebas de bombeo de estudios anteriores con las diferentes metodologías de interpretación señaladas.

1.7.5 Censo de aprovechamientos.

Se revisó el inventario total sobre el número, tipo, características constructivas, dotación, volumétrica de todos los pozos registrados en el Registro de Aprovechamientos de Agua (REPDA) de la Comisión Nacional del Agua y se actualizaron en el campo.

Se cuantificaron volúmenes de extracción (hidrometría), determinando el régimen de explotación de los diferentes aprovechamientos y su variación con el tiempo (invierno vs. verano).

1.7.6 Nivelación de brocales.

Se obtuvo la nivelación de brocales de pozos realizados en el estudio de la UNISON (Monreal y otros, 2000); para ello se empleó la técnica de posicionamiento georreferenciado de estación total (GPS). Con los resultados se elaboró la base cartográfica de datos escala 1:50,000. Con estos datos de nivelación topográfica, se obtuvieron bancos de georreferenciación de apoyo para determinar la posición del nivel estático con respecto al nivel del mar y la evolución de niveles para determinar las áreas drenadas del acuífero, dirección de flujo subterráneo y el cambio de almacenamiento en un período dado.

1.7.7 Modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico.

Se representó el funcionamiento hidrodinámico del sistema de agua subterránea con un modelo que describe condiciones observadas durante el desarrollo de las etapas previas del presente estudio y sus interpretaciones. Esta representación incluye, entre otros aspectos relevantes, la geometría espacial del sistema, condiciones a las fronteras, definición de las unidades hidroestratigráficas y su cuantificación, distribución de cargas hidráulicas y esquema de dirección de flujo y las componentes verticales importantes.

1.7.8 Balance de aguas subterráneas.

Se determinó el volumen de recarga total anual que recibe el acuífero llevando a cabo el balance de aguas subterráneas, definiendo cada una de las componentes que conforman las entradas y salidas de agua y su impacto dentro de la zona de estudio, como: precipitación, recarga natural, escurrimientos, entradas laterales de flujo subterráneo, excedencias por infiltración de aguas de riego, entrada de agua proveniente de intrusión marina, infiltración de descargas de aguas residuales, así como las salidas por los diferentes factores como bombeo, evapotranspiración, flujo base y descarga hacia otras cuencas, acuíferos o el mar.

Se analizaron y determinaron todas las componentes, como entradas horizontales (por flujo subterráneo) y verticales (lluvia, agua residuales de Hermosillo), y se analizaron las zonas de aportación superficial originadas en los ríos Sonora y Bacoachi y en el arroyo La Poza. También se determinó el volumen de agua procedente de la intrusión marina y de la recarga inducida por el riego agrícola en la superficie del Distrito de Riego 051.

En la cuantificación de las salidas se consideraron los volúmenes de extracción por el bombeo de pozos, utilizando el estudio realizado por el Colegio de Posgraduados (1999), y se verificaron los datos tomando lecturas en medidores instalados en las descargas de pozos.

Se llevó a cabo un análisis del comportamiento anual de la evolución de los niveles estáticos de los últimos diez años y se definió explícitamente esta variable.

Se utilizó el trazador natural ión cloruro como método para estimar la recarga por lluvia.

Utilizando el modelo conceptual hidrogeológico obtenido, se integró, con apoyo de un modelador, un modelo de simulación hidrodinámica manejando el paquete informático Visual Modflow 3.1 elaborado por Waterloo Hydrogeologic, Inc. El proceso de modelación se efectuó con la metodología propuesta por Anderson y Woessner (1992), cuyo protocolo consiste en:

- Análisis de la información
- Generación de un modelo conceptual
- Selección del código a utilizar en la simulación
- Diseño del modelo
- Calibración del modelo
- Presentación de resultados
- Análisis de sensibilidad

De igual manera se utilizó el software de Microsoft Excell Solver para crear dos modelos numéricos sencillos, que generan un Índice de Equilibrio y un Índice de Disponibilidad y Uso Sustentable que permiten, bajo diferentes escenarios, conocer la extracción óptima de operación con el primero y realizar las propuestas de manejo de un acuífero intrusionado sometido a bombeo intensivo con el segundo.

2. ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

2.1 El ciclo hidrológico en Sonora

El ciclo hidrológico en Sonora obedece a componentes climatológicos de tipo desértico y semidesértico. De acuerdo con su régimen de precipitación pluvial, las zonas costeras de Sonora se pueden clasificar de clase árida, según el criterio de Bull (1991) (Tabla 2.1).

Clase	Promedio Anual (mm)
Extremadamente árido	< 50
Árido	50 – 250
Semiárido	250 – 500
Subhúmedo	500 – 1000
Húmedo	1000 – 2000
Extremadamente húmedo	> 2000

Tabla 2.1. Clasificación de tipos de climas por promedio anual de precipitación (Bull, 1991).

Considerando las tasas de precipitación, se puede decir que en Sonora es sumamente frágil el equilibrio dinámico del agua; por lo tanto, una extracción intensiva por bombeo fácilmente puede llegar a rebasar los volúmenes de recarga del ciclo hidrológico corto, entendiéndose éste como aquel que se desarrolla en forma estacional y cuyas fluctuaciones pueden ser cíclicas y de carácter multianual.

La disponibilidad de agua en Sonora es baja, con 3,230 m³/hab/año si se toman en cuenta los estándares mundiales de disponibilidad de agua, que establecen tres categorías (CNA, 2004):

- Alta – Superior a 10 mil m³/hab/año
- Media- Entre 5 y 10 mil m³/hab/año
- Baja – Inferior a 5,000 m³/hab/año

En términos nacionales, México tiene una disponibilidad de 4,505 m³/hab/año (CNA, 2004). La categoría baja es una situación crítica, en la cual es necesario tomar medidas urgentes para preservar el recurso (WRI, 2001). En Sonora, al igual que en México, la tendencia de la disponibilidad ha sido a la baja desde 1955, cuando para el país se encontraba en 11,500; en 2001 se colocó en 4,500 y una proyección estima que caerá a 3,500 m³/hab/año en el 2025. Sin embargo, la situación es aún más difícil para Sonora pues hace 10 años se estimaba en 7,200 y se pronostica que caerá a 2,491 m³/hab/año para el año 2025 (CNA, 2004).

Sonora tiene 7 cuencas hidrológicas dentro de sus límites, y el balance anual del agua, equivalente al ciclo hidrológico corto en el Estado, muestra una

alta sensibilidad a los cambios y alteraciones bruscas, lo que motiva que se presenten ciclos tanto de sequía como de inundación, en forma alterna, dada la alteración de diversos fenómenos hidrometeorológicos que generan períodos de lluvias extremas, a la baja y a la alta. Es posible observar tal variación si se realiza el cálculo del promedio anual para el ciclo 1960-1995, que da como resultado 354 mm, o bien se realiza con el período de los últimos 9 años (1996-2004), del que se obtiene un promedio de apenas 316mm, muy por debajo del anterior y que se mostró como un período de sequía en el Estado (CEA, 2004).

En la cuenca del río Sonora, lo común es que los efectos de las sequías recurrentes se dejen sentir en el abastecimiento de agua potable, principalmente en la ciudad de Hermosillo, cuya fuente tradicional había sido la presa Abelardo Rodríguez, la cual desde 1997 ha registrado captaciones casi nulas. De acuerdo con los registros históricos analizados por Montgomery (1998), el fenómeno hidrometeorológico de sequía se presenta con una frecuencia de uno por cada diez años y puede tener una duración que varía de uno a tres años. Siendo así que durante los últimos cincuenta años se han registrado tres períodos críticos de sequías extremadamente severas en el norte del país.

Respecto al cálculo del balance del agua en Sonora, Castillo y Ríos (2004) han propuesto que el volumen precipitado en Sonora es de 72 km³ con una salida a la atmósfera por evaporación y evapotranspiración de 60 km³. Más 9.4 km³ por cauces y vegetación. La recarga a los acuíferos sería de 2.6 km³. Luego de una retención e infiltración superficial de 60 km³ con pérdida en cauces de 9 km³, donde existe un escurrimiento in situ de 12 km³ y un escurrimiento superficial de 3 km³ (Figura 2.1).

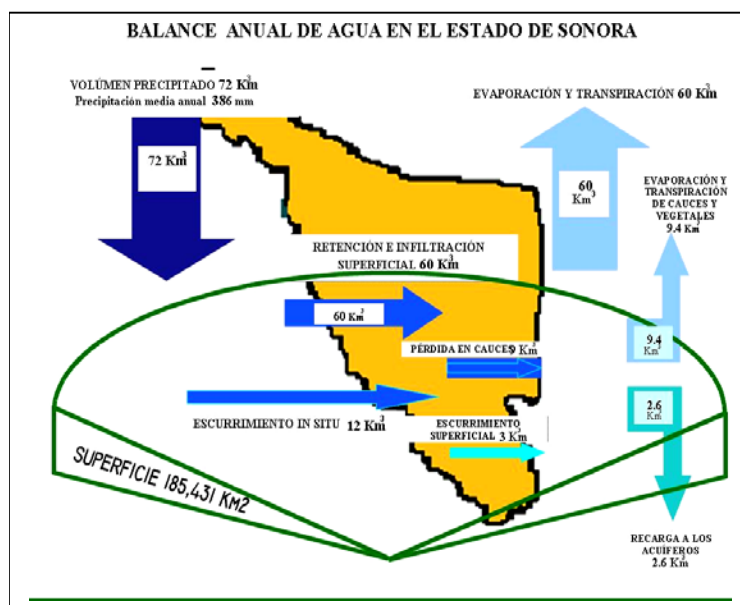


Figura 2.1 Ciclo del agua en Sonora (Modificado de Castillo y Ríos, 2004).

La precipitación media anual para el Estado obtenida por diversos autores puede variar, dependiendo del período y método de cálculo, sin embargo se estima entre 354 mm (CEA, 2004) y 386 mm (Castillo y Ríos, 2004). Por su parte, la cuenca del Río Sonora varía igualmente en cálculos de diversos autores, con valores medios que van de 313.4 mm (Montgomery, 1998) a 374 mm, obtenidos para este trabajo. Los extremos de precipitación se presentan en la parte alta de la cuenca, con 504 mm y hasta 150 mm en la porción costera (Montgomery, 1998).

En el régimen de lluvias se acumula el 84.8% del promedio anual precipitado, con el 62.4% en verano y el 22.4% en invierno.

Igualmente pueden variar, en consecuencia, los volúmenes escurridos, inclusive en forma considerable. Por ejemplo, Montgomery (1998) calcula para la cuenca del río Sonora un volumen medio anual precipitado de 97.8 km^3 y un coeficiente de 2.8%, lo que genera un escurrimiento del orden de 27.3 km^3 . En tanto, basándose en la estadística de las estaciones hidrométricas del río Sonora para el período 1960-1997, en este trabajo se obtuvo un escurrimiento medio de 16.74 km^3 , valor que se considera representativo de las condiciones variantes de un ciclo del agua del semidesierto y que incluye parte de un período húmedo (1984-1995) y uno seco (1996-2004).

Lo anterior se soporta más al analizar las condiciones de las cuencas de los ríos Yaqui y Mayo, al sur de Sonora. En la primera se tiene un volumen medio anual precipitado de 304.3 km^3 y un coeficiente de escurrimiento de 7.9%, lo que da origen a un escurrimiento anual de 32.91 km^3 (Rangel-Medina, 2003), y para la cuenca del Valle del Mayo se tiene un volumen medio anual precipitado de 61.2 km^3 con un coeficiente de escurrimiento de 14.1%, que determinan un flujo de 86.3 km^3 anuales. Ambas obedecen a un clima que varía de subhúmedo a semiseco. Por ello se debe ser muy cuidadoso al utilizar un determinado valor en la evaluación de disponibilidad del agua, puesto que los volúmenes resultantes pueden generar, además de desconfianza, grandes expectativas o un pesimismo escrupuloso.

Para controlar el escurrimiento mencionado, el Estado de Sonora cuenta con una capacidad de almacenamiento en presas de $1,137.5 \text{ km}^3$, el cual cayó a un mínimo histórico del 8% de su capacidad en 2004, luego del período de sequía de 9 años (CEA, 2004). De aquí la importancia y la dependencia del agua subterránea en el Estado, cuya extracción se ha visto incrementada en la última década.

Se estima que en Sonora la extracción es mayor que la recarga con 2.73 km^3 , cuyos mayores usuarios son la agricultura con 78.2% y el uso público urbano con el 16%; el resto se reparte en usos industrial, pecuario, múltiple y servicios domésticos rurales (CEA 2004). Sin embargo, lo que cabe hacer notar es el desequilibrio mencionado y el crecimiento sistemático de la demanda, sobre todo de las principales ciudades (Figura 2.2).

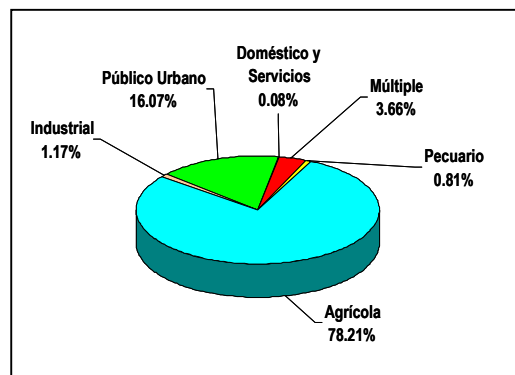


Figura 2.2 Porcentajes de usos del agua subterránea en Sonora (CEA, 2004).

En cuatro de los acuíferos más importantes, existe una sobreconcesión de 1.57 veces y una sobreextracción de 1.94 veces (CEA, 2004). Es decir, se extrae más agua de la concesionada. Esto resulta si consideramos que la recarga es de 62.6 km³, la concesión de 98.2 km³ y la extracción real de 121.7 km³ (CEA, 2004). Situación que se refleja en los descensos constantes de niveles que minan el almacenamiento de los acuíferos de Caborca, río Zanjón, Costa de Hermosillo y Guaymas-Empalme, así como en la fuerte penetración del frente de intrusión marina en los dos últimos.

Por tales motivos, prácticamente el 80% del territorio sonorenses se encuentra bajo el régimen de veda para el alumbramiento de agua subterránea, con excepción de las porciones medias y altas de los ríos Yaqui y Mayo, donde la CNA (2004b) considera que existe un 6% del volumen renovable anual.

2.2 Panorama del uso de agua en la cuenca del río Sonora.

2.2.1 Generalidades.

Políticamente, el Estado de Sonora se divide en 72 municipios (en diciembre de 1996 se crearon los municipios de Benito Juárez y San Ignacio Río Muerto, comisarías que pertenecían a Etchojoa y Guaymas, respectivamente). El área de estudio se localiza en la parte centro-occidental; pertenece a la parte baja de la cuenca hidrológica del río Sonora (9D) y a la mayor parte de la cuenca hidrológica del río Bacoachi (9E). La cuenca del río Sonora tiene una extensión aproximada de 30,863 km², equivalente a un 17% del área total del Estado.

De acuerdo con el Programa de Aprovechamiento Sustentable del Agua 2004-2009 (CNA, 2004), en la región de la cuenca del río Sonora se asienta una población de 620,278 habitantes, de los cuales el 97% se concentra principalmente en los municipios de Hermosillo, Cananea, Ures, Carbó y San Miguel de Horcasitas, mientras que en la región que ocupa la cuenca del río Bacoachi se concentran alrededor de 35,000 habitantes; la población total en la cuenca es de aproximadamente 735,000 habitantes actualmente, aplicando una tasa de crecimiento de 2.5% a la población del año 2000.

La cuenca abarca 19 municipios que son: Cananea, Bacoachi, Arizpe, Cucurpe, Opodepe, Banámichi, Huépac, San Felipe de Jesús, Aconchi, Rayón, Fronteras, Baviácora, Carbó, San Miguel de Horcasitas, Ures, Villa Pesqueira, Mazatán, Pitiquito y Hermosillo, y parcialmente 10: Nacozari, San Pedro de la Cueva, Magdalena, Ímuris, Cumpas, Santa Ana, Benjamín Hill, Moctezuma, La Colorada y Trincheras, dentro de los cuales figuran ciudades y poblaciones importantes, entre ellas la capital, Hermosillo, localizada en el límite entre la cuenca baja y media. La mayoría de las poblaciones se encuentran comunicadas por carretera estatal pavimentada y caminos de terracería, que son transitables en

la mayor parte del año, excepto en épocas de lluvia debido a la creciente de ríos y arroyos.

La administración del agua, a cargo de la Comisión Nacional del Agua (CNA), incluye a prácticamente todo el Estado de Sonora como Región Noroeste, la cual está integrada por la región hidrológica No. 8, Sonora Norte, y la No. 9, Sonora Sur, que suman una superficie hidrológica de 193,362 km². La región No. 8 se ubica en la parte extrema del noroeste del Estado, entre los meridianos 110° 23' y 114° 52' de longitud oeste y los paralelos 28° 57' y 32° 31' de latitud norte. Abarca una superficie hidrológica de 56,177 km² y comprende los desiertos de Sonora y Altar y las cuencas de los ríos Sonoyta y Concepción.



Figura 2.3 Ubicación de la Región Noroeste de la CNA en Sonora y Chihuahua.

La mayor parte de la región No. 9 se ubica en el centro-oeste del Estado de Sonora y el resto pertenece al Estado de Chihuahua, entre los meridianos 106° 48' y 112° 06' de longitud oeste y los paralelos 26°35' y 31°20' de latitud norte. Comprende una superficie de 137,185 km² e incluye las cuencas de los Ríos Sonora, Yaqui y Mayo. De la Región Noroeste, el 29.0% de la superficie está comprendida por la región 8 y el 71.0% corresponde a la región 9 (Figura 2.3)

Por subregiones, el 38.5% de la superficie está comprendida por la del río Yaqui, el 25.5% río Concepción, 24.7% río Sonora (incluyendo la cuenca del Mátape), 7.8% río Mayo y el restante 3.5% por la del río Sonoyta.

En cuanto a la relación de población con las regiones hidrológicas comprendidas en la Región Noroeste, el 15.1% se encuentra localizada en la región 8 y el 84.9% en la región 9. Respecto a las subregiones, el 37.9% de la población se ubica en la del río Yaqui, el 30.5% en la del río Sonora, el 16.5% en la del río Mayo, el 13.3% en la del río Concepción y el restante 1.8% en la del río Sonoyta.

2.2.2 Geografía sonorenses.

2.2.2.1 Orografía.

La Región Noroeste comprende una gran diversidad de tipo de relieve, desde planicies hasta laderas montañosas; varía ampliamente en los intervalos de altura relativa y su topografía se extiende desde los 150 hasta los 2600 m.s.n.m dentro de Sonora, ubicándose el punto más alto en la Sierra de Los Ajos, seguida por una secuencia volcánica de 2400 m.s.n.m, ambas situadas en el N-NE de la región. Se puede observar que presenta tres territorios con diferentes características en su

relieve: a) las zonas accidentadas, b) las semiplanas y c) las planas. El terreno accidentado se localiza en la parte oriental de la región, con alturas que van desde los 1,500 hasta los 3,000 m.s.n.m. ya dentro del Estado de Chihuahua. Las zonas semiplanas se encuentran en la parte central de la región, con alturas que varían entre 900 y 1,500 m.s.n.m. Las zonas planas están en la parte occidental, donde se ubican las planicies costeras y las regiones propicias para la agricultura por riego. Aun así, la mayor parte de la superficie de la Región Noroeste se localiza entre los 200 y los 1,000 m.s.n.m. (Montgomery, 1998).

El rasgo orográfico más destacado de la región es la Sierra Madre Occidental, que corre en sentido noreste-sureste y constituye un límite natural entre los Estados de Sonora y Chihuahua. Esta sierra es, por su extensión, el rasgo orográfico más prominente del país. Su altitud media es cercana a los 2,500 metros y es derivación de erupciones volcánicas predominantemente de un solo tipo. El paisaje de la Sierra Madre lo constituyen grandes mesetas, restos de la gigantesca mesa original, disectadas por barrancas muy profundas y ramificadas, cuyas pendientes forman con frecuencia escalonamientos.

Entre otras elevaciones importantes encontradas dentro de la zona accidentada están las sierras de Álamos, San Bernardino, Ajos, Nacozari y la de Huachinera. Otros sitios que sobresalen topográficamente son la sierra Juan Manuel, de 1650 m.s.n.m., y El Carmen, Cucurpe y El Jucaral, de 1500 m.s.n.m.; además las sierras Las Palomas, Sierra Verde y El Chinito, de 1400 a 1550 m.s.n.m., fácilmente localizables en las zonas centro-este.

Por su parte, la cuenca del río Sonora se puede dividir por su orografía en cuatro regiones principales: partes alta, media y baja, y la cuenca del río Bacoachi. Tiene un relieve muy accidentado y pronunciado, de grandes contrastes, que ocasiona, en muchos casos, cambios de clima, fauna, flora, medios de vida, costumbres, etc. Estas condiciones y las variaciones de las características geológicas locales dan lugar a gran diversidad de recursos naturales, mineros, forestales, agrícolas e hidrológicos (Figura 2.4).

Todo el conjunto de rasgos morfológicos, así como el tipo de drenaje heterogéneo de las cuencas del río Sonora, indican que esta área se encuentra desde un punto de vista geomorfológico en una etapa de juventud y madurez incipiente, si bien su análisis geomorfológico se presenta más adelante.

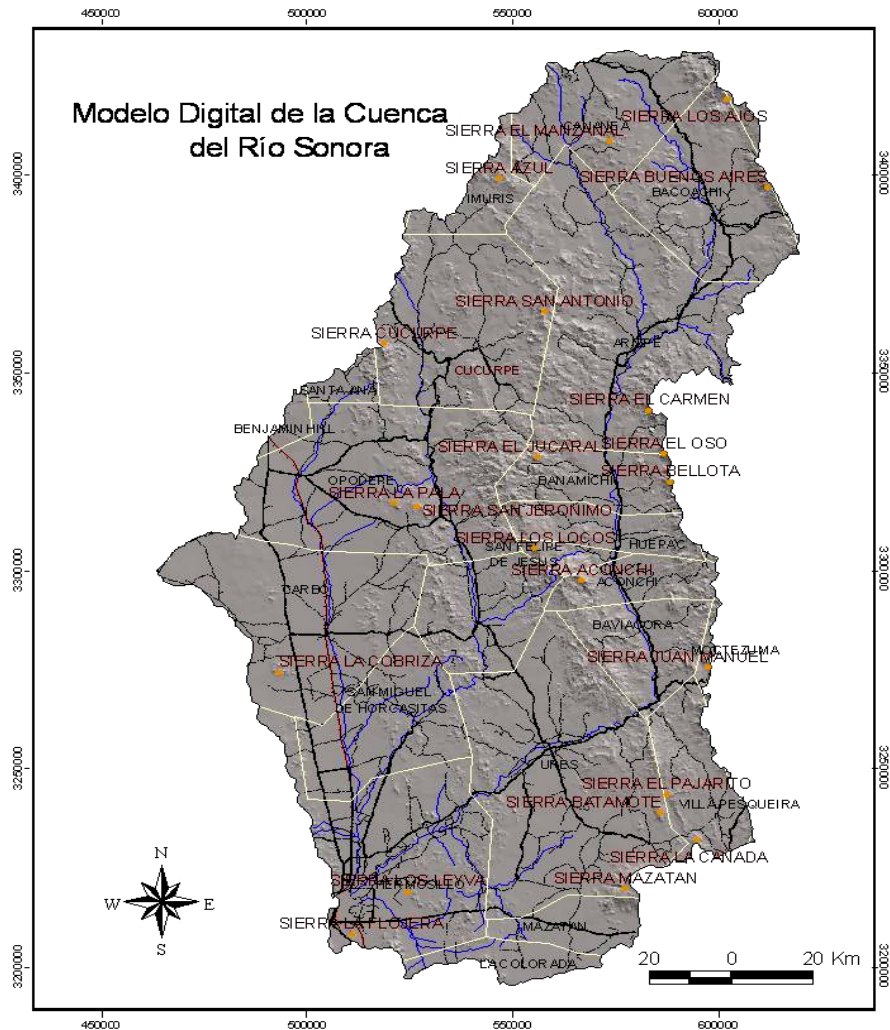


Figura 2.4 Orografía de la cuenca del río Sonora, cuenca alta y media.

Cuenta con grandes extensiones montañosas pertenecientes a la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental, además de una parte del desierto de Sonora y una reducida planicie que se correlaciona con la provincia denominada Faja Costera de Sinaloa. El relieve accidentado es reflejo de la constitución geológica regional y está caracterizado por una serie de sierras y lomas paralelas, con orientación noreste-sur y separadas entre sí por valles angostos en su *parte alta*, mientras que en la *parte media* está constituida por sierras y lomas paralelas separadas por valles más amplios; se considera que las formas del relieve topográfico son el producto de bloques levantados, que constituyen una serie de fosas (*grabens*), orientados de norte a noroeste, que fueron originados por fallas regionales, las cuales definen la territorialidad acuífera con sus rellenos.

En contraste, en la región de la cuenca Bacoachi y Costa de Hermosillo la mayor parte está representada por la planicie aluvial costera con pendientes suaves y sistemas de corrientes intermitentes y fluctuantes en su recorrido, con una pendiente general hacia el suroeste y altitudes de 500 a 0 m.s.n.m. en la parte sur, que corresponde a la llanura aluvial costera, y de 800 a 500 m.s.n.m. en la parte norte, correspondiente a la llanura de carácter intermontano. Las partes altas se manifiestan en la parte norte con la serranía El Jojobal, donde tiene su nacimiento el río Bacoachi, además de las sierras Batepito, Tesota y López con altitudes de hasta 1200 m.s.n.m.; al sur, en la zona de litoral, con cerros de altitud de 500 m.s.n.m. representados por cerro Tordillo en la parte norte y cerro Eucla en la parte sur; la sierra del Bachoco, que representa el límite de las cuencas hidrológicas, está situada en la parte Este con altitudes de 850 m.s.n.m.; en forma dispersa, en la región central se encuentran cerros como Las Cruces, Siete Cerros, La Colorada, Pilares, entre otros, con altitudes de 400 a 750 m.s.n.m. Esta región representa una etapa de madurez a senectud debido a la gran interacción costera y el desfogue de riadas producidas por altas pendientes adentradas al continente.

Las zonas semiplanas están caracterizadas por la presencia de valles entre montañas y sierras; por extensas zonas de lomeríos asociadas a valles y sierras, cuya altura promedio varía entre 200 y 1,200 m.s.n.m., y por llanuras que se distinguen por médanos, valles y pequeñas sierras con elevaciones entre 1,000 y 2,000 m.s.n.m. Las zonas planas incluyen a las regiones desérticas, que se caracterizan por tener campos de dunas y llanuras que no sobresalen de los 200 m.s.n.m., y a las planicies costeras, en las cuales la altitud va desde 0 hasta 150 m.s.n.m.

2.2.3 La geografía y el uso de la tierra.

Los primeros colonos de Sonora, en el siglo XVII, se instalaron a lo largo de los puntos mineros que iban descubriendo, ubicados en las zonas altas y medias de las cuencas; en esas regiones se fundaron las primeras comunidades. Con la diversificación de actividades, otros colonos formaron ranchos ganaderos y se cultivó inicialmente en los bancos aluviales de los ríos. A partir de los primeros años del siglo XX, con el éxito de la agricultura en el Valle del Yaqui desde 1906, la población inició su migración hacia las zonas de las planicies costeras para ya no abandonarlas más. Estos asentamientos forman ahora las principales ciudades del Estado y, con su incremento natural y migratorio, presionan cada vez más por abasto de agua; además se acelera un cambio de uso de suelo que difícilmente pueden sostener las cuencas hidrológicas de la porción norte. Una gran parte de la solución radica en invertir una mayor cantidad de recursos económicos para regenerar cauces ocupados por asentamientos y acuíferos sobrebombados con planes de gestión hídrica sustentables y construir para el abasto obras al ritmo del crecimiento de la población demandante.

Actualmente los usos del suelo se distribuyen de la siguiente manera: De la superficie total de la Región Noroeste, con 20,385,100 hectáreas, el 59.1% corresponde a vegetación como bosques y matorrales en donde se llevan a cabo actividades de extracción de especies silvestres con fines comerciales y artesanales y algo de ganadería extensiva; el 18.2% se usa para ganadería, que incluye pastizales para ganadería extensiva, zonas de ganadería condicionada y zonas donde se realiza ganadería intensiva (granjas avícolas y porcícolas, establos lecheros y corrales de engorda); el 11.7% no tiene uso aparente, incluyendo principalmente las zonas desérticas; el 5.7% ubica los principales yacimientos mineros; el 3.3% tiene uso agrícola, tanto de riego como de temporal; el 1.2% abarca los cuerpos de agua; el 0.4% incluye los principales asentamientos humanos, y el restante 0.4% se utiliza para diversas actividades productivas, tales como industriales, turísticas, de aserraderos y acuacultura.

2.2.4 El uso de los recursos hídricos en Sonora.

En los distritos de la Costa de Hermosillo, Caborca y Valle de Guaymas, las superficies de riego han disminuido paulatinamente por la salinización de los suelos, debido a la degradación de la calidad del agua de los acuíferos por el alto grado de sobreexplotación en el que se encuentran, además de los problemas de intrusión salina; esto nos permite observar que el desarrollo de esta actividad en la región se debe disminuir y fomentar nuevos usos que sean más productivos y que no pongan en peligro tanto la calidad como la disponibilidad del recurso.

La ganadería condicionada se desarrolla en la parte noroeste, mientras que la ganadería intensiva en las cercanías de los grandes distritos de riego del Valle del Mayo, Valle del Yaqui y Costa de Hermosillo. La actividad agrícola se realiza en los distritos de riego; 6 se encuentran ubicados en la zona costera de Sonora y 1 en la sierra de Chihuahua. Esta actividad utiliza cerca del 90% del agua disponible y genera solamente el 8% del Producto Interno Bruto (PIB), además su presión sobre el medio es más fuerte pues la mayoría de los distritos de riego se localizan en áreas semidesérticas, con precipitación media anual menor a 300 mm, con un promedio de eficiencia del 64% que les impide reducir los altos volúmenes utilizados para la producción de los diferentes cultivos.

Precisamente la intrusión marina en la Costa de Hermosillo deja ver que el sector primario, léase la agricultura, ha dejado de ser una actividad productiva para la sociedad sonoreense. Se estima que la agricultura de la Costa de Hermosillo ha utilizado en 50 años (1954 a 2004) 37,000 hm³. Considerando que su agricultura es fundamentalmente de exportación hacia los Estados Unidos de América, significa que los precios del agua subterránea no interesan mucho a los agricultores de alto rendimiento, aun si los niveles de bombeo se encuentran profundos, pues la energía está subsidiada y el agua no se paga, lo que permite continuar con la extracción y, en un sentido estricto, con la exportación de agua barata. La Tabla 2.2 compara los PIB de las principales actividades de Sonora. La

reflexión sobre los números invita a pensar en la reconversión de la industria primaria y su modernización inmediata, a fin de dejar de exportar agua de bajo costo al extranjero e iniciar la restauración del acuífero. Sin esta premisa, cualquier modelo y su aplicación resultarán una quimera y la toma de decisiones será inútil diálogo de sordos, como hasta ahora ha sido con las políticas citadas de los años anteriores.

USO	PIB	DEMANDA DE AGUA	PIB / DEMANDA DE AGUA
ACTIVIDAD	Millones de \$ / año	Hm ³ /año	Costo por m ³
Servicios y Comercio	63	341	0.184
Agrícola	11.9	6,922	0.002
Pecuario	8	53	0.151
Industrial	40.2	27	1.488
Gen. de Energía	0.9	0	----
Pesca y Acuicultura	3.2	0	----
Turismo y Recreación	6.7	1	6.7
Total	133.9	7,344	

Fuente: Tabla elaborada a partir de información recopilada por el OMM, 2004.

Tabla 2.2 Comparación entre el producto interno bruto y la demanda de agua (PIB), la cual muestra que el mayor demandante, la agricultura, tiene el costo más bajo.

3. LA CUENCA DEL RÍO SONORA

3.1 Descripción de la zona de estudio.

El río Sonora nace al sur de la sierra San José, en las inmediaciones de Cananea; corre de norte a sur tocando las poblaciones de Arizpe, Baviácora, Ures y Hermosillo, y su agua es retenida por las presas Félix Valdez (El Molinito) y Abelardo Rodríguez. Antes de ser controlado, el río se perdía antes de desembocar en el Golfo de California, y después de ello, sólo conduce agua hacia la costa cuando se presentan precipitaciones extraordinarias o cuando se han efectuado desfogues de la presa Abelardo L. Rodríguez. El área de la cuenca es de 28,885 km², incluyendo las subcuencas de los ríos San Miguel y Zanjón, tributarios del río Sonora. Si ésta incluye las cuencas de la laguna de San Bartolo y del río Bacoachi, su área es de 39,943 km² (Tabla 3.1)

Por otro lado, la pendiente de la cuenca calculada con el criterio de Horton resultó ser de 0.18%. El río Bacoachi (que cambia su nombre al de arroyo de Noriega en su parte final) vierte sus aguas a la laguna de Noriega.

SUBREGIÓN	TOTAL
Región No. 9 Sonora Sur	Km²
Sub-región 9A Cuenca Río Sonora	39,943
Lag. San Bartolo	3,185
Río Bacoachi	4,919
Río Sonora	28,885
Varias corrientes entre R. Sonora y Mátape	2,954

les de la Región

Con relación a vías de comunicación, Sonora cuenta con varios ejes de vialidad de primer orden. De sur a norte se tiene la carretera federal 15 (México-Nogales), que atraviesa el Estado de Sonora uniendo las principales ciudades de la entidad con el resto del país; de oriente a poniente se tiene la carretera federal 2 (San Luis Río Colorado-Agua Prieta), que entronca con la carretera estatal de Chihuahua (No. 10). La carretera de Cd. Cuauhtémoc, rumbo a Yécora, Sonora, permite a Chihuahua tener una salida directa al mar por carretera.

3.2 Climatología.

3.2.1 Estaciones climatológicas.

Para realizar el análisis de la recarga del sistema acuífero de la Costa de Hermosillo se analizaron 36 estaciones climatológicas, todas ellas administradas por la Comisión Nacional del Agua. Las estaciones fueron seleccionadas buscando identificar aquellas que están involucradas en la recarga hacia el área de estudio. Con este criterio, los datos obtenidos corresponden a las que se encuentran dentro de la cuenca del río Sonora, así como en cuencas colindantes, para detallar las áreas de influencia lo mejor posible. Como resultado de este análisis, se descartaron para el balance aquellas que no muestran influencia en el área de estudio. Los parámetros compilados corresponden a temperatura media mensual (TMM), precipitación media diaria mensual (PM) y evaporación potencial (EP) media diaria mensual.

Los datos generalmente muestran interrupciones en la medición de parámetros en diversas estaciones; la evaporación potencial, en la mayoría de los casos, es deficiente o no existe. La temperatura es el dato con más consistencia en el registro para todas las estaciones. La precipitación presenta en general buenos registros, aunque, igualmente, no es sistemática en todos los casos.

3.2.2 Distribución y variación climática en la cuenca del río Sonora.

Las características generales del clima en la cuenca del río Sonora están dadas por su ubicación latitudinal, la cual corresponde a un cinturón de zonas áridas (franja de los desiertos), distribuido alrededor del mundo, debido al sistema de alta presión que prevalece y que tiene como origen la confluencia de masas de aire frío y tropical, que viene a provocar cielos despejados y amplia exposición solar, efecto que conlleva al incremento de la temperatura, teniendo como resultado una alta evaporación en la zona. Esta condición extratropical o de altas presiones es la que propicia la condición general del clima en la región; sin embargo el panorama climático tiene sus matices, a causa de la influencia local de los componentes (mar, relieve y atmósfera), mismos que propician las variaciones en la precipitación, temperatura y evaporación, dando como resultado la gama climática en la cuenca.

Las lluvias en la Costa de Hermosillo son características de invierno y verano. La primera es frontal, por las masas de aire polar que intrusionan las masas de aire semi-tropical existente. En verano la lluvia es una conjugación de tipo orográfico y por convección y carácter ciclónico (Monzón Mexicano), debido a su posición fisiográfica. Esta lluvia es de gran intensidad, tipo chubasco y corta duración. Con base en la clasificación de climas de Köppen, que utiliza los promedios mensuales de precipitación y temperatura, la denominación climática es BSOhw (X'e'), la cual indica clima seco con lluvias en verano y en invierno, con 85-90% en julio y agosto y el 10-15% en invierno.

Las variables regionales del clima están determinadas, en gran medida, por la influencia de los vientos alisios provenientes del noreste, que hacen un recorrido continental; las nubes van perdiendo humedad al ir chocando contra los elementos orográficos existentes en su trayecto, el último de los cuales es la Sierra Madre

Occidental. Esto provoca que su arribo a las llanuras sonorenses sea carente de humedad; por otro lado, el mar no proporciona humedad suficiente debido a las bajas temperaturas del agua durante el año, por lo que no se obtiene una alta evaporación. En consecuencia, los climas predominantes en la cuenca del río Sonora son de carácter seco y semi-seco; los húmedos y templados están restringidos en las partes altas de las sierras. Su distribución general es:

- a) El clima seco templado se localiza en la porción alta de la cuenca, con temperatura media anual de 17.5 a 19.5 °C y una precipitación media anual de 480 a 520 mm. La evaporación potencial de esta zona varía de 1,300 a 2,000 mm por año y la evapotranspiración real calculada es de 360 a 480 mm por año.
- b) En la parte central de la cuenca es seco semicálido con invierno fresco; tiene una precipitación media de 300 a 480 mm y una temperatura media anual de 19.5 a 22.5 °C. La evapotranspiración potencial obtenida en esta zona varía de 300 a 480 mm por año y la evaporación potencial está entre 1,700 y 2,100 mm por año.
- c) En la zona costera, a partir de Hermosillo hasta Bahía de Kino, el clima es seco muy cálido y cálido. Las temperaturas medias anuales varían de 22 a 24 °C y la precipitación media anual de 140 a 300 mm. La evaporación potencial es mayor a 2,300 mm por año y la evapotranspiración real es menor de 380 mm al año (Figura 3.1).

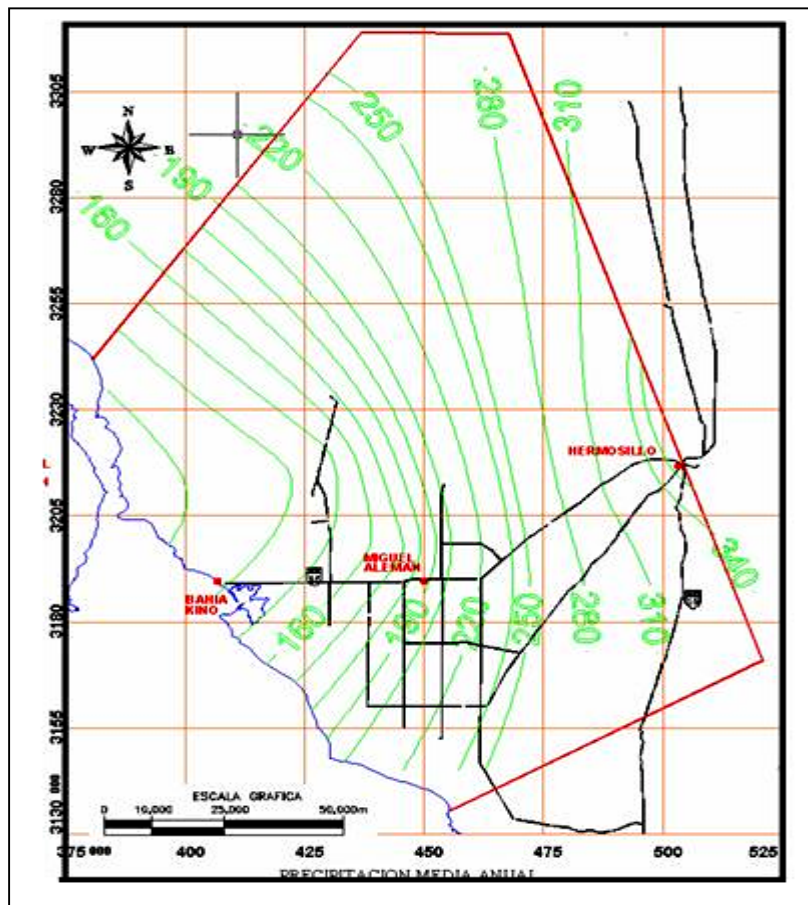


Figura 3.1 Precipitación media anual en la Costa de Hermosillo (1960-1997). Estación climatológica de la Escuela de Agronomía de la Universidad de Sonora. Las isoyetas varían de 120 en Bahía Kino a 340 mm en Hermosillo.

Tabla 3.2. Resumen del análisis climatológico de la cuenca del río Sonora

ESTACIÓN	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD (metros)	TEMPE- RATURA (° C)	PRECIPI- TACIÓN (mm)	EVAPO- RACIÓN (mm)	EVAPOTRANS- PIRACIÓN (mm)	PRECIPITACIÓN EFECTIVA (mm)
ARIZPE	100 10 09	30 20 09	830	19,6	321,76	2155,1	325,68	-3,92
BANÁMICHÍ	110 12 54	30 00 13	640	20,9	454,35	2019,6	448,51	5,84
CAMPO EXP. UNISON	111 07 56	29 00 52	149	23,5	307,7	2218,6	317,35	-9,65
CARBÓ	110 57 50	29 41 50	464	21,9	367,6	2161,2	372,91	-5,31
EL CARRIZAL	111 44 00	29 05 31	49	21,4	144,9	2657	151,73	-6,83
ESTACIÓN TORES	110 46 10	28 46 02	240	21,4	343,4		349,18	-5,78
EL ORÉGANO	110 42 22	29 13 47	272	23,7	401,2	2112,5	408,14	-6,94
HERMOSILLO	110 57 33	21 04 23	200	24,7	354,6	2596,3	364,77	-10,17
MARÍA DEL CARMEN	111 33 18	28 54 13	54	23,2	168,9	2715,7	176,80	-7,90
MAZOCAHUI	110 07 10	29 32 27	492	20,9	533,1	1560,1	514,47	18,63
PITQUITO	112 07 00	30 41 52	300	21,8	270,9	2363,1	279,49	-8,59
RAYÓN	110 34 14	29 42 38	560	21,4	454,4	1968,2	450,45	3,95
SAN ISIDRO	111 39 17	28 49 52	30	22,46	163,4	2058,7	171,00	-7,60
STA ROSALÍA	110 28 58	29 07 30	355	14	340		326,18	13,82
SINOQUIPE	110 14 42	30 09 20	740	21,7	460,7		457,09	3,61
TOPAHUE	110 30 09	29 16 15	300	22,5	441,8		442,87	-1,07
URES	109 32 28	31 19 37	370	22	377,4	1620,4	382,30	-4,90
ZAMORITA	110 52 28	29 19 16	251	22,5	426,3	2245,3	428,75	-2,45
BACANUCHI	110 14 19	30 35 56	640	17,6	525	1895,6	485,61	39,39
BACOACHI	109 58 08	30 38 03	1040	17	440,3		418,61	21,69
BENJAMÍN HILL	111 06 53	30 10 12		21,6	301	1387,4	308,79	-7,79
CUCURPE	110 42 22	30 19 50	860	19,9	523,3	1727,7	500,57	22,73
EL CAJÓN	110 41 11	29 28 20	390	21,9	454,7	2244,3	452,50	2,20
EL CLARO	111 12 22	30 27 07	640	22	348,8	1222,1	355,32	-6,52
HUÉPAC	110 40 30	30 01 50	700	19,7	525,7	1150,9	501,18	24,52
MÁTAPE	109 57 58	29 06 50	745		496,3	1127,8		
MAZATÁN	110 08 16	29 00 13	540	21,4	535,1		518,98	16,12
MERESICHIC	110 40 30	30 01 50	700	19,7	548,5	1747,3	518,75	29,75
PESQUEIRA	110 53 46	29 22 49	327	21,6	372	1807,6	376,43	-4,43
PTO. LIBERTAD	112 40 40	29 54 12	7	20,5	121,3	1996,7	127,19	-5,89
PUNTA DE AGUA	110 23 34	28 25 59	245	23,8	479,6	2301	481,18	-1,58
QUEROBABI	110 01 17	30 03 02	655	21,2	412,3	2376,9	412,38	-0,08
RANCHO AQUITUNI	110 42 15	30 28 22	950	18,8	533,2		500,70	32,50
RANCHO	110 18 53	29 07 36	450	21,1	470,6		463,33	7,27

VIEJO								
SAN JOSÉ DE PIMAS	110 20 54	28 42 48	340	22,7	431,7		434,24	-2,54
SANTANA	111 06 59	30 32 27	700	21,2	397	2046,1	398,53	-1,53

3.2.3 Evapotranspiración real y zonas potenciales de recarga.

Para el cálculo de la evapotranspiración se ensayaron dos métodos, el de **Thornthwaite** y el de **Turc**. Este último mostró mejor representatividad para el ambiente semidesértico del área de estudio; por ejemplo, en la cuenca baja, los valores comparados con los generados por el INIFAP resultan muy cercanos. La distribución geográfica de los valores muestra una evapotranspiración real mayor en las áreas cercanas a la cuenca alta y media, sobre las sierras, y menores en la porción costera de la cuenca, entre 100 y 450 mm por año. Sin embargo, las primeras constituyen las principales zonas de recarga (Fig. 3.2).



Figura 3.2 Ubicación de las principales zonas de recarga en la cuenca del río Sonora, basado en su balance hidrometeorológico.

3.3 Hidrología de la cuenca.

3.3.1 Hidrografía.

La región de la Costa de Hermosillo se encuentra dentro de las cuencas río Sonora (cuenca D) y río Bacoachi (cuenca E), localizadas en la porción centro septentrional del Estado de Sonora, región hidrológica RH-9 de INEGI. La cuenca río Sonora tiene pendientes que varían de fuerte, en el extremo norte, a baja, en el suroeste. Uno de los rasgos más característicos en la cuenca es una serie de morfoestructuras, con orientación preferente norte-sur, separadas por valles cortos, las cuales están constituidas de rocas ígneas y sedimentarias, principalmente.

El rasgo hidrográfico más notable es el río Sonora, que se origina en la sierra de Cananea, con orientación norte-sur hasta el poblado de Mazocahui, en donde cambia bruscamente de dirección hacia el suroeste, hasta verter sus aguas en la presa Rodolfo

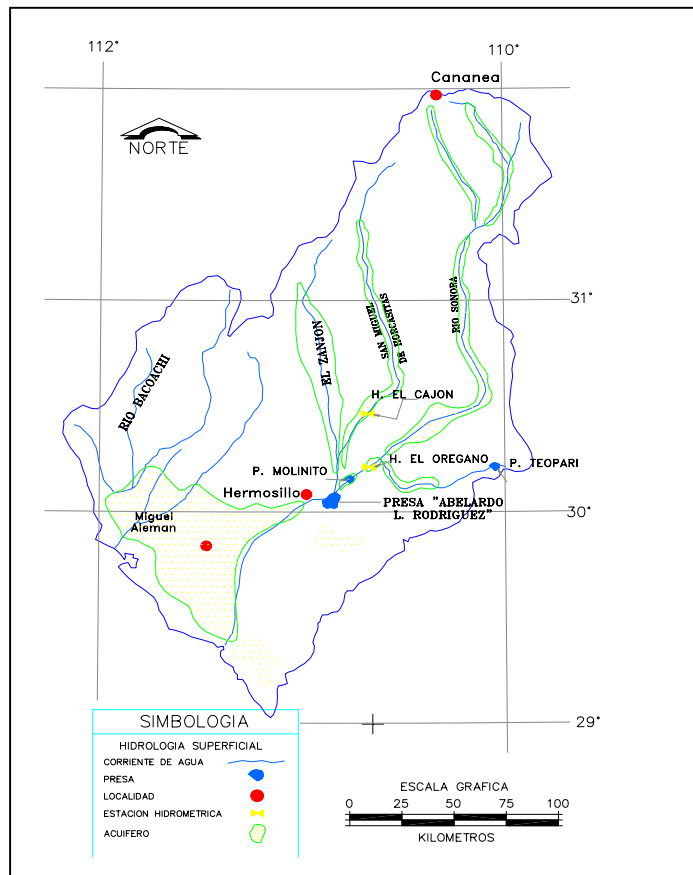
Félix Valdez (El Molinito). Esta presa controla las avenidas provenientes de las partes altas y después son drenadas hacia la presa Abelardo L. Rodríguez. La longitud del río hasta este punto es de 294 km, y es ahí donde el río San Miguel se le une por su margen derecha (Figura 3.3).

El río San Miguel de Horcasitas nace al norte de la población de Cucurpe; tiene una longitud de 166 km, una pendiente media de 0.77% y una orientación norte-sur hasta las cercanías de Rayón, donde cambia al suroeste hasta la ciudad de Hermosillo; el afluente de mayor relevancia es el río Zanjón, captado por la margen derecha. En la porción central de la cuenca se tiene el río Zanjón, que se origina en la sierra Cucurpe, con dirección general norte-sur, y a la altura de la localidad de Zamora capta por la margen izquierda al río San Miguel de Horcasitas, que es el tributario principal.

La parte baja de la cuenca del río Sonora, donde se localiza el área de estudio, fue drenada por un sistema de arroyos que han dejado marcas de drenaje con dirección noreste-suroeste, siguiendo el patrón topográfico de la planicie deltáica (Figura 3.3).

La cuenca del río Bacoachi tiene un área de 12,733 km²; presenta una pendiente relativamente baja. El principal escurrimiento de esta cuenca lo constituye el arroyo Bacoachi, que se origina en el flanco sur de la sierra Jojoval, desde donde cubre una distancia de 112 km, hasta que su cauce desaparece poco antes de llegar a la costa, cerca de la playa San Bartolo. A lo largo de su recorrido, esta corriente mantiene una pendiente media de 0.71% y una orientación preferencial norte-sur con cambios al suroeste en la parte final de su trayectoria, y no tiene tributarios importantes.

Bacoachi es una pequeña cuenca subsidiaria del río Sonora con un área equivalente al 17% del tamaño del sistema y un flujo medio anual estimado de 38 hm³, de los cuales se infiltra del orden del 40% al subsuelo.



INEGI/GES, Estudio Hidrológico del Estado de Sonora, 1993

Figura 3.3 Hidrografía de la cuenca del río Sonora, mostrando la zona de mayor bombeo en el acuífero de la Costa de Hermosillo (CNA, 2004).

La cuenca tiene una precipitación media anual de 207 mm y una pendiente general baja. No obstante, los escurrimientos anuales reportados por la estación Canal Principal dan muestra de su importancia como parte de la recarga al acuífero de la Costa de Hermosillo. Durante el período de 1947 a 1985 el promedio anual fue de 59.4 hm³ con variaciones desde 2.9 hasta 134 hm³/año. Los años que presentaron mayores escurrimientos, superiores a los 120 hm³/año, fueron 1953, 1955 y 1984. Los años con menor escurrimiento, muy por debajo de los 20 hm³/año, ocurrieron en el período de 1973-1977 y en 1982. Como acuífero, este junto con El Sahuaral y la Costa de Hermosillo comprenden la zona de explotación de agua subterránea de la cuenca baja del río Sonora.

3.3.2 Hidrometría de la cuenca.

La ocurrencia de lluvia en Sonora condiciona que buena parte del año no haya escurrimiento y cuando exista sea torrencial y a gran escala. Dentro de la cuenca del río Sonora hay dos estaciones hidrométricas: El Orégano y El Cajón. La estación El Orégano se ubica a 28 km aguas arriba del vaso de la presa Abelardo Rodríguez, sobre el río Sonora; El Cajón está 30 km al norte de la misma presa, sobre el río San Miguel de Horcasitas. La cuenca cuenta con dos presas para almacenar y controlar sus avenidas: la Abelardo Rodríguez y la Rodolfo Félix Valdez. El volumen máximo escurrido en el período de análisis de 1960-1997 se presentó en 1984, con 489.46 hm³, y el mínimo en el año de 1973 con 22.79 hm³. El escurrimiento medio fue de 167.38 hm³.

Además de las entradas por escurrimiento, la presa Abelardo Rodríguez registra entradas por lluvias. El valor más elevado corresponde al año de 1990 y el mínimo a 1962, con 16.51 y 1.95 hm³, respectivamente. La entrada media por precipitación, para el período 1960-1997, es de 6.57 hm³. A partir de 1995 el escurrimiento bajó y llegó a cero en octubre de 1998 (Figura 3.4).

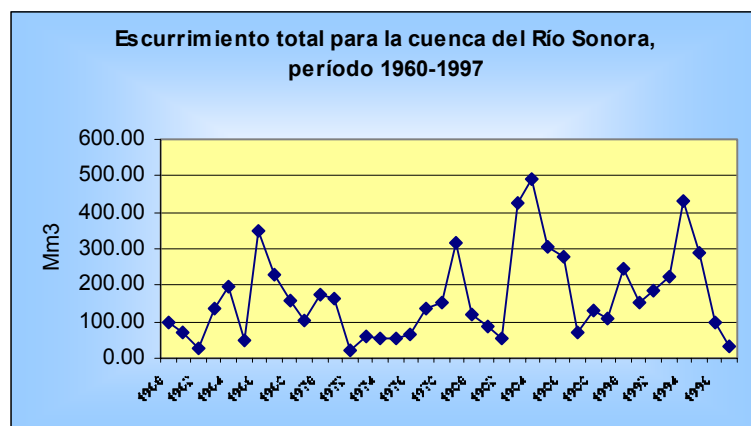


Figura 3.4 Escurrimiento total para la cuenca del Río Sonora, período 1960-1997.

Las salidas de la presa son parte importante para el sistema, ya que son factores de recarga al acuífero Costa de Hermosillo, y el escurrimiento sostiene en gran medida la entrada vertical a los acuíferos del valle del río Sonora, a través de su subálveo.

La presa desde el año 1960 ha tenido un escurrimiento total acumulado de 6,360 hm³ y logró almacenar un volumen de 4,459 hm³. Si bien la diferencia constituye derrames, filtraciones (se refiere al agua que pasa bajo la cortina de la presa que es de tipo flotante) y tomas por consumos, éstos han sido mínimos comparados con las pérdidas por evaporación, que representan 1,600 hm³, un promedio de 43 hm³ de pérdida por año, o el 36% del almacenamiento (Tabla 3.3; Figuras 3.5 y 3.6).

De aquí que sea fácil entender que al no haber escurrimiento regular desde hace una década, la extracción por bombeo en el valle (acuíferos río Sonora y Mesa del Seri-La Victoria) fácilmente se rebasaron los índices de recarga vertical con graves consecuencias hidrodinámicas por el drenado del acuífero, generándose un grave desequilibrio.

PRESA ABELARDO RODRÍGUEZ LUJÁN (hectómetros cúbicos)									
Almacena- miento	ENTRADAS		SALIDAS				Entradas - Salidas	Almac + Entradas	
	Escurrimiento	Entrada lluvia	Evapora- ción	Tomas	Filtraciones	Desfo- gues			Derra- mes
4,459	6,360	249.5	1600	2,208	14,.8	3,1	412.	2,122	11,068,5

Tabla 3.3 Régimen hidrológico de la presa Abelardo Rodríguez Luján (1960-1997).

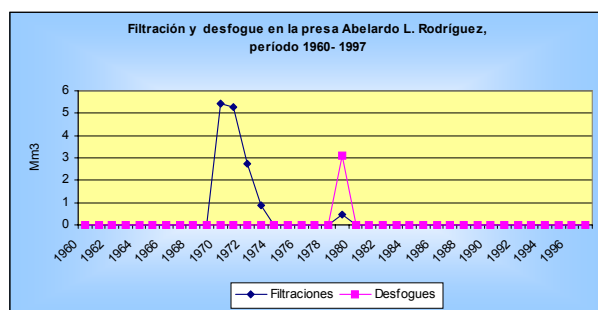


Figura 3.5 Filtraciones en la presa Abelardo Rodríguez L., durante el período 1960-1997.

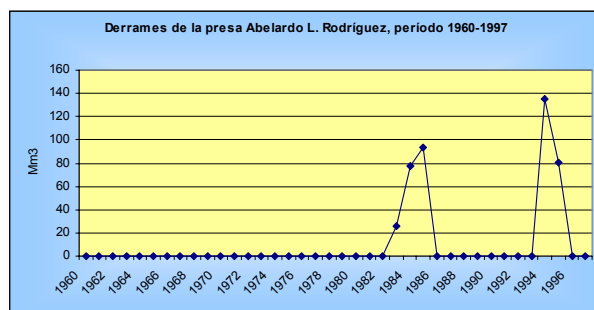


Figura 3.6 Derrames de la presa Abelardo Rodríguez, L., durante el período 1960-1997.

La evaporación se considera, por lo tanto, el factor de pérdida más importante. Durante este período, alcanzó su máxima en 1995 con 98.5 hm³ y la mínima en el año 1961 con 16.52 hm³. Los datos de los últimos años dan la impresión de que la evaporación se ha ido incrementando con el tiempo. Sin embargo, la observación a largo plazo sugiere la probabilidad de una ciclicidad, cuyo período de menor evaporación, por debajo de los 40 hm³, fue de 1980 a 1996. Finalmente, la evaporación media para el período de análisis 1960-1997 fue de 42.11 hm³ (Figura 3.7).

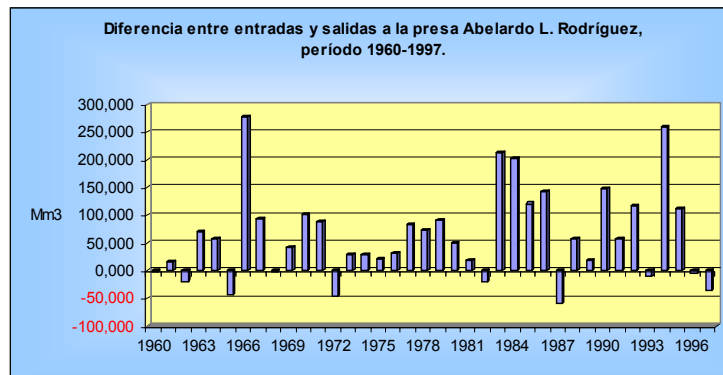


Figura 3.7 Diferencia entre entradas y salidas de la presa Abelardo Rodríguez durante el período 1960-1997.

3.4 Fisiografía y geomorfología.

Para la región del noroeste es común que se encuentren diferentes denominaciones para el área; sin embargo, por su sencillez y principalmente por la calidad de la descripción, se utilizó la clasificación de Lugo Hubp (1990) y Lugo Hubp & Córdova Fernández (1990a), pues se considera la más actualizada e indicada para expresar la clasificación en escala regional. Con esta nomenclatura fisiográfica se observa que prácticamente toda la cuenca del río Sonora se encuentra dentro de la Provincia de Sonora, salvo su extremo noreste, el cual forma parte de la Provincia de la Sierra Madre Occidental.

3.4.1 Provincias fisiográficas de Sonora.

Con base en las subdivisiones de los trabajos citados, el área de estudio se encuentra localizada en la *Provincia de "Planicie aluvial de piemonte, con elevaciones menores (planicie acumulativa marginal, aluvial y de piemonte)*.

La clasificación de Lugo Hubp (1990) comprende cinco subdivisiones fisiográficas de la Provincia de Sonora, e indica en su texto que reconoce cuatro; posteriormente en su mapa, Rasgos del Relieve de la Provincia de Sonora (1990a), aparecen las cinco citadas pero con diferente nombre. La nomenclatura para estas cinco unidades es:

- 1) Desierto de Altar (Planicie desértica).
- 2) Planicie aluvial y de piedemonte, con elevaciones menores (Planicie acumulativa marginal, aluvial y de piedemonte).
- 3) Las cadenas montañosas de bloque, transicionales de la Sierra Madre Occidental (Elevaciones montañosas residuales y de bloque).
- 4) El campo volcánico cuaternario El Pinacate (Campo volcánico cuaternario El Pinacate).
- 5) Valles intermontanos.

El primer nombre corresponde al texto y el que aparece entre paréntesis concierne a la nomenclatura en el mapa.

3.4.2 Fisiografía de la cuenca del río Sonora.

A la propuesta de Lugo Hubp (1990) se agregaron dos subdivisiones que detallan más la fisiografía de la cuenca (Lugo Hubp & Córdova Fernández, 1990a). Con base en ellas se obtuvo un mapa de rasgos estructurales principales de la cuenca hidrográfica, utilizando la clasificación de rasgos fisiográficos y sobreponiendo a éste la base topográfica; esto modificó algunos trazos y las formas de relieve de la Sierra Madre Occidental (Rangel, 1996). Como resultado quedó la clasificación siguiente (Figura 3.8):

- 1) Montañas de bloques residuales pre-terciarios e intrusivos terciarios (pilares de "Basin and Range" sonorenses).
- 2) Superficie de piamonte de acumulación proluvial.
- 3) Elevaciones montañosas riolíticas.
- 4) Planicie acumulativa marginal, aluvial, eólica y de piamonte.
- 5) Elevaciones plegadas o de bloque con cubierta volcánica del neógeno-cuaternario.
- 6) Valles intermontanos (valles de "Basin and Range" sonorenses).
- 7) Planicies acumulativas y erosivas con elevaciones montañosas de rocas volcánicas.

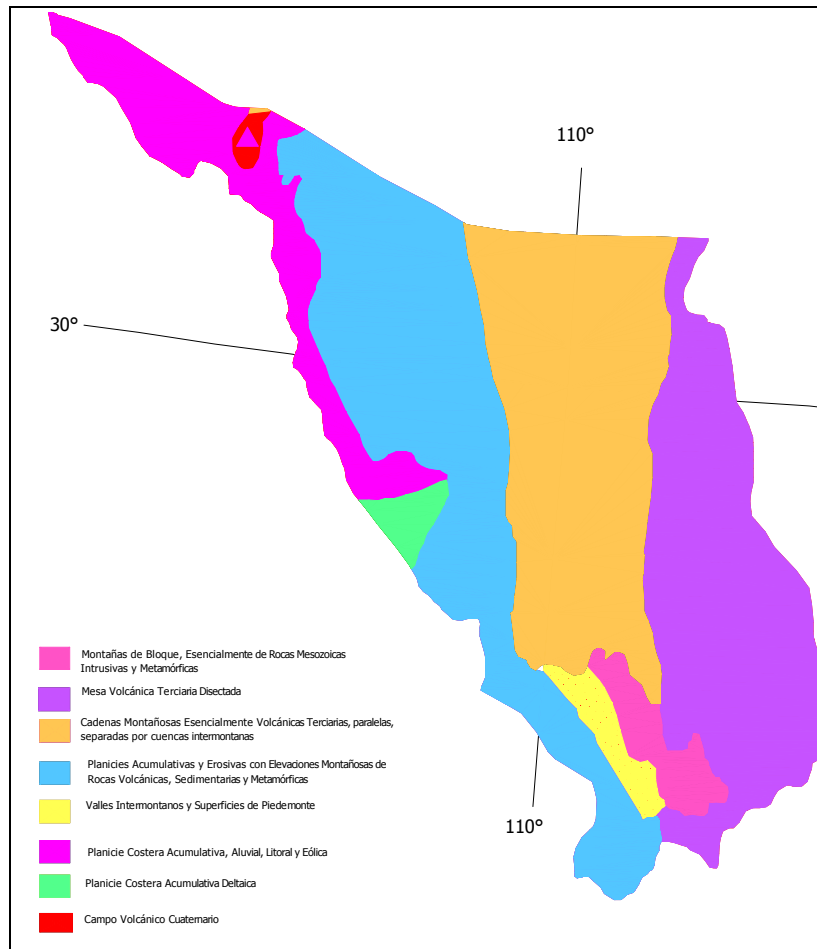


Figura 3.8 Provincias fisiográficas del norte de Sonora (Modificado de Lugo Hubp y Córdova Fernández, 1990).

Las unidades fisiográficas 1 y 6 corresponden propiamente a la provincia "Basin and Range" norteamericano. Por su parte, la unidad 3, *Elevaciones montañosas riolíticas*, es la región fronteriza occidental de la Sierra Madre Occidental, la cual, en pequeña porción, forma parte de la cuenca, pero sobre todo constituye el extremo NE de esa vertiente del río Sonora. Las formas de relieve en dicha región son barrancas, riscos, paredones y cañones profundos con tendencia hacia el norte y el noroeste. Las elevaciones de sus montañas varían de 1,000 a 2,000 m.s.n.m.

La unidad 4, *Planicie acumulativa marginal, aluvial, eólica y de piamonte*, constituye la parte baja de la cuenca, entre la unión de los ríos San Miguel y Sonora, hasta la línea de costa. Ésta correspondería a la subprovincia de Sierras y Llanuras Sonorenses de Raisz (1959), clasificación que resulta generalizada ya que la denominación actual es descriptiva de los elementos que la constituyen. En apariencia, podría abarcar a la unidad 7, *Planicies acumulativas y erosivas con elevaciones montañosas de rocas volcánicas*, que la limita al sur, dado que también alberga algunas pequeñas cadenas montañosas o montañas islas (inselbergs); sin embargo, la diferencia resulta en que la unidad 4 contiene el rasgo fisiográfico producto de la deposición de los

sedimentos acumulados por el río Sonora desde Hermosillo hasta la costa. En ambas unidades (4 y 7), el relieve consiste de una planicie con sedimentos aluviales, de piamonte y eólicos interrumpidos por conjuntos de 'inselbergs' que presentan superficies residuales con laderas empinadas y en proceso de destrucción por movimientos de gravedad favorecidos por su pendiente y la meteorización física (Lugo Hubp, 1990).

La quinta unidad, *Elevaciones plegadas o de bloque con cubierta volcánica del neógeno-cuaternario*, constituye la parte central y las elevaciones máximas dentro de la cuenca del río Sonora, así como su parte aguas noroeste. En ella se encuentran las cadenas montañosas de mayores dimensiones, todas orientadas al norte y noroeste; sus elevaciones varían de 1,500 a 2,510 m.s.n.m.

3.4.3 Análisis geomorfológico de la cuenca del río Sonora.

De acuerdo con la carta de Unidades Geomorfológicas de México (Lugo et al., 1990), el área de estudio se encuentra localizada dentro de la Provincia de Sierras Sepultadas de Sonora, la Provincia de Sierras y Valles y la Provincia de la Sierra Madre Occidental; dentro de ésta, en las Subprovincias de Planicies y Montañas residuales y de las Sierras Volcánicas Paralelas.

3.4.3.1 Hidrogeomorfología.

Gran parte de la morfología que se presenta en esta cuenca es producto de patrones geológico estructurales resultantes de la tectónica compresiva y distensiva que han sufrido las rocas a lo largo de su historia geológica, de aquí que la mayoría de los cambios bruscos en la dirección de los principales corrientes de la cuenca se deben a grandes estructuras geológicas (fallas y fracturas) que siguen los ríos como zonas de debilidad. Estructuralmente la cuenca del río Sonora presenta el patrón regional del sistema de fajas paralelas en dirección general NW-SE, el cual corresponde al tipo "Basin and Range" de fosas y pilares (horst-graven) (Rangel, 1996).

El análisis hidrográfico de la cuenca permite identificar las áreas actuales de captación, inundación y denudación, todas ellas resultantes de los procesos geológicos a los que han sido sometidas las rocas desde su formación.

En la cuenca del río Sonora se identifican, de esta forma, tres componentes geomorfológicos de drenaje, a saber (Rangel, 1996) (Figura 3.9):

- 1) Cuenca Alta
- 2) Cuenca Media
- 3) Cuenca Baja

En las dos primeras, los drenajes obedecen preferentemente, para su circulación, a patrones tectónicos-estructurales, mientras que en la parte baja, cuando se permite el escurrimiento controlado, las corrientes escurren siguiendo la pendiente de la planicie. Las marcas de drenaje de la cuenca del río Sonora son principalmente de tipo

subsecuente y consecuente; el primero predomina en las cuencas Alta y Media, con un sistema de drenaje rectangular en la Cuenca Alta y enrejado en la Cuenca Media.

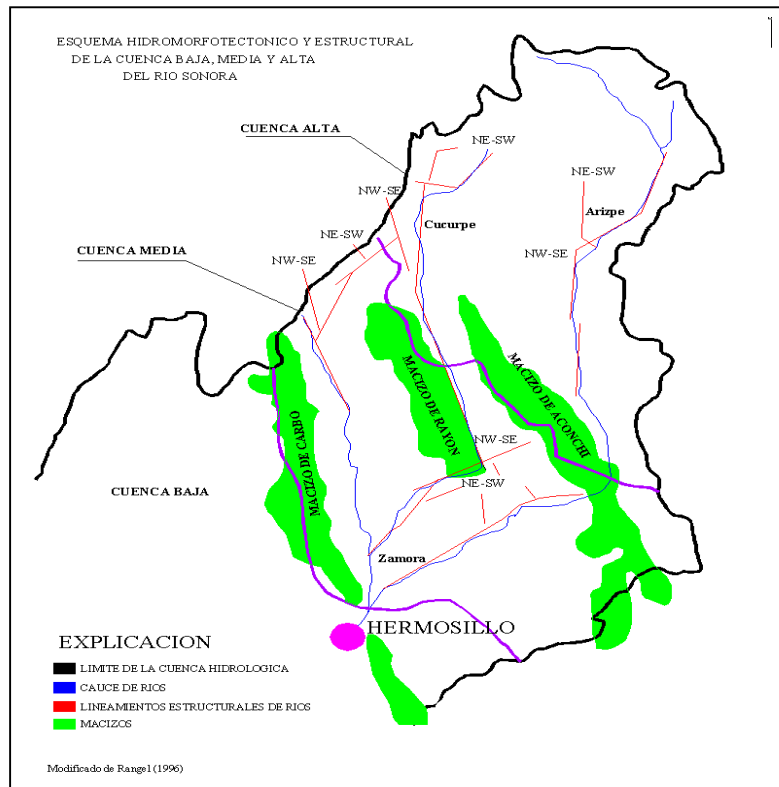


Figura 3.9 Esquema hidromorfotectónico de la parte central de Sonora que muestra la forma en cómo éste define las cuencas Alta, Media y Baja (Rangel, 1996).

La *Cuenca Alta* se ubica desde el extremo norte, en el intervalo que va de la altura máxima de 2,500 m.s.n.m en la sierra de Cananea, a los 1,000 m.s.n.m en Mazocahui. En esta parte, la cuenca es drenada por el río Sonora en sentido N-S, desde su nacimiento en la sierra Buenos Aires hasta el poblado de Mazocahui, donde cambia bruscamente su dirección al SW; hasta aquí, el río presenta una etapa de juventud-madura (según el concepto de Davis). En este tramo, el cauce recibe en las inmediaciones del poblado de Arizpe al arroyo Bacanuchi, y aguas abajo en las cercanías del poblado de Sinoquipe, se integra al sistema de drenaje intermitente de la vertiente Este el arroyo Palmillal, que recibe corrientes de la sierras San Antonio, Los Hornitos y Aconchi por el oeste, y de las sierras El Carmen y La Bellota por el Este (Rangel, 1996).

La Cuenca Alta del río Sonora tiene las siguientes características geomorfológicas: a) el río Sonora, entre las localidades de Arizpe y Mazocahui, tiene una dirección N-NW/SSE; b) el cauce del río San Miguel entre La Colorada (al sur de Rayón) y el rancho El Carrizal (al norte de Cucurpe), sigue una dirección NW-SE.

La *Cuenca Media* tiene su punto más alto en la sierra de Cucurpe (1,750 m.s.n.m.) y el más bajo en su extremo sur en la Mesa del Seri, al noreste de la ciudad de Hermosillo. Esta cuenca es drenada por el propio río Sonora en dirección noreste-

suroeste, que recibe al sistema de drenaje intermitente de las sierras El Pajarito y Mazatán por el Este, hasta terminar en la confluencia con el río Zanjón. Este río drena de norte a sur desde su nacimiento al oeste de la Sierra de Cucurpe y recibe los drenajes de las vertientes oeste de las sierras Cucurpe y Aconchi. Entre los más importantes se encuentran El Zanjón, Punta de Agua y río San Miguel de Horcasitas, que nace en la vertiente Este de la Sierra de Cucurpe. Estos ríos se encuentran en una etapa de madurez temprana (Rangel, 1996).

En la Cuenca Media, los ríos Sonora y San Miguel cambian su dirección hacia el suroeste. El río Zanjón entre Querobabi y su unión con el río Sonora, mantiene una dirección N-NW. Además, las tres corrientes antes mencionadas tienen una dirección claramente definida NW-SE, y el Sonora y San Miguel adoptan bruscamente el sistema de componentes estructurales en dirección NE-SW hasta su unión con el río Zanjón, próximo a su entrada a la parte baja de la cuenca.

La *Cuenca Baja* tiene su máxima elevación topográfica (1,080 m.s.n.m.) en un lugar próximo al nacimiento del río Bacoachi, y el más bajo es el nivel del mar. Esta cuenca es drenada por un sistema de arroyos consecuentes intermitentes, que han dejado marcas de drenaje orientadas noreste-suroeste, siguiendo el patrón topográfico de la planicie deltáica. El sistema lo compone el río Bacoachi por el oeste, el cual tiene su nacimiento en la sierra de Santa Rosa y descarga en la playa San Bartolo; otros arroyos son Pozo Nuevo, Los Pápagos-La Manga, y La Bandera en el extremo sur de la Cuenca Baja, que nace en la Sierra Libre y descarga en el estero de Tastiota. Todos estos arroyos son de escurrimiento temporal; cuando éste se presenta, fluyen sin alcanzar sus cauces superficialmente al mar, siendo éste un paisaje representativo de madurez tardía. Además, las marcas de drenaje son de tipo consecuente, producto únicamente de la topografía circundante (Rangel, 1996).

En la Cuenca Baja los afloramientos están cortados y sepultados por el relleno sedimentario de la planicie aluvial del río Sonora; sin embargo, tanto al norte como al sur de ésta se observa la continuidad del sistema estructural orientado NW-SE descrita por Coletta et al. (1982).

3.4.3.2 Análisis geomorfo-estructural de la cuenca.

Gran parte de la morfología de la cuenca es producto de patrones geológico-estructurales resultantes de la tectónica compresiva y distensiva que han sufrido las rocas a lo largo de su historia geológica. Las grandes estructuras geológicas (fallas y fracturas) son las responsables de la mayoría de los cambios bruscos en la dirección de las principales corrientes de la cuenca, ya que los ríos siguen las zonas de debilidad (Rangel, 1996).

En la Cuenca Alta el sistema de drenaje adoptado por las corrientes toma giros en ángulos casi rectos, como resultado de juntas y fallas en la zona granítica del batolito

de Aconchi, el cual en su mayoría ha sido puesto en contacto por falla con rocas clásticas terciarias; fallas de carácter y extensión regional como la Falla Agua Caliente que se extiende por 50 km por el flanco Este de la sierra El Jaralito (Roldán-Quintana, 1991) y/o bien producidas por la foliación en rocas metamórficas afectadas por la misma intrusión. En la Cuenca Media el drenaje enrejado es producto de afloramiento de distintos tipos rocas, de débiles a resistentes que forman fajas casi paralelas.

Estructuralmente la cuenca del río Sonora presenta como patrón regional un sistema de fallas paralelas en dirección general NW-SE, el cual corresponde al tipo Basin and Range sonoreño (cuencas y sierras de Cserna, 1988).

3.4.3.3 Perfil hidráulico del río Sonora.

En el perfil hidráulico del río Sonora se puede observar que prácticamente existen 3 cambios de pendiente que definen su patrón fisiográfico (Figura 3.10). Los primeros 10 km del recorrido del río se caracterizan por circular sobre una pendiente muy fuerte; el cambio de nivel se define entre los límites hipsográficos 2,500 y 1,500 m.s.n.m.; en este tramo el coeficiente de escurrimiento es del 10 al 20% (INEGI, 1984). En los siguientes 90 km la pendiente es moderada hasta el poblado de Buenavista; el coeficiente de escurrimiento varía del 5-10%. A partir de Buenavista hasta Mazocahui, el desarrollo del río es de 200 km, con pendiente baja y el coeficiente de escurrimiento casi nulo. En los últimos 100 km, hasta llegar a la presa Abelardo L. Rodríguez, la pendiente se incrementa ligeramente, mostrando pequeños raudales en zonas de rejuvenecimiento. Con respecto al estado de madurez, se puede observar que el río es estable a partir de Arizpe y que se encuentra en estado transitorio de juventud a madurez desde este poblado hasta su nacimiento (Rangel, 1996).

El comportamiento del perfil hidráulico del río San Miguel de Horcasitas presenta 3 pendientes. La primera y más fuerte es la del trayecto desde donde nace el río, en la sierra de Cucurpe, hasta el poblado del mismo nombre; este trayecto es de aproximadamente 50 km y tiene un coeficiente de escurrimiento del 10-20%. Este primer trayecto se encuentra en un estado de juventud transitoria. La pendiente disminuye a moderada en los siguientes 100 km y con ella baja el coeficiente de escurrimiento. Finalmente en los últimos 50 km, hasta su confluencia con el río Sonora, la pendiente aumenta. A partir del poblado de Cucurpe el cauce del río cambia su estado a estable.

El río Zanjón muestra una tendencia similar a los dos anteriores, sólo que con un recorrido menor, del orden de 150 km. La pendiente fuerte se localiza en los primeros 10 km, cambia a pendiente moderada por un trayecto de cerca de 40 km, y los últimos 100 km presentan la pendiente más baja. Los coeficientes de escurrimiento varían directamente proporcional a la pendiente. El perfil hidráulico muestra todo el río en un estado de madurez, a excepción de los primeros 10 km.

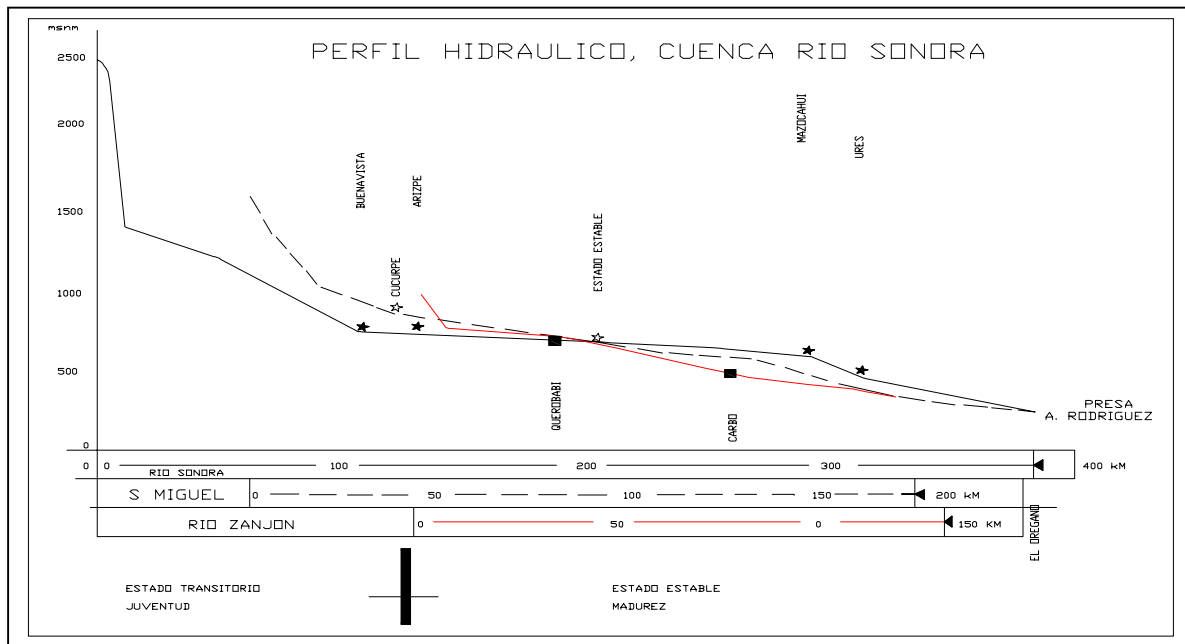


Figura 3.10 Perfil hidráulico del río Sonora y sus tributarios (Rangel, 1996).

3.4.3.4 Origen de la cuenca hidrográfica del río Sonora.

Las cuencas sedimentarias son, en sentido amplio, aquellas áreas en las cuales los sedimentos pueden acumular un considerable espesor y ser preservados por largos lapsos de tiempo geológico. Además, existen áreas de larga denudación persistente, tales como regiones donde los procesos de erosión y deposición son neutralizados más o menos, uno con respecto al otro (Bedinger et al., 1989). En este sentido, existe una relación de interdependencia, al menos desde el Terciario Medio, entre la Sierra Madre Occidental, cuando empieza a tomar su forma presente, y la formación de la planicie deltáica como receptáculo de sedimentos.

El desarrollo de la Sierra Madre empieza durante el período de convergencia de placas en el Cretácico Tardío y el Terciario Inferior (40-80 Ma), luego de un extenso levantamiento acompañado por la intrusión de grandes masas de rocas plutónicas. Los volcanismos intrusivo y extrusivo dieron como resultado un grueso espesor de cenizas y lava que descansó sobre estratos del Cretácico (100-135 Ma) y más viejas (Delpretti, 1987).

Este recién creado sistema orográfico generó un nuevo patrón de corrientes de vientos; la sierra se levantó abruptamente y formó una verdadera barrera al viento dominante del W y predominante del SSW, que acoplados con los levantamientos

orogénicos formaron corrientes de convección que todavía descargan su humedad en grandes lluvias orográficas al lado oeste de la sierra. Se originó entonces una intensa erosión; los ríos que fluyen rumbo al Pacífico fueron capaces de cortar frontalmente las serranías volcánicas que desgranaron los materiales menos resistentes, formando barrancas y ríos de dirección preferencial E-W (Rangel, 1996).

Entre 21 y 27 Ma., el sistema extensional de fosas y pilares (Basin and Range) generó fallas que vendrían a establecer el nuevo control del sistema de drenaje; los canales principales toman la dirección NNW y SSE combinados con la erosión; la mayoría de los ríos y sus tributarios tienen tendencia a encontrarse en un ángulo más o menos de 90°, patrón que resulta de la dirección NNW de las fallas, que entonces interceptan a los ríos erosivos preexistentes haciéndolos girar hacia una nueva tendencia, NNE.

A la interdependencia entre los avenamientos de la cuenca hidrográfica, delineados a partir de la denudación de la Sierra Madre Occidental y de los sistemas orográficos preexistentes, se debió la deposición de sedimentos llevados por mecanismos de saltación, arrastre y suspensión para la formación del acuífero del río Sonora. Sin embargo, hay que agregar que al descargar en la zona costera, tales sedimentos se interdigitaron con depósitos marinos del Mioceno y post-Mioceno, dada la ubicación de la línea de costa en ese momento (Rangel, 1996).

3.4.4 Suelos.

Entre los principales suelos, los regosoles son los más abundantes, seguidos por litosoles; ambos son suelos jóvenes, delgados, asociados a pendientes empinadas, característicos de las sierras. Enseguida se presentan los xerosoles y yermosoles, característicos de la zona árida. También es relevante encontrar que el 2.79% de los suelos son salinos (solonchaks), así como la presencia de vertisoles (5.09%), suelos arcillosos de alto potencial agrícola pero de manejo cuidadoso (IMADES, 1998).

En la región de estudio, el uso que se le ha dado al suelo es principalmente para fines agrícolas con más del 55% del territorio y el resto se utiliza para la ganadería y la pesca.

3.4.5 Vegetación.

Por su ubicación geográfica, así como por las condiciones climáticas y morfológicas, Sonora se caracteriza por tener una gran diversidad de comunidades vegetales, por lo que es posible encontrar desde la vegetación de zonas áridas hasta aquellas que son características de los bosques en zonas templadas.

Sin embargo, en casi toda el área sobresale la vegetación del tipo:

Agrícola:	Trigo, maíz, soya, algodón, alfalfa, etc.
Mezquital:	Palo fierro, palo verde, huisaches, brea.
Halófilas:	Chamizal, jojoba, vidrillo, alfombrilla, etcétera.

Pastizal:	Zacate, salicornia.
Matorral:	Gobernadora, saladillo, hierba de burro, sanguengrado.
Otros:	Cholla, mezquite, chamizo.

En las cercanías a Bahía de Kino existe vegetación de dunas costeras, entre las que se contemplan la alfombrilla, piñuela, yerba reuma, nopal, etcétera. La explotación del suelo y la actividad humana, además de la baja precipitación, han modificado la vegetación original en áreas considerables del Estado. Los tipos de vegetación que cubren la región incluyen: la desértica, con el 60.8% de la superficie; los bosques, con el 22.6%; los pastizales, con el 10.9%; la de tipo agrícola, con el 1.4%; la selva, con el 1.0%; las halófilas y los manglares, con el 3.3%.

La vegetación de las zonas desérticas o llanuras está compuesta por matorrales xerófilos o arbustos menores de cuatro metros de altura; algunos ejemplos son la yuca, agaves, palma, cenizo, ébano, mezquite y gobernadora. De las especies endémicas en el desierto sonorense hay que mencionar la biznaga y el cardón (que se encuentran amenazadas), el cirio, algunas especies de cactus y la jojoba. Este tipo de vegetación se halla principalmente en las provincias Llanura Sonorense, Llanura Costera del Pacífico y en las partes bajas de la provincia Sierra Madre Occidental (Gobierno del Estado de Sonora, Ecoplan del Estado de Sonora, 1980).

4. MARCO GEOLÓGICO

4.1 Geología regional.

La geología regional se simplificó condensando el marco geológico, puesto que se considera que ir al detalle rebasa los alcances de este estudio. Existen numerosos trabajos recientes, que se citan como referencias bibliográficas para ampliar el conocimiento de alguna disciplina de interés especial. No obstante, se puso énfasis en aquellas características geológicas que permiten mostrar los patrones estructurales donde se formaron los acuíferos y que fueron determinantes para entender los patrones de flujo subterráneo y sus condiciones de frontera.

4.1.1 Geología superficial.

En los alrededores del área de estudio afloran rocas de varias edades que varían desde el paleozoico hasta el cuaternario y están constituidas por rocas sedimentarias, ígneas intrusivas y volcánicas (Figura 4.1). A continuación se describen brevemente estas unidades, de la base a la cima:

Paleozoico Superior (Ps). Esta unidad está constituida por rocas metamórficas indiferenciadas.

Mesozoico (Mz). Este grupo de rocas puede estar constituido por dos secuencias: andesitas y areniscas y lodolitas, basaltos y andesitas.

Cretácico-Terciario (KTI). Unidad constituida por rocas ígneas intrusivas; ya sea por rocas graníticas, granodioritas, pórfidos o dioritas.

Terciario Indiferenciado (TV). Secuencia volcánica conformada por andesitas, riolitas, basaltos, tobas ácidas y otras rocas piroclásticas.

Terciario Oligoceno (ToV). Secuencia volcánica constituida por riolitas, andesitas, basaltos, dacitas, tobas y/o ignimbritas.

Terciario Mioceno (Tm). Este grupo de rocas lo constituyen dos paquetes: 1) **TmZ**, que es secuencia de areniscas y conglomerados volcanoclásticos con intercalaciones de tobas; 2) **TmS**, constituida por areniscas y conglomerados polimícticos.

Terciario Neógeno (TnV). Esta unidad puede estar constituida por basaltos y brechas volcánicas básicas, tobas riolíticas, andesitas, dacitas y/o riolitas.

Terciario-Cuaternario (QT). Unidad constituida por sedimentos poco consolidados de gravas, arenas y limos.

Cuaternario (Q). Compuesta por sedimentos superficiales depositados en valles, laderas y planicies; está constituida por gravas, arenas, limos y arcillas. En el área de estudio, esta unidad se subdivide en dos tipos: **Qe**, que son depósitos eólicos, y **Ql**, que son sedimentos de playa (sabkha).

El fenómeno geológico más común en la provincia es la formación de una serie de cuencas volcano-sedimentarias, originalmente endorreicas, algunas de las cuales evolucionaron a su integración regional. Estas cuencas muestran una estratigrafía compuesta de cuatro unidades: 1) *Depósitos "pre-Basin & Range"*, cuya edad varía del Oligoceno al Mioceno y consistente de sedimentos continentales de moderada a altamente consolidados, compuestos de arcillas, limolitas, areniscas y conglomerados, con rocas volcánicas interestratificadas; casi invariablemente, estas rocas se encuentran de moderada a altamente basculadas (Grijalva y Rangel, 1989). 2) *Depósitos inferiores de cuenca*, formados antes del desarrollo de drenaje integrado y caracterizados por extensos depósitos de grano fino, evaporitas y volcanitas; a menudo, estos depósitos están cubiertos por conglomerados y areniscas conocidas regionalmente como Formación Báucarit. 3) *Depósitos superiores de cuenca*, depositados durante las últimas etapas de relleno, a medida que se integraba la red regional de drenaje, y los cuales son generalmente de materiales más gruesos que los depósitos inferiores. 4) *Depósitos de aluvión de arroyo*, formados durante el establecimiento del presente sistema de drenaje y consistente principalmente de arena y grava. El espesor de todo el paquete varía desde escasas decenas hasta más de 3000 m, el grado de consolidación también es variable de débil a fuerte, dependiendo de la posición estratigráfica (Dohrenwend, 1987)

Estudios radiométricos de rocas volcánicas del Terciario medio y más jóvenes en Sonora (Mc Dowell *et al.*, 1977, 1993) en general coinciden en la existencia de tres etapas de extensión: una entre 27 y 15 *Ma* (pre-Basin and Range), otra entre 15 y 10 *Ma* (Basin and Range), y finalmente aquella posterior a los 9 *Ma*. Por otra parte, estudios de estados de esfuerzos en algunos lugares indican que, efectivamente, a finales del Oligoceno medio y a mediados del Mioceno existió un campo de esfuerzo cortical regional extensional puro de eje mínimo principal orientado sensiblemente NE-SW, el cual dio como consecuencia cuencas orientadas NW-SE (pre-Basin and Range). A partir del Mioceno medio a tardío, este campo de esfuerzo extensional giró secuencialmente en sentido horario de las manecillas del reloj a ENE-WSW, dando lugar a cuencas orientadas NNW-SSE (Basin and Range) (Radelli, 1986); el campo de esfuerzo anterior giró de nuevo en el mismo sentido por lo menos desde hace 7 *Ma*, estando en la actualidad orientado aproximadamente E-W a WNW-ESE. Las reconstrucciones geodinámicas del Terciario medio a tardío de esta parte de México indican que la subducción cesó hace alrededor de 12 *Ma*, por lo que se interpreta que las primeras etapas de extensión ocurrieron en un ambiente intra- o tras-arco (Atwater, 1970).

Estudios regionales y modelados mecánicos de la extensión terciaria (Radelli, *et al.*, 1991) indican en general la formación de pilares y fosas (horst y grabens) alternantes, cuyas dimensiones varían entre 10 y 50 km de ancho; los escasos estudios

estructurales detallados en el NW mexicano apoyan dicha interpretación (Angelier y Colletta, 1983). Este tipo de estructuras son observadas en el área del presente estudio, ya que el espaciamiento entre las cuencas y altos tectónicos es de aproximadamente 25 km de ancho, en estrecha concordancia con los estudios mencionados. En general las cuencas terciarias varían en longitud desde unos 50 a 150 km, dimensiones que han sido apreciadas en los trabajos que integran este estudio.

Los datos de fechas por el método de huellas de fisión efectuadas en rocas cristalinas en la franja central de Sonora obtenidos recientemente (Calmus, 1990), aunque escasos, apoyan una migración de levantamientos de sierra desde Mazatán, hace 18 *Ma*, hasta la costa en Bahía Kino, hace 6 *Ma*.

La situación tectónica actual del Golfo de California ha sido extensamente estudiada, sobre todo en los últimos años (Radelli et al., 1990). Sin embargo, la situación continental en Sonora es totalmente lo opuesto. En particular, al momento es aún difícil discernir si la tectónica activa en el área de estudio es el resultado de la tectónica del "Basin and Range" propiamente dicha, o si está asociada a la tectónica del Golfo de California. La diferencia no es trivial, ya que el campo de esfuerzo, y por ende las estructuras, en ambas provincias son diferentes y, de acuerdo con los más recientes trabajos, el resultado práctico son la influencias que ambas parecen mostrar en el comportamiento regional de los acuíferos.

4.2 Geología estructural y tectónica.

Las estructuras en las rocas proterozoicas consisten de foliaciones metamórficas y pliegues, las cuales en general presentan una tendencia NE-SW. A su vez, las rocas paleozoicas y mesozoicas presentan pliegues que tienen un patrón NW-SE, con algunas excepciones, como en el Cerro de la Campana de Hermosillo, en donde los pliegues son de ejes fuertemente inclinados y presentan un rumbo casi E-W.

Por otra parte, Radelli et al. (1986) describen una estructura de tendencia general NE-SW, la cual pasa a escasas decenas de metros al sur de la presa Abelardo L. Rodríguez; de acuerdo con esta estructura es posiblemente activa, aunque no se le ha documentado actividad sísmica asociada. Aparte de la falla de Hermosillo, que presenta un rumbo esencialmente NE-SW (Radelli, et al., 1990), las estructuras del área presentan patrones diferentes, los cuales aparentemente se distribuyen geográficamente al igual que las rocas más jóvenes. En la parte norte se observan fallas normales orientadas NW-SE; estas estructuras parecen controlar la distribución de los conglomerados y areniscas pertenecientes a la Formación Báucarit. Este patrón estructural se mantiene poco más al este y sur de esta localidad, hacia Hermosillo.

Al sur del área, hacia el campo volcánico de la Sierra Libre, se han definido una serie de fallas normales que en general presentan una tendencia N-S, las cuales afectan a las rocas volcánicas miocénicas de dicho campo. A diferencia de otras partes de

Sonora, el área de presente estudio se caracteriza por estar ampliamente cubierta por sedimentos cuaternarios, lo que impide determinar el grado estructural en este lugar.

4.3 Geología del subsuelo.

Para el desarrollo del presente apartado se utilizó la información de pozos antiguos, denominados Pozos Centinelas Hermosillo y Pozos de Observación (PCH, PHB respectivamente), y estudios geofísicos realizados en la región (SARH, 1978).

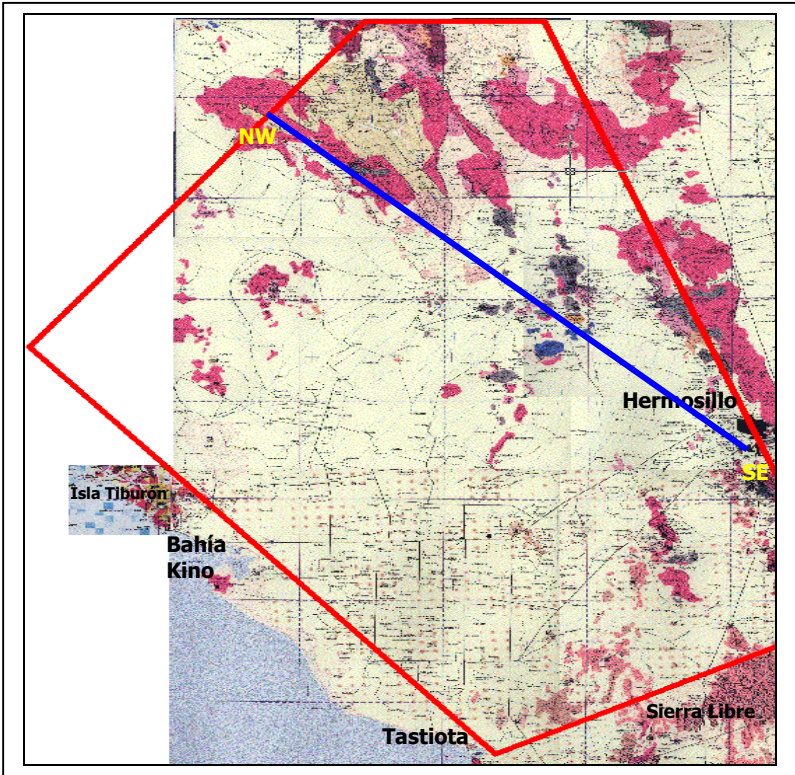


Figura 4.1 Mapa geológico regional que muestra el área de estudio (recuadro). Tomado de Fernández, Monreal y Grijalva (1993), y Cartas Geológicas Hermosillo y Sierra Libre CoReMi (1999).

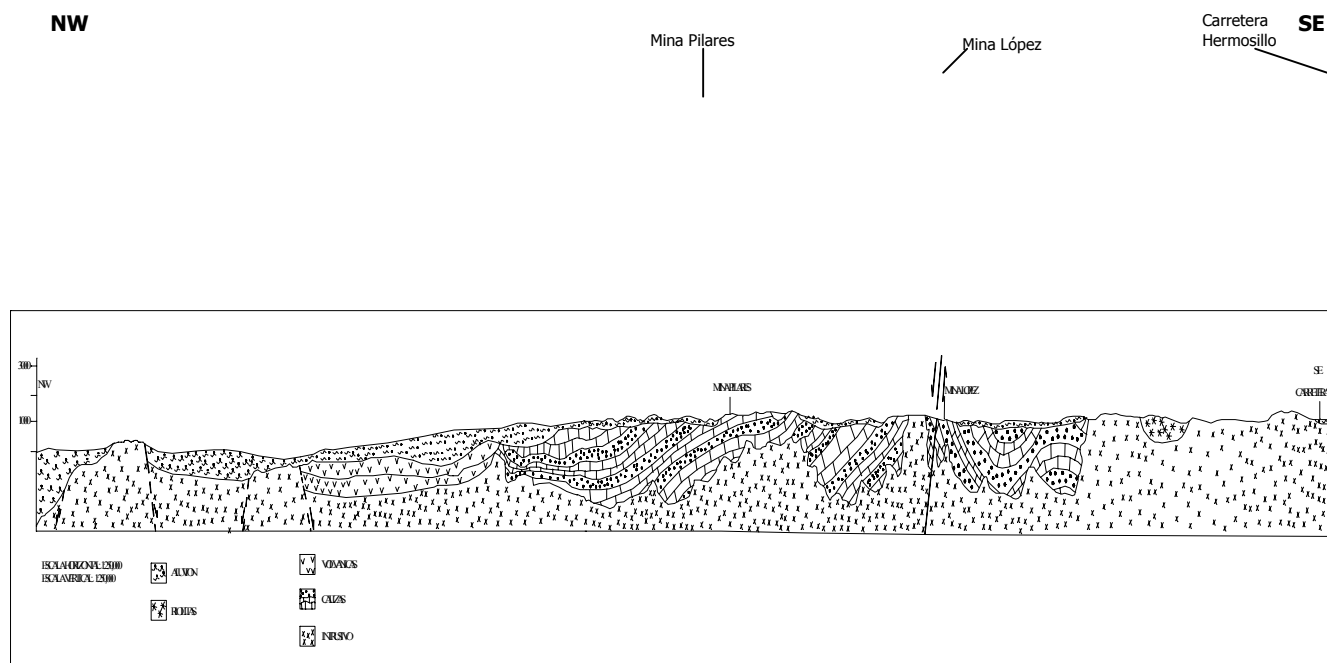


Figura 4.2.- Sección esquemática NW-SE del norte del área de estudio; el basamento muestra estructuras y unidades geológicas (Fernández, Monreal y Grijalva, 1999). Ubicación en Figura 4.1.

Es muy importante reconocer que el entendimiento del subsuelo está concentrado principalmente a profundidades relativamente someras, pues más del 95% de los pozos perforados en el área sólo llegan a ≤ 300 m; nada más se tienen 5 pozos que alcanzaron profundidades entre 500 y 1,182 m. Adicionalmente, las descripciones de los pozos realizados antes del año 2000 son muy pobres, en ocasiones no pudiéndose discriminar facies sedimentarias que pudieran pertenecer a diferentes ambientes sedimentarios de depósito.

Asimismo, los estudios geofísicos efectuados en el área son los de resistividad y gravimétricos, ambos fuertemente "modelo-dependientes", que necesitan de una buena a excelente descripción geológica de la columna estratigráfica (logs de pozos) para su óptima aplicación; como ya se mencionó, las descripciones litológicas son deficientes, por lo que la interpretación de los estudios geofísicos deben considerarse como preliminares. Aunque no se tiene la información suficiente como para conocer la estratigrafía del subsuelo con precisión, los datos obtenidos de la información de los pozos antiguos y los perforados recientemente permiten proponer la presencia de tres unidades principales (Figuras 4.3, 4.4 y 4.5).

4.3.1 Hidroestratigrafía.

Unidad Superior. Inicia desde la superficie del suelo y varía en espesor desde 200 m (pozo PHO-1) y hasta 340 m (pozo PHB-17) (Figuras 4.5 y 4.6). Se trata de sedimentos no consolidados y constituidos principalmente por arenas, gravas, boleos y

pocas arcillas de color café; las arenas varían en tamaño desde grano fino a grueso y están constituidas por granos de cuarzo, fragmentos de roca, muscovita y biotita. Esta unidad corresponde posiblemente a sedimentos característicos de ambientes fluviales: sedimentos aluviales depositados en las laderas de antiguos cerros, sedimentos fluviales depositados por paleocanales, y ocasionales depósitos de origen lacustre, evidenciados por paquetes de espesor considerable de arcillas (50-100 m; e.g. pozos PHO-12 y PCH-4).

Unidad Media. Está compuesta de sedimentos no consolidados, constituidos por limos y arcillas de color gris y azul, además de arenas, con algunos horizontes arcillo-arenosos con fósiles marinos. El espesor de esta unidad varía de 200 m (pozo PHO-13) hasta 560 m (pozo PHB-17) y su cima se encuentra a una profundidad que varía de 180 a 340 m. Por la composición de los sedimentos, posiblemente corresponde a una secuencia progradacional de depósitos deltaicos. Esta unidad se dividió, por sus características litológicas, en dos paquetes (Figuras 4.3, 4.6 y 4.7):

a) Unidad Media A. Paquete de sedimentos no consolidados, constituido por limos y arcillas grises y azules y arenas con algunos horizontes arcillo-arenosos con fósiles marinos. Esta unidad ha sido referida como la "arcilla azul" y asignada al Mioceno por Gómez (1971). Sin embargo, estudios más recientes establecen dudas respecto a dicha asignación, llegándose a la conclusión de que o son continentales miocénicos o son marinos pliocénicos, ya que la "invasión marina" en el Golfo de California ocurrió precisamente en el límite Plioceno/Mioceno, hace unos 5 *Ma*. Considerando la geología regional, es probable que los sedimentos finos o la llamada "arcilla azul" corresponda a sedimentos lacustres continentales del Mioceno superior, y que los primeros sedimentos clásticos que la sobreyacen sean marinos del Plioceno (Figuras 4.3, 4.6 y 4.7).

b) Unidad Media B. Paquete de sedimentos no consolidados a semi-consolidados constituido por arenas, gravas y arcillas (Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7). Esta Unidad se encuentra solamente en el área de Siete Cerros hacia el Este. El espesor de esta unidad es de aproximadamente 200 metros (pozo PHB-3).

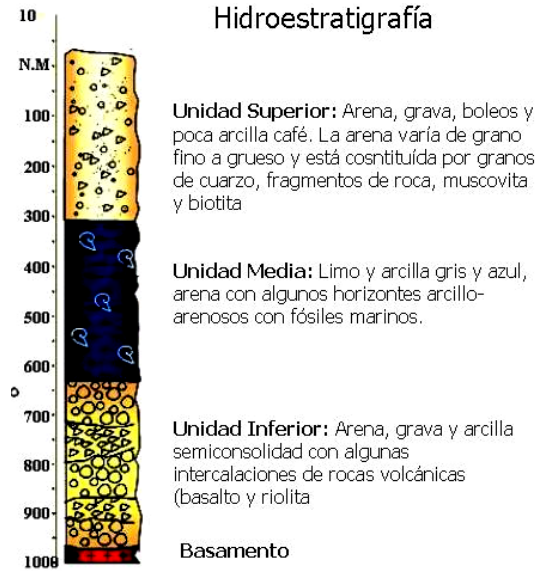


Figura 4.3 Columna estratigráfica general del subsuelo en el área de estudio.

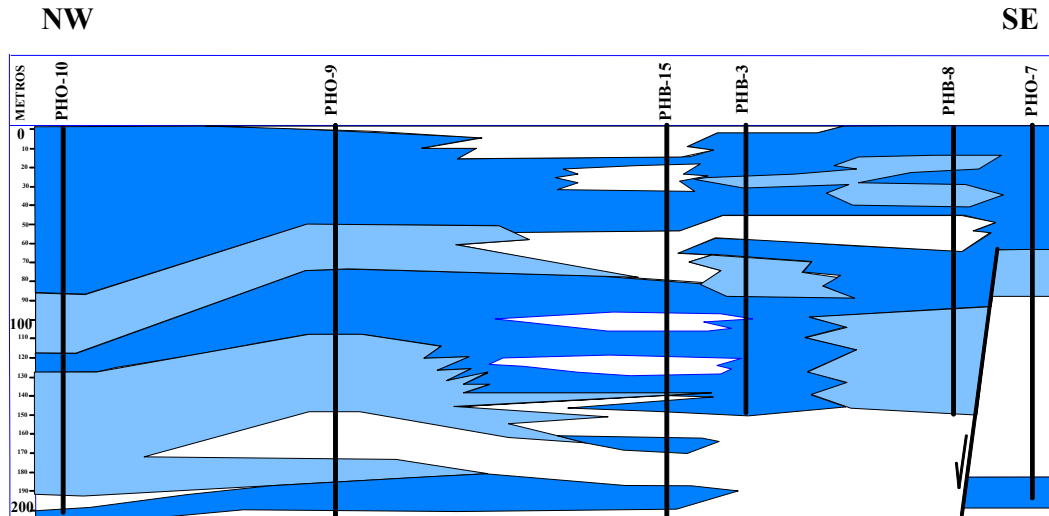


Figura 4.4. Correlación estratigráfica NW-SE de la Unidad Superior (0-200 m) entre pozos PCH-9, PCH-1, PCH-2, PHB-17, PCH-6 y PCH-4. Muestra unidades hidrogeológicas capaces de contener agua. Azul oscuro = Permeabilidad alta, Azul claro = Permeabilidad media, Blanco = permeabilidad baja (Ubicación de pozos en figura 4.8a).

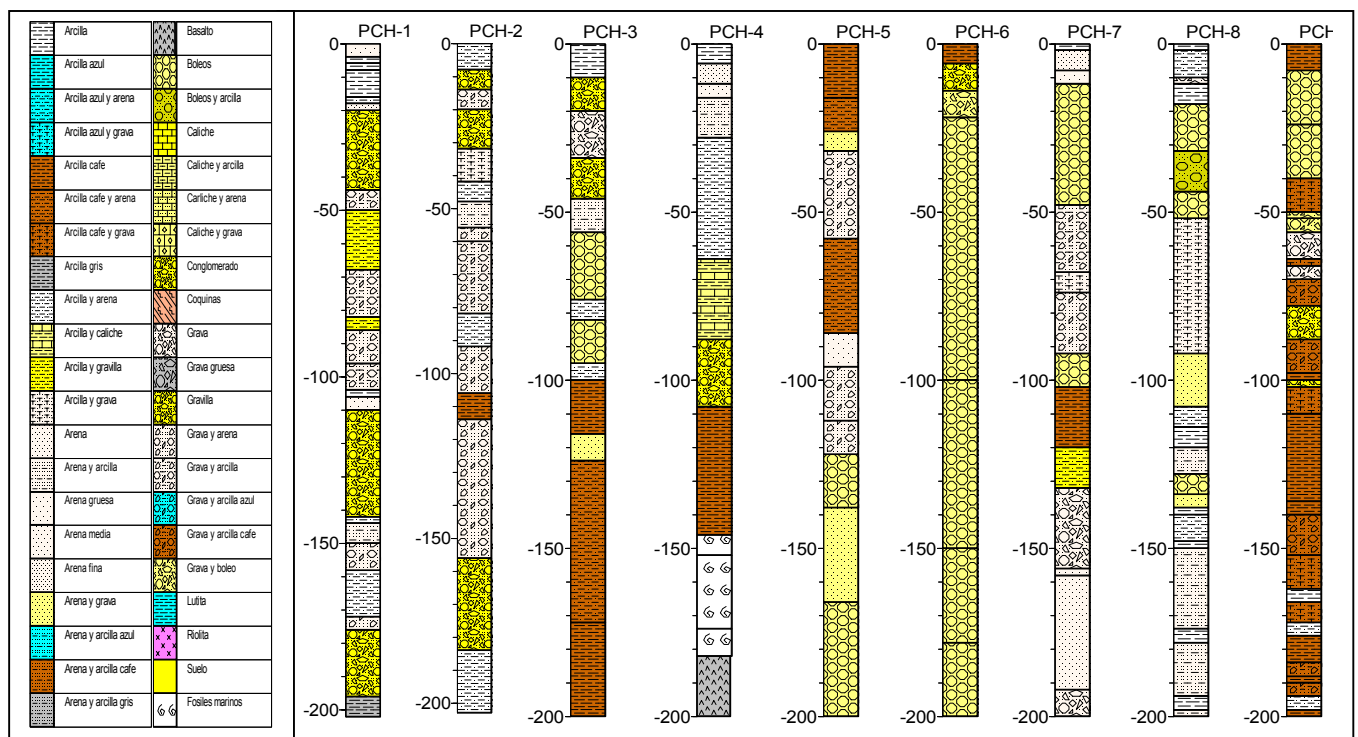
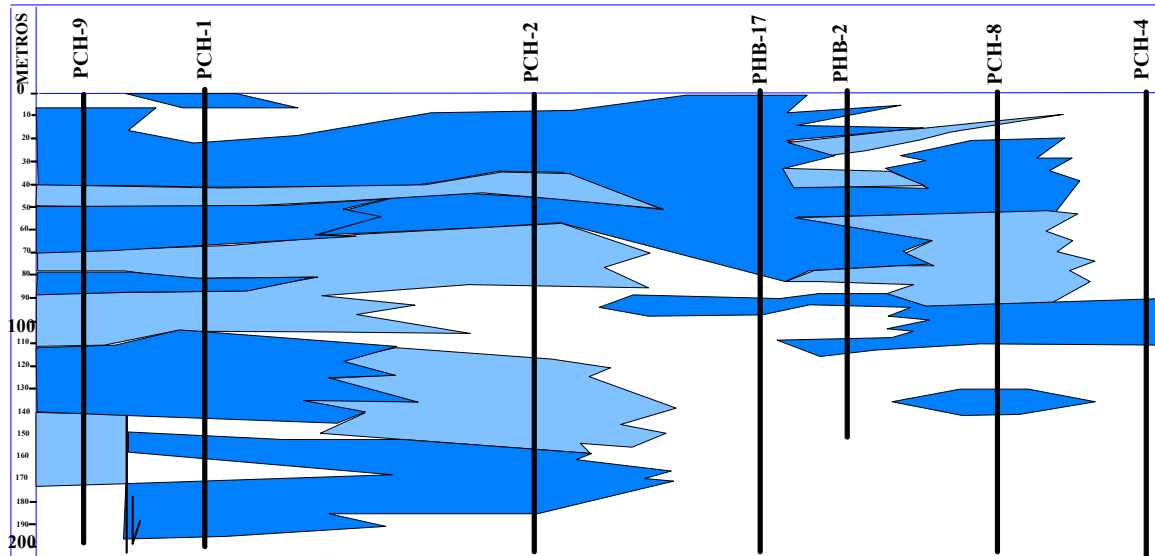


Figura 4.6 Correlación de pozos centinelas (PCH's) y mapa de localización mostrando las líneas de sección de los pozos PHB's y los PCH. A la izquierda, explicación litológica.

Como se puede apreciar en la Figura 4.5, los pozos tienen profundidad máxima de 200 m con intercalaciones de estratos limo-arcillosos, que generan semiconfinamientos y constituyen la unidad como acuífero multicapa.

Unidad Inferior. La unidad estratificada más profunda que se ha encontrado está formada por arena, grava y arcilla semi-consolidadas con algunas intercalaciones de rocas volcánicas (basalto y riolita). Esta unidad solamente se perforó en el pozo PHB-13 a los 462 m de profundidad, en donde se le determinó un espesor de 624 m. En el subsuelo esta secuencia se encuentra sobre el basamento granítico. En la superficie, la unidad posiblemente corresponde a partes de las unidades volcano-sedimentarias miocénicas y más jóvenes que ocurren en diferentes puntos en el área de la costa, o quizás corresponda a la Formación Baucarit que aflora al norte de Bahía de Kino y en la Sierra Libre, localizada al Este de Tastiota (Figura 4.1).

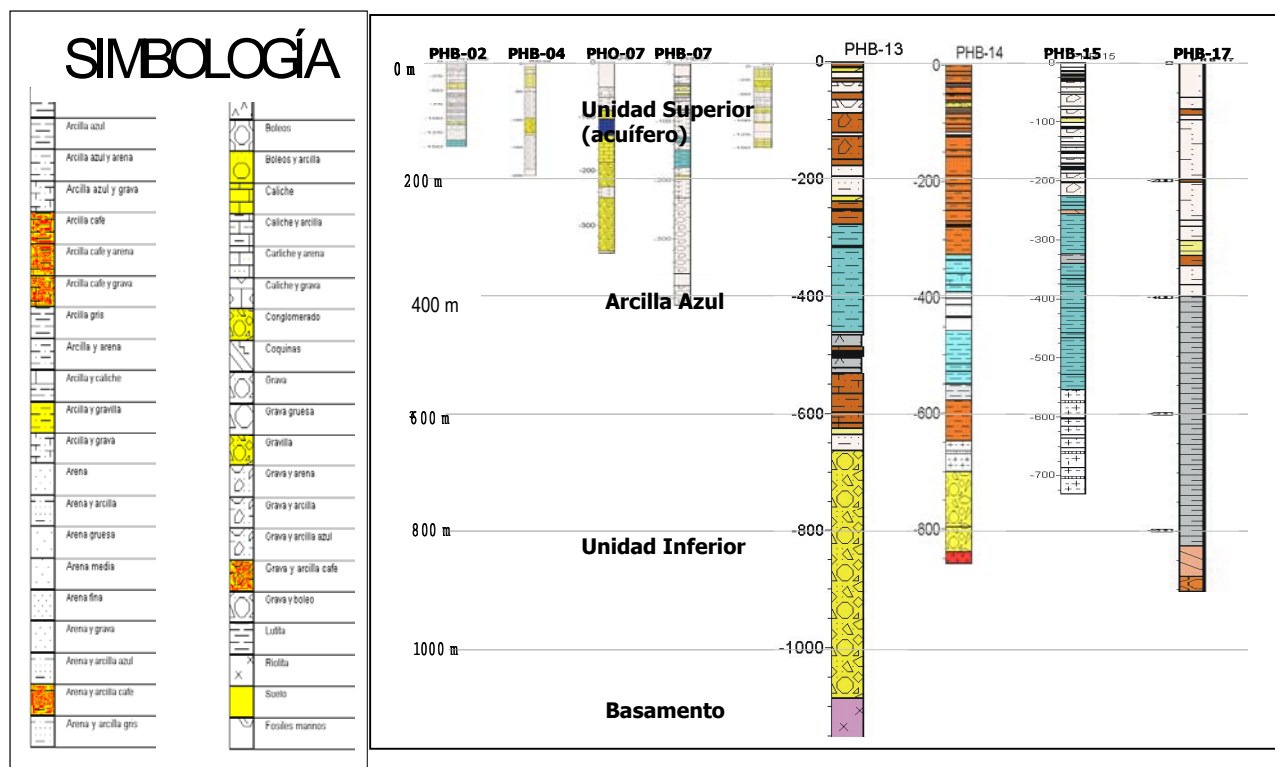


Figura 4.7 Correlación de pozos de observación (PHO y PHB's); véase la ubicación de línea de sección en la Figura 4.8a.

Basamento. Las rocas consideradas como el basamento de esta cuenca corresponden a rocas graníticas y volcánicas (andesita y riolita) y se han encontrado a diferentes profundidades (1,182 m en el pozo PHO-4; 554 m en el pozo PHB-15; 840 m en el pozo PHB-14; 878 m en el pozo PHB-17; y 1,086 m en el pozo PHB-13); estas rocas deben de corresponder a las unidades *granito*, *granodiorita*, *Terciario extrusivo* y otras más antiguas descritas en la geología superficial (Figura 4.6).

En el presente trabajo, el término "basamento cristalino" se refiere estrictamente a la unidad litológica de composición granítica, para designar a las rocas más profundas de las cuatro unidades del subsuelo. Debe considerarse que en algunos casos se denomina basamento relativo o local. Diferenciarlo en esta cuenca es una práctica que se hace, reconociendo la posibilidad de tener rocas "no-cristalinas" (como la Formación

Báucarit, o unidades volcánicas extrusivas de este estudio) contenidas en él. De acuerdo con la descripción de la geología regional y superficial, es posible que las rocas involucradas en este basamento sean aquellas del Mioceno inferior y más antiguas.

4.3.2 Análisis hidroestratigráfico.

La geología del subsuelo descrita en el presente apartado es una interpretación basada sobre todo en la información de pozos someros, de sondeos eléctricos (resistividad) y perfiles gravimétricos (Monreal, et. al., 2000). Estos estudios parecen ser suficientes para conocer la geología hasta una profundidad aproximada de unos 300 m; más abajo, la información es un tanto insuficiente y poco confiable.

A partir de estos datos se han determinado cuatro unidades hidrogeológicas consistentes de: (a) un *basamento relativo* (a la cuenca); (b) una *unidad inferior*, compuesta de sedimentos semi-consolidados con intercalaciones de coladas volcánicas, la cual fue cortada con hasta 624 m. Estudios sedimentológicos más recientes han subdivido más esta unidad (Montijo, 2002); (c) una *unidad media*, compuesta principalmente de sedimentos finos y conocida comúnmente como "arcilla azul", la cual presenta un espesor variable de 200 a 560 m; (d) una *unidad superior*, que inicia desde la superficie del suelo, variando en potencia de 200 a 340 m; consiste de clásticos de gruesos a finos, que aparentemente correspondan a sedimentos de ambientes fluviales. Dentro de la unidad superior se tienen diferentes niveles estratigráficos con sedimentos desde gravas a arenas, en donde es posible se presenten mejores condiciones de permeabilidad y por consiguiente esos niveles serían los estratos con más posibilidades de contener agua (Figuras 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.8a, 4.9, 4.10).

El comportamiento de las estructuras en el subsuelo coincide en esencia con la que ocurre en la superficie, y se reconocen en general tres tendencias: NW-SE en la parte norte, N-S en el extremo sur, dos estructuras NE-SW en la parte sur-central. Las dos últimas estructuras mencionadas son las que aparentemente controlaron el desarrollo de la sedimentación en el área al SE de la ciudad de Hermosillo.

Es pertinente recordar aquí que lo que se conoce como "acuífero de la Costa" es la unidad más superficial, que se encuentra inmediatamente debajo del suelo y hasta una profundidad aproximada de 300 (± 50) m y geográficamente dentro de la subprovincia fisiográfica *deltaica* de Lugo-Hubp (1990). Según se puede determinar a partir de las descripciones de la geología del subsuelo, esta área está atrapada entre las dos estructuras orientadas NE-SW y formando la *unidad superior*.

Por otra parte, los estudios que sirven de base para este trabajo (Monreal y otros, 2000, 2001) han mostrado claramente que la "intrusión salina no es uniforme en toda la costa, sino que se localiza en tres puntos o áreas: al Este de Bahía Kino, al Este de Cardonal y en el área de Tastiota. Las dos primeras áreas se encuentran en la extensión

de dos estructuras interpretadas en el subsuelo; la tercera, cerca de la traza de una falla normal orientada N-S y posiblemente asociada al campo volcánico de Sierra Libre.

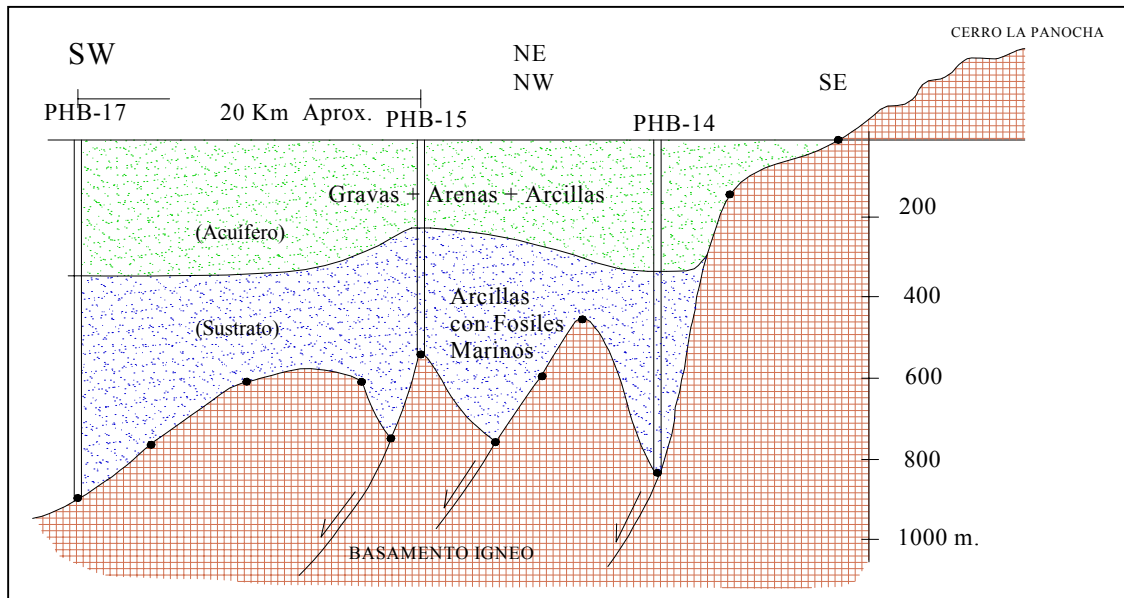


Figura 4.8 Sección compuesta SW-NE; NW-SE, ubicación en Figura 4.8a.

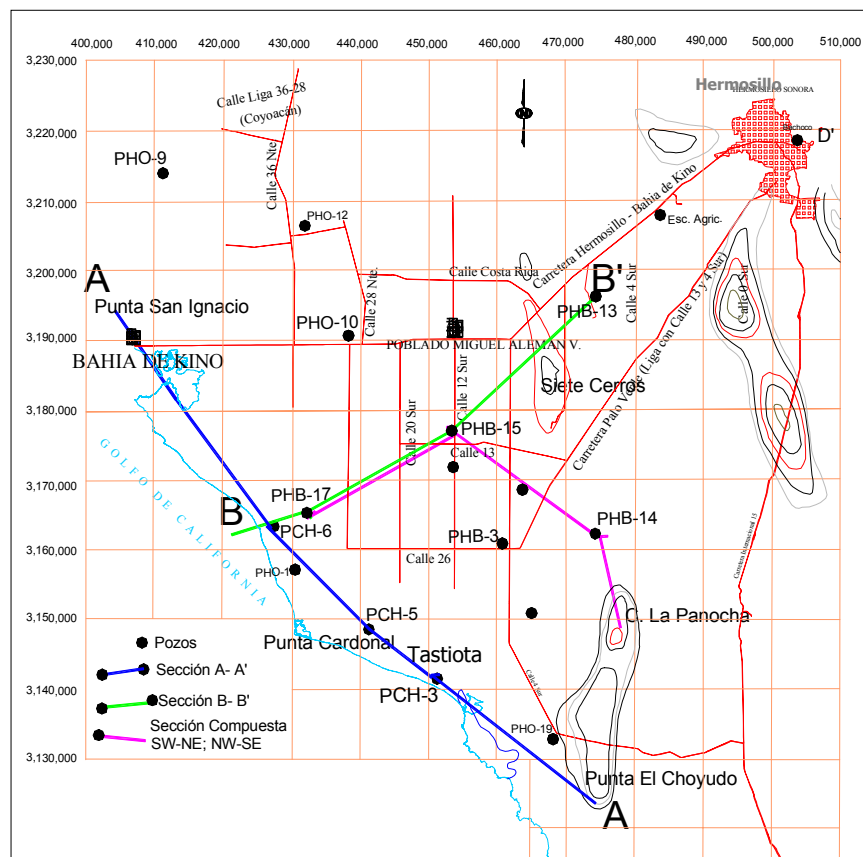


Figura 4.8a. Localización de pozos y secciones, Figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10.

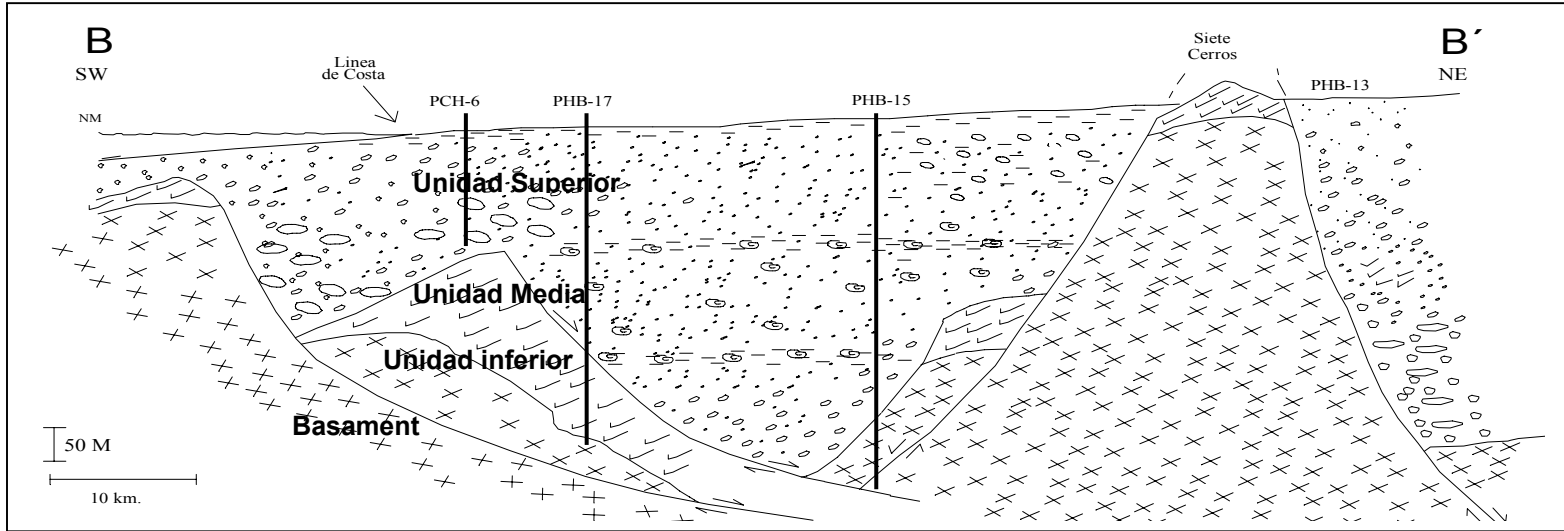


Figura 4.9 Sección hidroestratigráfica SW-NE, perpendicular a la línea de costa, ubicación en Figura 4.8a.

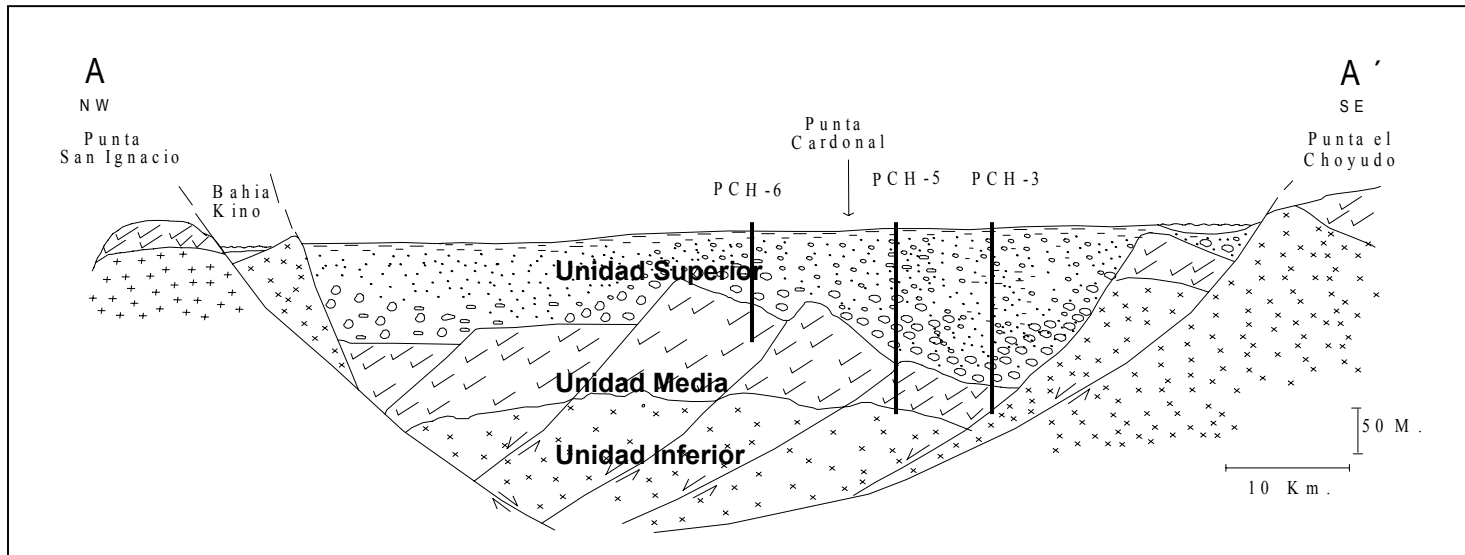


Figura 4.10 Sección hidroestratigráfica NW-SE, sensiblemente paralela a la línea de costa, ubicación en Figura 4.8a.

5. DEFINICIÓN GEOFISICO-ESTRUCTURAL DE LA CUENCA

5.1 Estudios previos.

Para ilustrar el presente análisis se diferencian dos zonas principales de estudio con sus distintos objetivos: a) Zona del acuífero de la Costa de Hermosillo; posición del frente de intrusión; b) Zona del acuífero Siete Cerros, propuesto aquí con esa denominación; geometría del acuífero. Los análisis geofísicos en el área de estudio han sido numerosos y han resultado de gran ayuda en la interpretación del subsuelo. Existen más de 1000 sondeos eléctricos verticales (SEV's), unas 500 estaciones gravimétricas y 410 sondeos TEM (Figura 5.1).

El primer estudio, para la SARH, estuvo a cargo de Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados en 1976; mediante SEV's, se pretendió localizar el frente de intrusión marina y definir las zonas de mayor permeabilidad para perforar pozos. En 1977, Estudios Geotécnicos S.A. hizo, también para la SARH, un análisis con el objetivo de encontrar zonas de relocalización de pozos alcanzados por la intrusión marina; se efectuaron SEV's para correlacionar las características hidrogeológicas de la zona. Consultores S.A., en 1981, para la SARH, llevó a cabo una investigación al poniente de Hermosillo para definir estructuras y unidades hidrogeológicas del subsuelo con posibilidades de almacenar agua subterránea, y localizar sitios para perforación de pozos exploratorios; se utilizaron SEV's y perfiles magnetométricos.

En 1990, GYMSA realizó un estudio de 30 SEV's sobre el acuífero La Victoria; aunque éste se ubica fuera del área de estudio, los sondeos permiten caracterizar una de las principales zonas de recarga para el sistema acuífero de la Costa de Hermosillo. En 1997 y 1998, investigadores del Instituto de Geofísica de la UNAM estudiaron la intrusión salina utilizando datos gravimétricos y de SEV's (Steinich y otros, 1997; Flores-Márquez y otros, 1998; Castro, 1998).

Dos de los estudios más recientes en el acuífero de la Costa de Hermosillo los hizo la Universidad de Sonora (Monreal y otros, 2000, 2001) para la Comisión Nacional del Agua. La Universidad de Sonora contrató los servicios de CIGSA para llevar a cabo la exploración geofísica; mediante la técnica de resistividad por Transitorio Electromagnético (TEM), se realizaron 410 sondeos de 250 m de profundidad promedio, llegando en ocasiones hasta 1000 m. Se detectó la presencia de estructuras asociadas con diferentes tipos de rocas que interactúan con la hidrodinámica del sistema acuífero, y se identificaron zonas asociadas con rocas ígneas que impiden una entrada franca del agua de mar hacia el continente. Esto apoyándose en cortes litológicos de pozos así como en otros métodos alternos. De igual manera se correlacionó la hidrogeoquímica para definir la tridimensionalidad del frente de intrusión y sus rutas de entrada al continente.

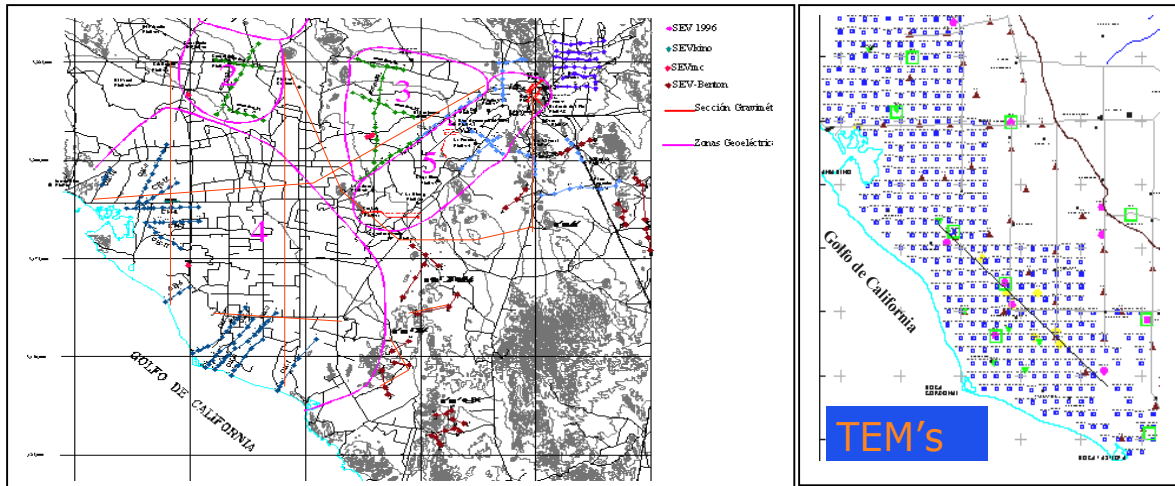


Figura 5.1 Ubicación de exploración geofísica en la Costa de Hermosillo, realizada en diferentes años por diversos autores. Izquierda, SEV's y gravimetría. A la derecha, sondeos TEM en una franja costera de 32 x 80 km (Modificado de Monreal y otros, 2001).

5.2 Análisis de imagen de satélite del área de estudio.

La imagen de satélite del área de estudio y su entorno regional (Figura 5.2) muestra una extensa planicie (Planicie Costera del Golfo de California) constituida por aluviones, depósitos eólicos y restos de lagunas marginales del Cuaternario, limitada estructuralmente por fallas de carácter regional que han controlado la formación del delta del río Sonora. Asimismo, se puede observar que la morfología de la zona litoral es probablemente producto de uno o de dos eventos tectónicos mayores: la tectónica distensiva de la Provincia del "Basin and Range" y la apertura del Golfo de California.

Las estructuras circulares con geformas dómicas corresponden, *grosso modo*, al emplazamiento de rocas intrusivas y volcánicas de edades que varían del Cretácico tardío al Terciario. Los intrusivos de composición granítica observados forman parte del llamado Batolito Larámide de Sonora y conforman en este caso el basamento cristalino regional del Estado, que presenta numerosos techos colgantes (roof pendants) de rocas antiguas y cubiertos en discordancia por rocas post-batolíticas y depósitos recientes. Estas rocas han sido cortadas a profundidad por pozos de exploración profunda.

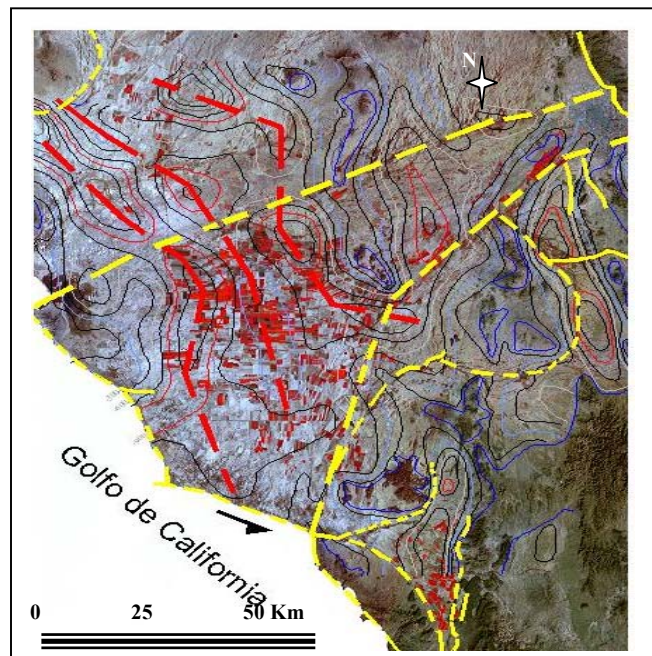


Figura 5.2 Interpretación de imagen de satélite de la Costa de Hermosillo.

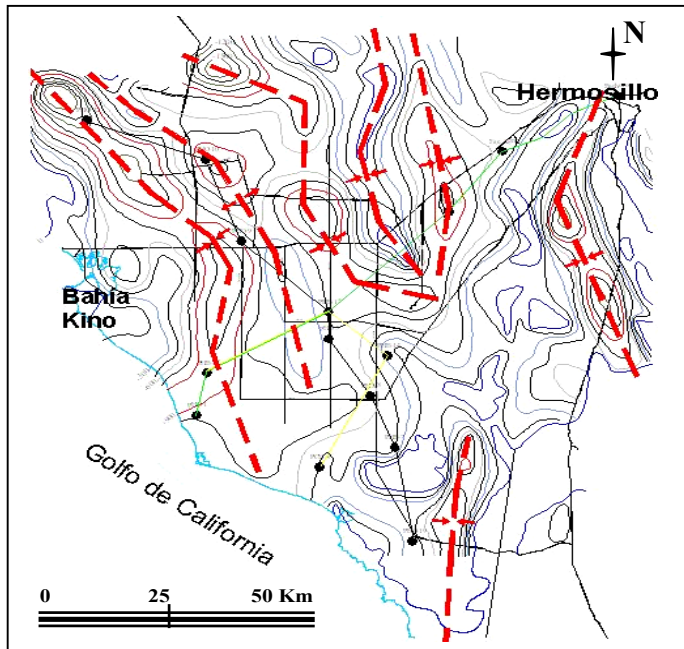


Figura 5.3 Plano gravimétrico del área (Modificado de Monreal y otros, 2000).

Desde el punto de vista hidrogeológico, la importancia de estas estructuras mayores radica en que representan fracciones de fosas tectónicas que, a manera de canales de alta permeabilidad, facilitan el proceso de intrusión marina hacia el continente. La geometría y continuidad en profundidad de estas fosas fue revelado por el plano gravimétrico de la zona realizado por Morales, M., en Monreal y otros (2000) (Figura 5.3).

5.3 Tridimensional del basamento cristalino.

La Figura 5.4 ilustra la configuración tridimensional del basamento cristalino de la Costa de Hermosillo y una propuesta de reconstrucción paleohidroológica del río Sonora. Se observa la alternancia de fosas y pilares (grabens y horst) orientados NW-SE y la intrusión marina a lo largo de tres fosas principales, localizados a la altura del estero de Bahía Kino, estero El Cardonal y estero de Tastiota (Rangel, 2003).

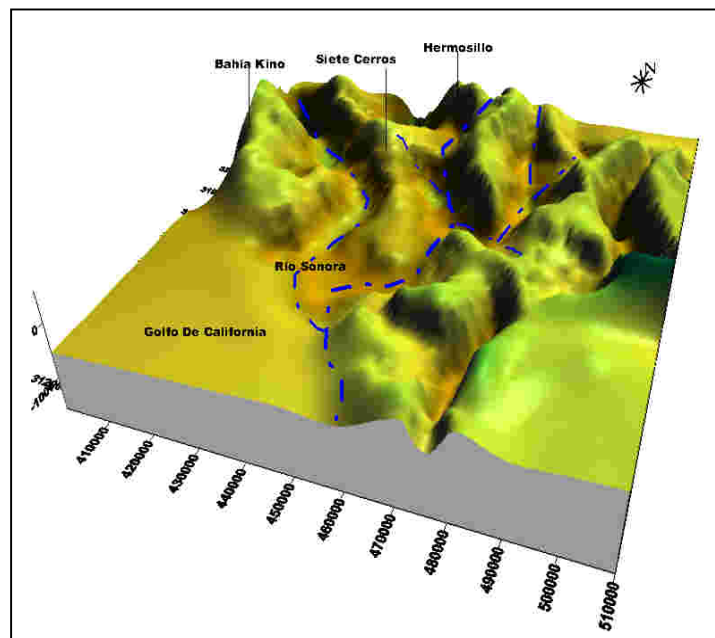


Figura 5.4 Vista tridimensional del basamento; muestra una propuesta paleohidroológica del río Sonora.

El área desprotegida ante la intrusión se aprecia mejor en la Figura 5.5 y pone énfasis en la zona entre El Cardonal y Tastiota, donde la estructura permite el paso de la intrusión en la fosa que representa la continuación hacia el sur del Playón de Noriega. La penetración se realiza por el frente de descarga del paleocauce del río Sonora (Figura 5.4). La proyección en planta de este canal preferencial, desde la zona de Tastiota, aunado a la inducción de flujo por sobrebombeo del acuífero (a la altura de la Calle 12), sugiere que ha provocado la inducción de la intrusión hacia el interior. En el estero de Bahía Kino, la escasa profundidad al basamento ha permitido que la intrusión marina avance en forma rápida por las capas permeables superficiales hasta distancias del orden de los 32 kilómetros continente adentro (Calle 28).

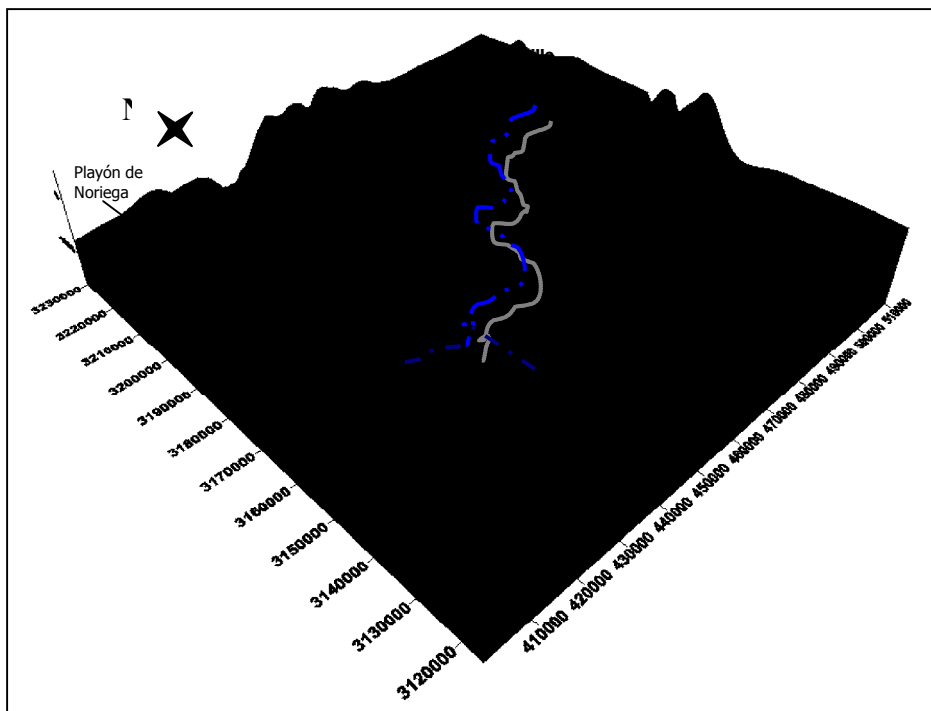


Figura 5.5 Topografía del basamento cristalino en la Costa de Hermosillo; la línea discontinua representa el posible paleocauce del Río Sonora (Modificado de Monreal y otros, 2000).

5.4 Integración geofísica.

Los estudios de Monreal y otros (2000, 2001) integraron el esquema general del subsuelo de la costa. La exploración indirecta utilizada comprendió gravimetría, TEM's (400 someros y 10 profundos), SEV's y registros geofísicos de 8 pozos perforados como parte de ese estudio, 7 registros geofísicos de rayos gamma en pozos adomados y la nivelación de 20 brocales de pozos por GPS diferencial. Parte de ese resultado se muestra con dos secciones geológico-geofísicas y las interpretaciones tridimensionales para la zona total de la costa y sobre la zona de Siete Cerros, que permiten tener una imagen clara de la ubicación del frente de intrusión, las características físicas del medio y de la geometría del acuífero.

Sección NW–SE.

Esta sección (Figura 5.6) es sensiblemente paralela a la línea de costa, cubre una extensión aproximada de 85 kilómetros y ha sido calibrada con información de los pozos someros y profundos que se muestran sobre ella. Se observa la morfología del basamento con sus fosas y altos, que refleja el control estructural del depósito de los sedimentos. Rellenando las fosas se ven los materiales granulares del Reciente, que forman el acuífero, constituidos por alternancia de gravas, arenas, limos y arcillas. Mantiene un espesor promedio de 200 metros y es subyacido por la denominada "arcilla azul", caracterizada por la abundancia de fósiles marinos, con espesores superiores a los 400 metros, la cual, a su vez, descansa sobre el basamento cristalino y marca la transgresión marina del Mioceno hacia el continente (Gómez, 1971).

La presencia de la arcilla azul y el hecho de que descansa en discordancia en la mayoría de los lugares sobre basamento cristalino, elimina la posibilidad de la presencia de un acuífero inferior rentable para su explotación, como exponía el modelo previo (Ariel Construcciones, 1968).

Sección SW–NE.

Esta sección (Figura 5.7) es aproximadamente perpendicular a la línea de costa; cubre una longitud de alrededor de 100 kilómetros hasta la ciudad de Hermosillo. Se observa la presencia de los materiales granulares (arenas, gravas, limos y arcillas) con espesor promedio de 200 metros, subyacidos por la "arcilla azul" que descansa sobre basamento ígneo. A la altura de Siete Cerros se aprecia el límite de la transgresión marina del Mioceno (Gómez, 1971), responsable del depósito de la "arcilla azul".

Hacia la porción oriental de Siete Cerros, la sedimentación presenta características enteramente continentales y la cobertura aluvial es subyacida por una unidad probablemente crono-correlacionable, de acuerdo a sus características descriptivas, con el llamado Grupo Baucarit, el cual, desde el punto de vista hidrogeológico, es improductivo. A su vez, éste es subyacido por un conglomerado basal tentativamente asignado al Mesozoico e intrusionado por granitos laramídicos (base del pozo PHB-13).

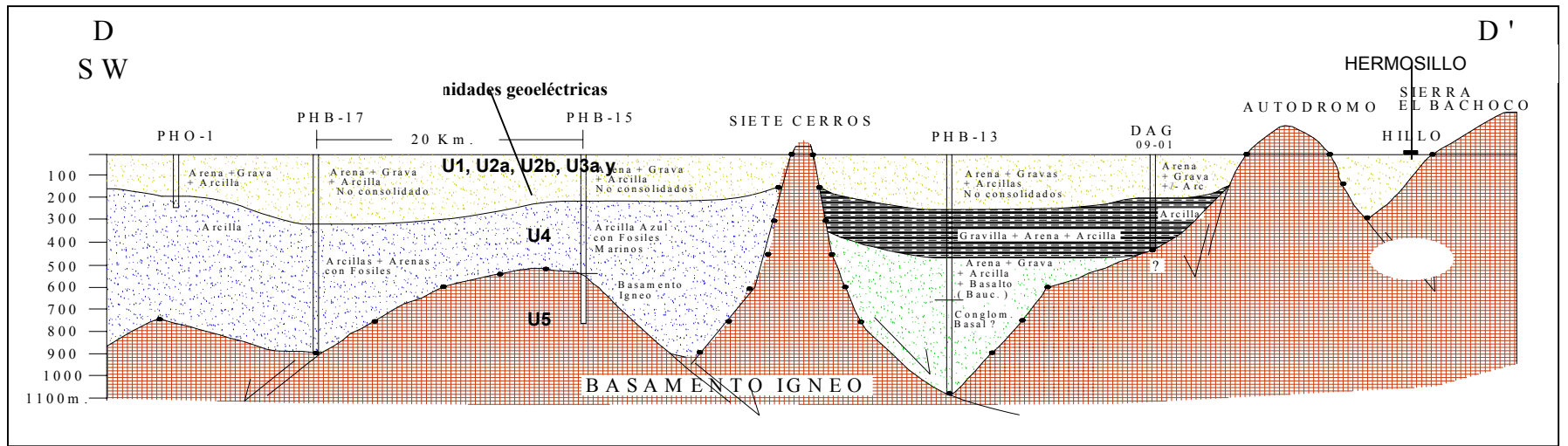


Figura 5.6 Sección hidroestratigráfica SW-NE perpendicular a la línea de costa (Modificado de Morales, M., en Monreal y otros, 2000).

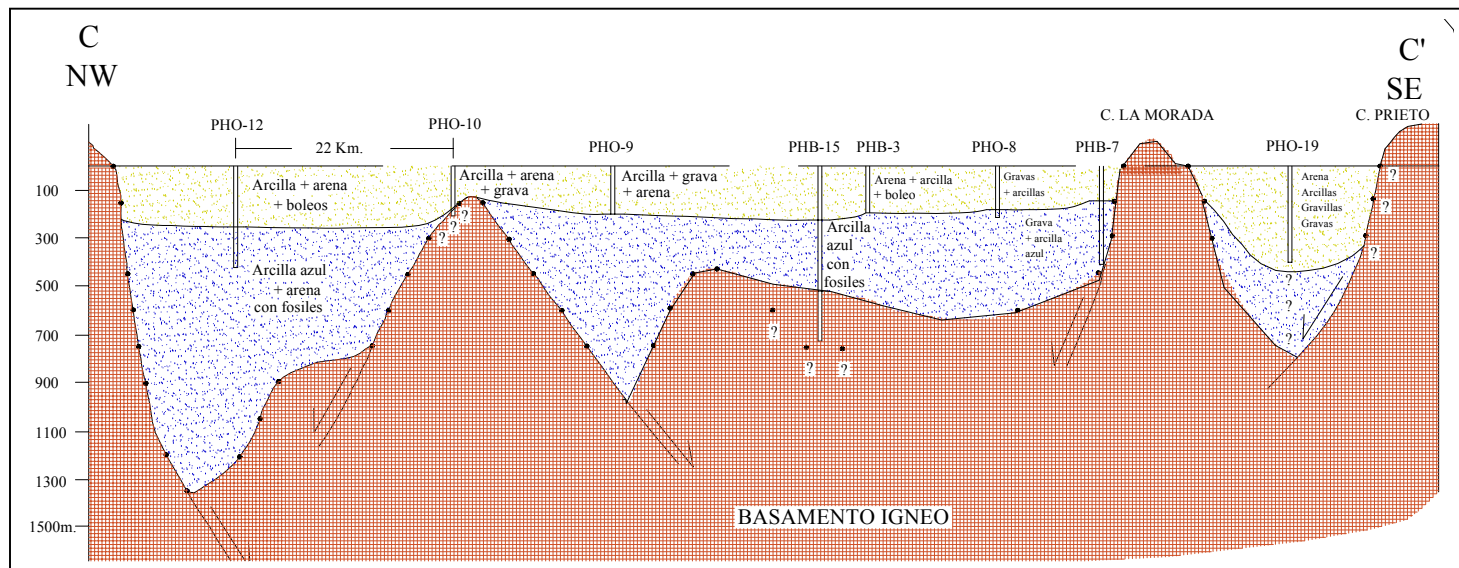


Figura 5.7 Sección hidroestratigráfica NW-SE sensiblemente paralela a la línea de costa (Modificado de Morales, M., en Monreal y otros, 2000).

5.5 Posicionamiento del frente de intrusión marina.

Con los registros de pozos se consiguieron medidas directas de resistividad del fluido, en 30 pozos localizados a lo largo de la zona costera afectada por intrusión. Con la resistividad del medio saturado y obtenida por la técnica indirecta de Sondeos Electromagnéticos (TEM o TDEM), se configuraron planos a profundidades de 50 y 100 metros, respectivamente, para cada parámetro. Los resultados muestran que la resistividad del fluido, para diferentes concentraciones de sólidos totales disueltos y en específico para el área de estudio, obedece a una ecuación lineal de la forma (Monreal y otros, 2000):

$$Y = Mx + B, \text{ donde:}$$

Y = Conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

M = Pendiente de la recta.

X = Sólidos Totales Disueltos (STD) en ppm.

B = Ordenada al origen.

El factor M determinado fue de 1.312, mientras que el valor para B fue de 27.915. La Figura 5.8 ilustra la distribución de STD: en azul, valores menores e igual a 1000; en verde, entre 1000 y 10,000 mg/lit (prácticamente ésta define la zona de transición o interfase); en amarillo, mayores a 10,000.

Con base en lo anterior el rango de resistividad de las aguas más comunes pueden mostrar valores de:

- Aguas superficiales
10 - 20 Ω - m.
- Agua de mar
0.2 Ω - m.
- Agua salobre
1 - 10 Ω - m.
- Agua de acuíferos aluviales
> 10 Ω - m.

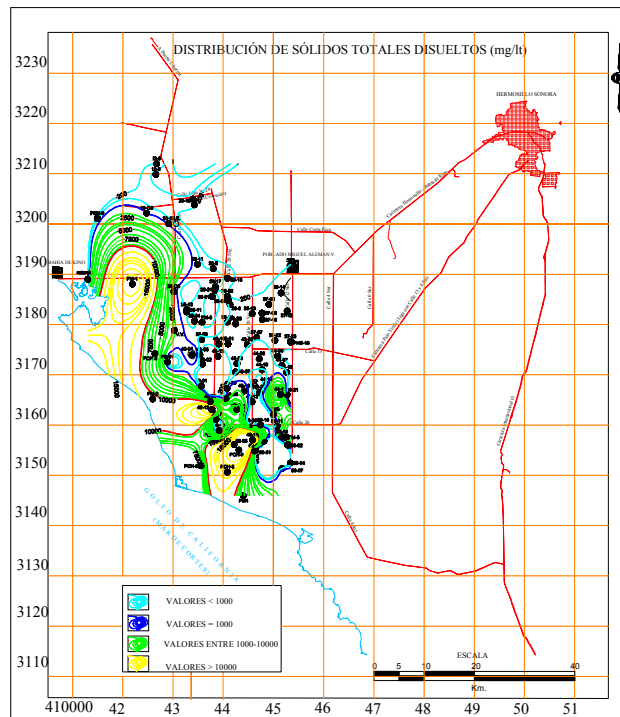


Figura 5.8. Distribución de STD. En azul, valores menores e iguales a 1000 ppm; en verde, de 1000 y 10,000 ppm, zona de interfase; en amarillo, mayores a 10,000 ppm (Modificado de Monreal y otros, 2000).

La resistividad ubica, con estos intervalos, al agua salobre como aquella que muestra valores inferiores a 10 Ω - m. La Figura 5.9 muestra el comportamiento del fluido a los 50 metros de profundidad; se pueden observar claramente una serie de conductos preferenciales de acceso del agua de mar hacia el continente. La zona más

frágil se ubica entre el estero El Cardonal y Tastiota, lo cual coincide perfectamente con la información arrojada por la gravimetría y el control estructural del basamento.

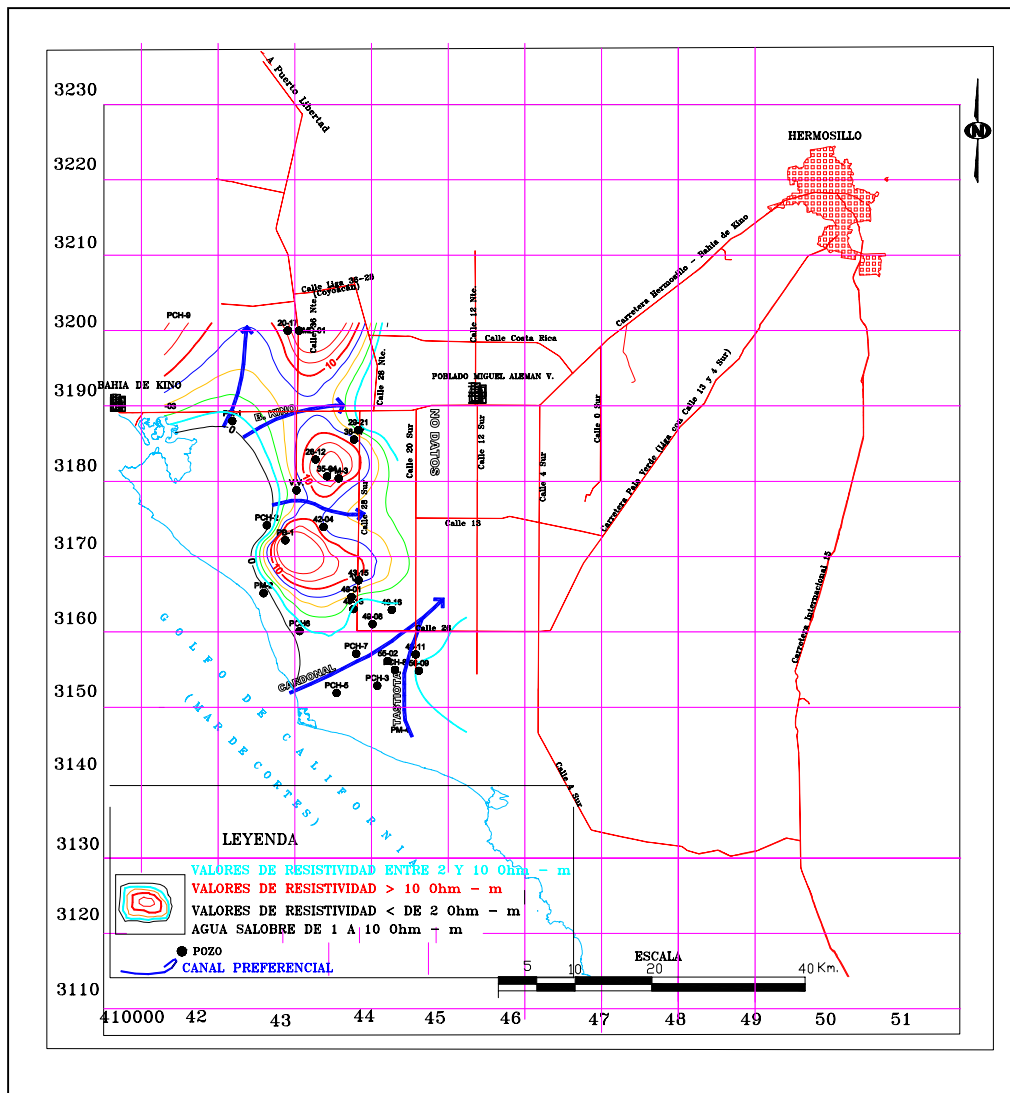


Figura 5.9 Distribución de resistividad del fluido. Las flechas muestran los canales preferenciales.

Al comparar este plano con el de la resistividad del medio (TEM's) realizado por GIGSA (1999), se aprecia que los valores de resistividad del fluido inferiores a los 10 Ω -m corresponden también con zonas por debajo de 10 para el medio saturado. Igualmente se observan lenguas que coinciden con los canales mostrados del fluido. La ubicación perpendicular y longitudinal de la red de 410 sondeos TEM, permite definir en forma tridimensional la configuración del frente de intrusión marina y las condiciones de su migración. De igual manera, al retomar la información de los SEV's existentes realizados para la zona de la costa (op cit.), se obtiene una configuración secuencial del avance de la intrusión marina para los años 1978, 1990 y 2001 (Figura 5.10).

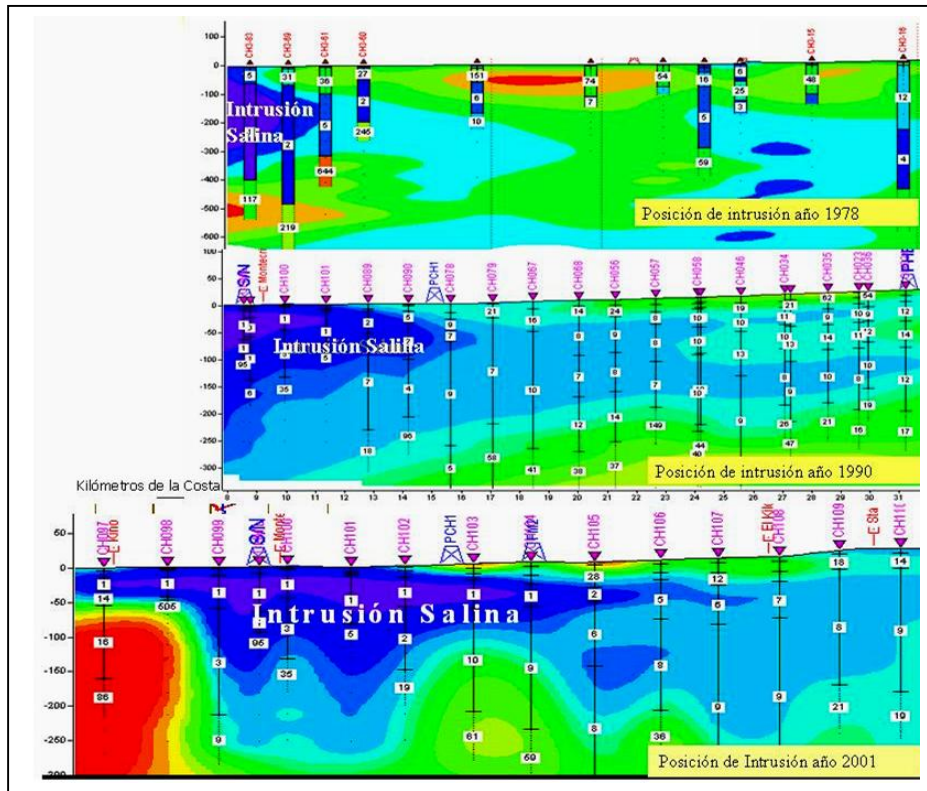


Figura 5.10 Avance de la intrusión marina en la Costa de Hermosillo. Los perfiles muestran las lenguas de penetración para los años 1978, 1990 y 2001. En los cuadros se presentan las resistividades (Modificado de Monreal y otros, 2000, 2001).

Los sondeos Transitorios Electromagnéticos (TEM) mostraron una distribución del subsuelo en términos de su caracterización resistiva. Debido a su gran resolución vertical, es posible obtener una imagen lo más real posible de las condiciones del subsuelo, tal como se muestra en la figura 5.11, que precisa los frentes de intrusión marina hacia el continente (Monreal y otros 2000). Los Sondeos Eléctricos Verticales distribuidos en la misma área, son consistentes con el desarrollo de canales preferenciales de intrusión marina hacia el continente a lo largo de tres vías principales localizadas: la primera a la altura del estero de Bahía Kino, la segunda a la altura de El Cardonal y la tercera a lo largo del estero de Tastiota (Monreal y otros 2000, 2001). Estos canales preferenciales (Figura 5.12) se caracterizan por una caída abrupta en la distribución espacial de los valores de resistividad, debido al fuerte contraste de propiedades eléctricas encontradas en medios saturados con agua salada (valores de resistividad inferiores a los 2Ω - metros).

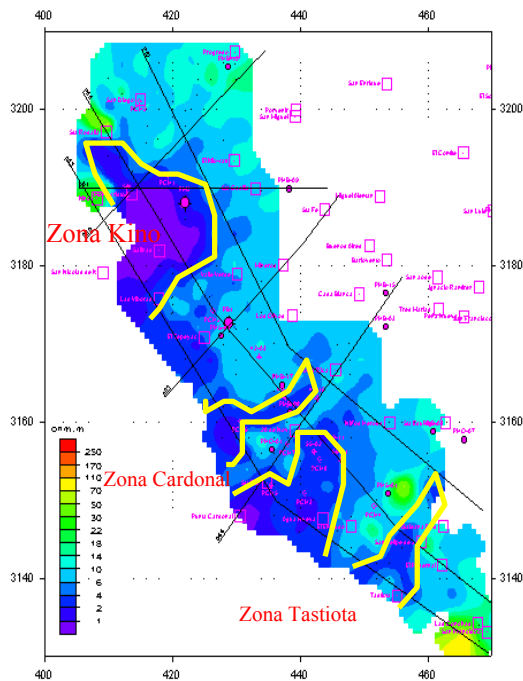


Figura 5.11 Mapa de resistividad para elevación -50m (Tomado de Monreal y otros, 2000).

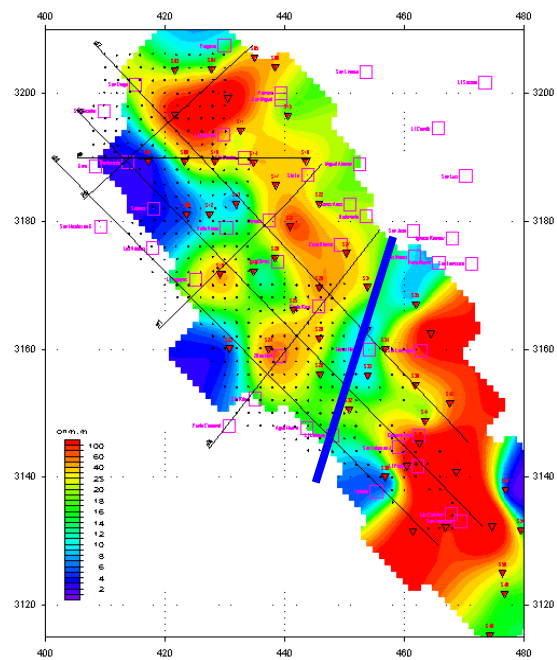


Figura 5.12. Mapa de resistividad obtenido por SEV, para elevación -100m, que muestra los canales preferenciales en color azul. Los puntos indican ubicación de los TEM (Tomado de Monreal y otros, 2000).

5.6 Conclusiones de la geofísica aplicada en la Costa de Hermosillo.

Las zonas resistivas que se observan y que indican agua de buena calidad en áreas pequeñas de la costa, han sido, son y serán paulatinamente envueltas por el avance de la intrusión marina, según lo muestra el comportamiento de la migración del frente de intrusión (ver Hidrogeoquímica).

A la profundidad de 100 metros, el comportamiento es muy semejante al mostrado a 50 m; se observan los mismos canales preferenciales y una reducción considerable en los resistivos. Los valores de resistividad se mantienen por debajo de los 10 Ω - m, indicando saturación con agua salobre-salada. Esto fue corroborado con muestreo discreto de 32 pozos abandonados y con la corrida de registros de conductividad eléctrica vertical en cada pozo (ver Hidrogeoquímica).

Los materiales del subsuelo cortados por los pozos de monitoreo, bombeo y observación, muestran, de acuerdo con las descripciones litológicas y los registros geofísicos respectivos de CIGSA (1999), una alternancia más o menos rítmica de arenas arcillosas, arcillas arenosas y escasas gravas-boleos, que presentan un espesor para la zona no saturada del orden de 10 a 70 metros hasta la altura de la Calle 28 (a unos 36 km de la línea de costa) y para la zona saturada el espesor varía entre 90 y 150 metros, según la profundidad explorada por los pozos de monitoreo-bombeo.

Las unidades geoelectricas identificadas sobre el perfil de resistividad U1, U2a, U2b, U3a y U3b, mostrado desde el punto de vista geológico, constituyen una unidad litoestratigráfica única que corresponde a materiales granulares con cambios laterales de facies que explican la variación del comportamiento de la resistividad. En esta unidad se aloja el acuífero de la Costa de Hermosillo y alcanza un espesor máximo de 300 metros en este perfil, a la altura del pozo profundo PHB-17. (Figuras 5.4).

La unidad geoelectrica identificada como U4 corresponde con la llamada "arcilla azul", depositada en ambiente marino en tiempos del Mioceno. Se puede observar, según información de los pozos PHB-17 y PHB-15, que la cima de esta unidad inicia alrededor de los 250 metros en el pozo PHB-15 y presenta espesores que varían de 350 a más de 600 metros. En ambos casos, descansa sobre basamento ígneo. La unidad geoelectrica representada por U5 corresponde al basamento ígneo y es la unidad litoestratigráfica, desde el punto de vista geológico.

5.7 Zona Siete Cerros

La zona de Siete Cerros es especialmente interesante dado que constituye una porción del acuífero, hacia la entrada al área del gran cono de abatimiento. Esta zona tiene una geometría muy estrecha y por ello, con base en experiencias exploratorias del pasado, fue descartándose perforar fuera de una franja de aproximadamente 11 km de anchura, sin entender bien cómo estaba la estructura del subsuelo. El esquema tridimensional (Figura 5.13) indica que el acuífero en esa región está rellenando una fosa en sentido Norte-Sur, la cual tiene dos continuidades, una hacia el noreste (acuífero La Manga) y otra al Este, rumbo a Hermosillo. En la figura se sugiere el posible paleocauce del río Sonora, ruta que es consistente con la hidráulica del sistema, pues sobre ella se asientan los más altos valores de conductividad hidráulica del acuífero.

Perfil Hermosillo-Siete Cerros. Tiene una extensión longitudinal aproximada de 51.5 Km, con orientación NE-SW, siguiendo el cauce del río Sonora; inicia en la presa Abelardo Rodríguez y finaliza en Siete Cerros. Cuenta con 78 estaciones (incluyendo la estación base) divididas en dos partes: de la P1 a la P53, con una separación inicial de 500 metros, y de la P0-2 a la P23-2, separadas por 1000 metros.

Hernández (2003) realizó tres secciones gravimétricas con longitud total de 53 km; éstas definieron muy claramente la constitución del basamento en la zona, además de caracterizar al medio físico con SEV's. Como resultado obtuvo la geometría de las fosas que se encuentran entre Hermosillo y Siete Cerros, lo que confirmó la anchura del acuífero. La figura 5.13 muestra la sección C. El Águila-C. El Gorgus.

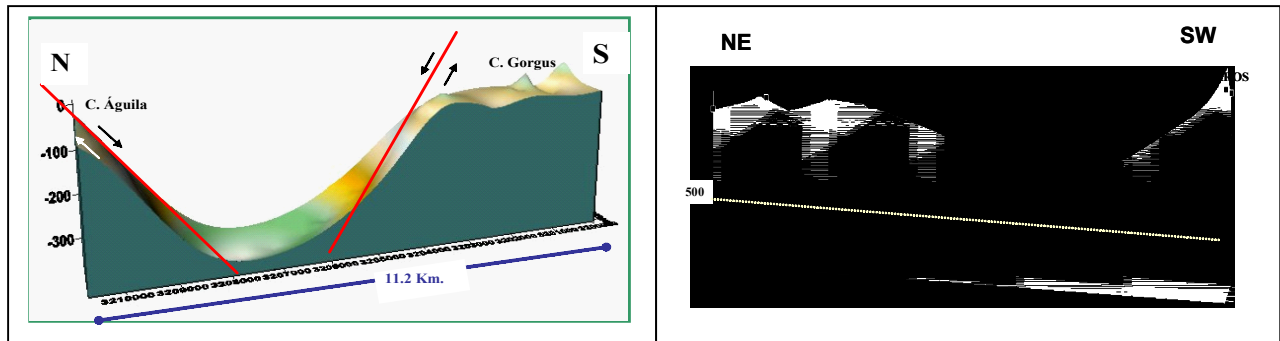


Figura 5.13 Configuración tridimensional del basamento; sección El Águila-El Gorgus (Hernández, 2003).

Las mayores profundidades al basamento se observan al final de la sección, cerca de Siete Cerros, donde alcanza hasta 1,500 metros. Como punto de control está el Pozo PHB-13, localizado aproximadamente a un kilómetro de distancia, donde el basamento fue cortado a 1086 metros. En esta sección podemos observar claramente las estructuras Basin and Range (Figuras 5.14, 5.15).

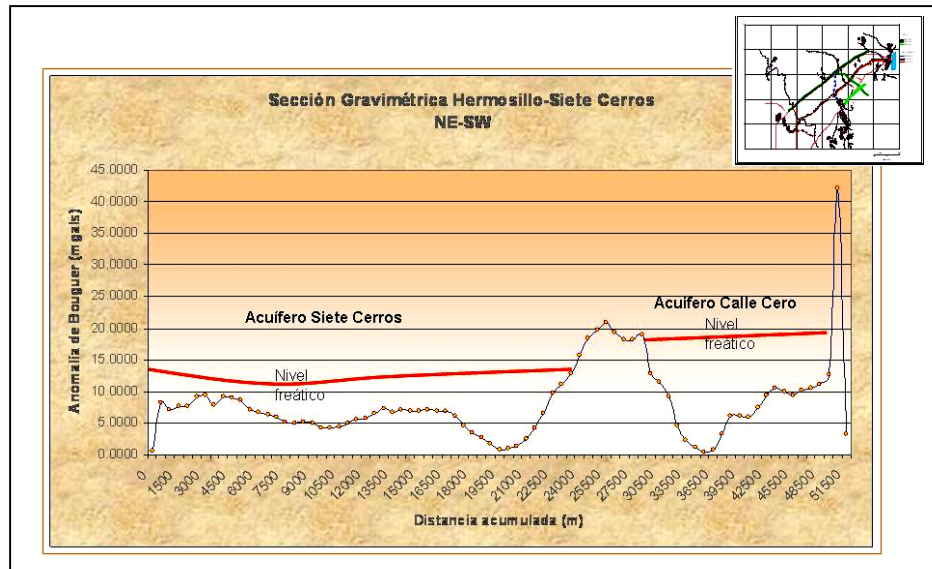


Figura 5.14 Perfil gravimétrico NE-SW y posición relativa del nivel freático, entre Hermosillo y Siete Cerros (Modificado de Hernández, 2003).

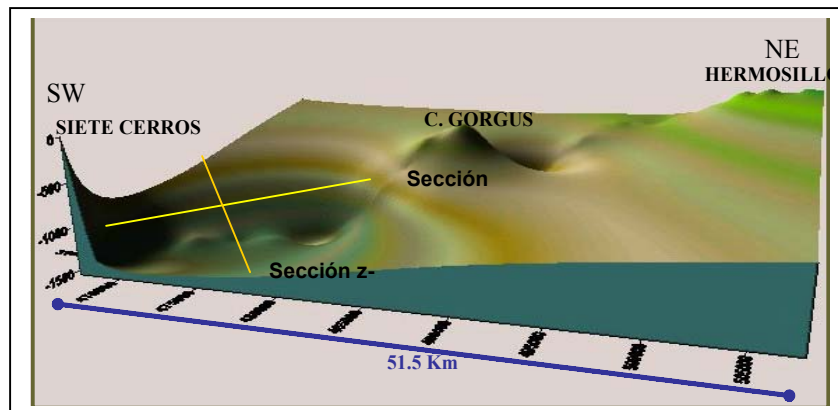


Figura 5.15 Configuración 3D del basamento sección Hermosillo-Siete Cerros. Viendo al NW (Modificado de Hernández, 2003).

Las estructuras tienen una gran influencia en el área ya que modelan la forma de las fosas y por consiguiente la potencia del relleno sedimentario.

5.8 Propiedades hidrogeofísicas del medio.

Desde el punto de vista hidrogeológico y considerando la posición actual del nivel freático en el área, la mejor zona se ubica a lo largo de esta fosa, donde se tiene un espesor saturado medio de 250 metros; aunque, como se ha mencionado, la anchura se reduce rápidamente. Así lo mostró la sección geoelectrica z3-1 (Figura 5.16). Hacia el extremo NE del perfil, la zona saturada se reduce considerablemente presentando espesores inferiores a los 50 metros. Hacia el sur de la fosa, área del establo La Habana, se ubican algunos de los pozos agrícolas con los mejores caudales (> 100 l/s). La zona vadosa se caracteriza por presentar variaciones laterales rápidas en el comportamiento de la resistividad con valores mínimos de $23 \Omega\text{-m}$ hasta máximos de casi $300 \Omega\text{-m}$.

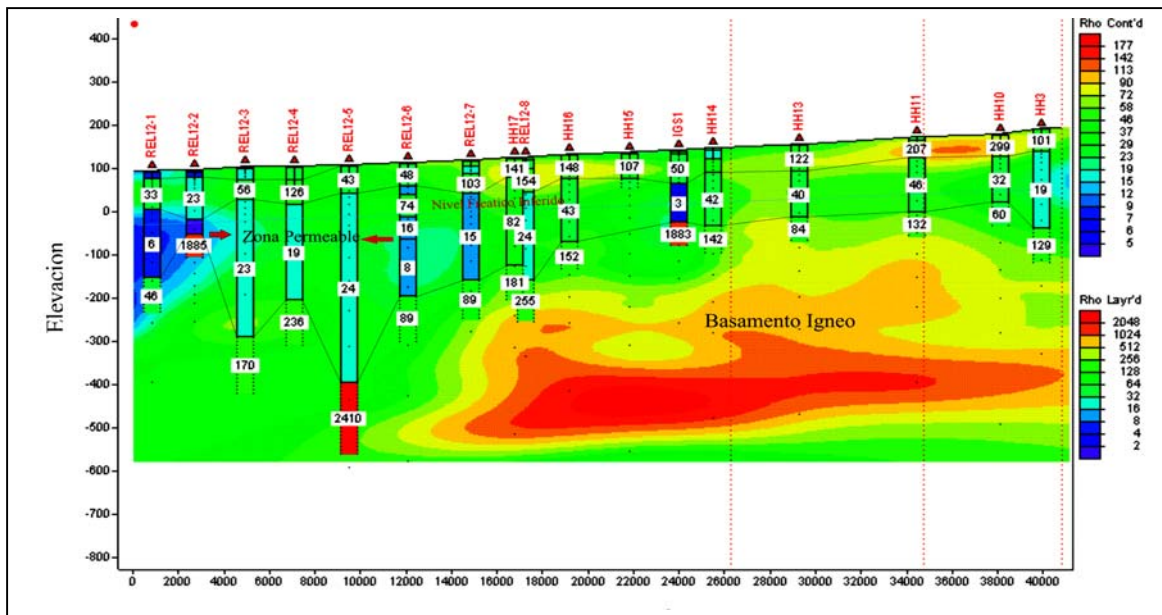


Figura 5.16. Sección geoelectrica z3-1, en dirección SW-NE (Modificado de Monreal y otros, 2001).

La sección z3-2, con orientación general casi norte-sur, tuvo una longitud total de 48 km; su posición sobre la fosa Siete Cerros se muestra en la Figura 5.17. Los 14 SEV's tuvieron espaciamentos variables, alcanzando al norte el basamento rocoso; la profundidad a su cima resistente varía desde 70 m hasta un máximo de 500 m, y en sitios específicos excede esta última, aparentemente. Este relieve rocoso está cubierto en parte por la arcilla azul, o bien por una arcilla residual que se detecta en la zona del cauce del río Sonora, donde el acuífero presenta los mejores valores de resistividad ($88 \Omega\text{-m}$). Hacia el extremo sur del perfil, en el área El Tojungo, el medio saturado presenta una resistividad del orden de $8 \Omega\text{-m}$, característica de terrenos arcillosos. En esta zona existen caudales de extracción bajos de 1 l/s y transmisividades de $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Aunque la zona saturada presenta espesores potentes, la resistividad indica condiciones de baja permeabilidad, lo cual se comprueba en el aforo del pozo profundo PHB-14 con un gasto de 14 l/s. La zona vadosa presenta resistividad altamente variable con mínimos de 7 Ω -m a máximos de 300 Ω -m, que evidencia rápidos cambios laterales de facies. En esta zona la profundidad al nivel freático es mayor a 100 metros, y la fuerte anisotropía en el espesor de la zona saturada a lo largo de la sección hace cada vez más difícil y costosa la extracción del agua subterránea, lo que provoca el abandono paulatino de los campos agrícolas.

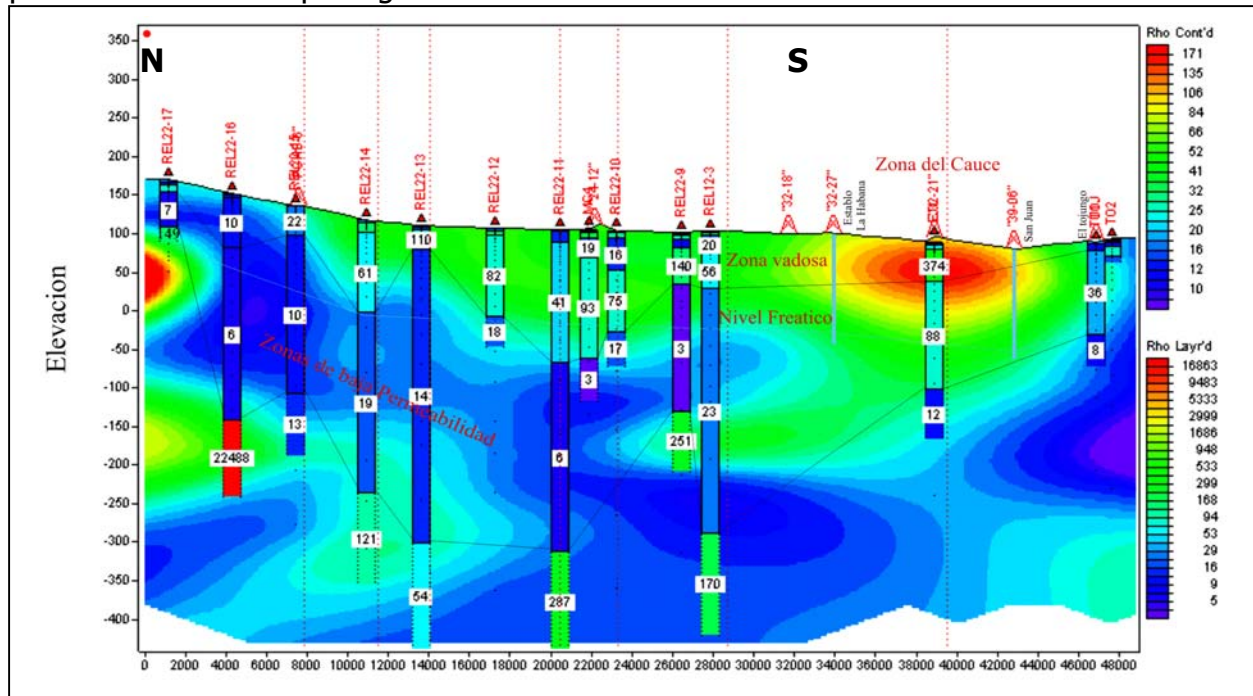


Figura 5.17. Sección geoelectrónica z3-2, con dirección N-S. Nótese las resistividades sobre la zona del antiguo cauce del río Sonora (Modificado de Monreal, 2001).

5.9 Análisis de resultados.

En conclusión, la aplicación de las diferentes técnicas geofísicas aporta y permite definir una nueva regionalización de acuíferos cuyas zonas ocupan cuencas limitadas estructuralmente. De igual manera fueron de gran utilidad para plantear en una zona intrusionada un modelo hidrogeológico en tres dimensiones, donde las condiciones son particularmente extremas para la aplicación de métodos de corriente continua, como el del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), debido a la dificultad que presentan las líneas de corriente para cruzar estratos altamente conductores en zonas invadidas por agua de mar, o bien problemas de una alta resistencia de contacto por las arenas secas que hacen de esta técnica una tarea compleja (Zohdy et al., 1974). Estas aparentes desventajas de la técnica del SEV fueron salvadas con la utilización de sondeos electromagnéticos o TEM (Time Domain Electromagnetic), donde se utiliza un fenómeno de inducción electromagnética y no necesita contacto galvánico como el SEV.

Esta aplicación fue útil para mostrar una distribución del subsuelo en términos de homogeneidad, basados en la caracterización resistiva, donde es posible observar las heterogeneidades o zonas anómalas provocadas por estructuras geológicas, cambios de facies, fracturamiento de las rocas, y la presencia del agua de diferentes salinidades que provocan cambios importantes en la resistividad, que es el parámetro de campo medido.

Lo anterior permitió determinar, igualmente, el espesor de la capa de agua dulce y, en un objetivo particular, la pluma de intrusión que forma la zona de transición o interfase; se encontró que no existe una relación entre el espesor de la interfase y el espesor del acuífero, y que en algunos casos la zona de transición puede resultar de mayor espesor, lo que se sitúa en concordancia con la teoría de Ghyben-Herzberg, que postula que si la zona de transición es grande, el espesor de agua dulce se reduce.

Otro resultado de la aplicación de las técnicas geofísicas en un acuífero costero se relaciona con las fluctuaciones cerca de la línea de costa, donde es común que sean mayores y así se extiende la zona de transición y, en contrapartida, comúnmente lejos de la costa la zona de transición se reduce; esta zona de transición es una mezcla de agua salada y agua dulce, que se mueve con dirección al mar; la mezcla se debe al proceso de difusión, de manera que la salinidad se incrementa con la profundidad (Zohdy et al., 1974). Este criterio se observó diferente para la región de estudio, pues, utilizando la medición de la Conductividad Eléctrica Vertical (CEV) en pozos, se encontró que en un acuífero costero, además de la condición de incremento de la salinidad con la profundidad, existe la estratificación de salinidades y el espesor continuo de agua salobre desde el nivel freático. Entonces la relación entre la salinidad y la profundidad de la zona de transición se modifica con este resultado, ya que Urish et al. (1990) propusieron en Rhode Island, Estados Unidos, que en el punto donde la salinidad es de 1000 mg/l de NaCl representaría una décima de la profundidad de la zona de transición (100 m). En el caso de este estudio, se asume que la variabilidad litológica es el elemento que actúa con su función textural para que la salinidad se incremente rápidamente o bien se reduzca para estratificarse, como se puede observar en las curvas de sondeos TEM y perfiles de CEV.

Finalmente, con la aplicación de las técnicas hidrogeofísicas se definieron siete zonas potenciales de recarga horizontal hacia el acuífero Costa de Hermosillo, diferenciando donde se ubica la descarga. Este resultado sirvió de apoyo para entender por qué las zonas acuíferas ubicadas en diferentes fosas actúan hidrodinámicamente independientes. De igual manera, con el cruce de los SEV's, la hidrogeoquímica y la isotopía se confirmó que la infiltración moderna y su ciclo dinámico dependen de la distancia entre los aprovechamientos y los paleocanales del río Sonora.

6. HIDROGEOLOGÍA

6.1 Introducción.

El acuífero de la Costa de Hermosillo está constituido por dos fases físicas principales que interactúan: el depósito de sedimentos y el agua subterránea. Los sedimentos, por su estructura, llenan tres funciones frente al agua subterránea: depósito, conducto y medio de cambios geoquímicos. El acuífero presenta, en respuesta a estímulos externos, tres variables: hidrodinámica, hidrogeoquímica e hidrobiológica. El acuífero es un sistema dinámico caracterizado por su configuración y su estructura, las funciones de su depósito y sus comportamientos. Su configuración y su estructura permiten distinguir tres tipos hidrodinámicos de acuíferos: libre, confinado (cautivo) y semiconfinado.

En el caso particular del acuífero de la Costa de Hermosillo, la información en general ha sido escasa sobre múltiples factores, pues a pesar del gran número de pozos existentes, se carece de información constructiva, cortes litológicos, registros eléctricos, pruebas de aforo, menos aún de bombeo. Solamente un 5% de unos 400 pozos cuenta con medidor y un 30% con tubo u orificio para introducir la sonda. Por ello, rescatar la caracterización del medio hidrogeológico a partir de 28 perforaciones efectuadas entre 1967 y 1968 por la Dirección de Aguas Subterráneas, a profundidades entre 200 y 1100 m, con información, permitió cumplir con su propósito de conocer mejor la litología y los límites de la arcilla azul, realizar pruebas de bombeo y observar el avance de la intrusión salina. Sin embargo, para esa época se infirió la existencia de uno o varios acuíferos inferiores confinados, a partir de la información piezométrica de los pozos profundos PHB-7, PHO-16, PHO-17 y PHB-15, y con este criterio, de dos acuíferos se construyeron 9 pozos centinelas de 200 m de profundidad (PCH's).

Lo anterior y los trabajos realizados permiten cumplir satisfactoriamente con el conocimiento de los factores que afectan a un acuífero intrusionado, definidos por Sherif (2003): el tipo de acuífero, su geología, el nivel freático o la carga piezométrica, la concentración del agua de mar, la densidad, las intensidades de lluvia y sus frecuencias, la cantidad y duración del abatimiento o la tasa de recarga natural, las características físicas y geométricas de los acuíferos, el uso de la tierra, las fronteras hidráulicas y geométricas, los efectos de la marea, las variaciones en presión barométrica, los maremotos, los sismos y las acciones del oleaje. Sin embargo, sobre la base de estudios anteriores (Monreal y otros, 2000 y 2001; Rangel 2000, 2000b, 2001, 2002, 2003), así como por los estudios geológicos y geofísicos realizados durante este trabajo, se conoció mejor el comportamiento hidráulico del acuífero con pruebas de bombeo y evolución piezométrica. Hay que considerar que, de 88 pruebas analizadas, sólo cuatro pozos registraron confinamiento, lo que permiten confirmar que el acuífero de la Costa de Hermosillo se comporta como de tipo libre.

6.2 Acuíferos de la región.

Los principales cursos de agua que drenan hacia la zona del acuífero Costa de Hermosillo son: (1) Al norte el arroyo Bacoachi, con un recorrido aproximado de 120 kilómetros, con escurrimientos intermitentes, en la época de lluvias, de julio a septiembre y de diciembre a febrero. (2) Otras tres corrientes se ubican al noreste de la Costa, son el Zanjón, San Miguel y río Sonora, en la región del valle del río Sonora; éstos confluyen en la presa Abelardo Rodríguez. El cauce del último atraviesa la ciudad de Hermosillo y penetra a la Costa por el Este, con una marca de drenaje imperceptible, o bien ocultada por la mancha urbana. Un poco más al sur se le une el arroyo La Poza. (3) Tanto al noreste como al sureste existen otras corrientes de menor importancia, cuyos aportes sólo se estiman en la medición de entradas horizontales, que se hace por redes de flujo (Figura 6.1).

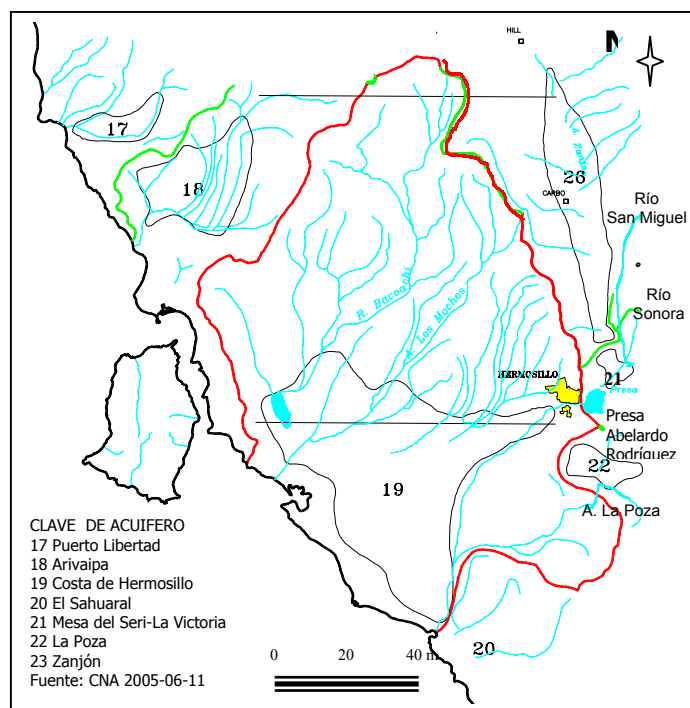


Figura 6.1 División administrativa de acuíferos en la región de la cuenca baja del río Sonora (CNA, 2005).

6.3 Piezometría histórica.

La piezometría histórica es expresión de la evolución del uso de un aprovechamiento de agua subterránea en el tiempo, utilizando el trazo de líneas equipotenciales. La Costa de Hermosillo sigue sobrebombándose y con intrusión salina considerable, a pesar de que se reglamentaron las extracciones (1963), se elaboró un reglamento de operación del Distrito de Riego 051 (1966), se estableció la dotación en forma volumétrica (1968), se trató por separado la perforación de pozos para uso pecuario exclusivo, se actualizaron las cuotas de acuerdo con los

volúmenes utilizados, no se permitió la perforación de pozos cercanos al mar y, finalmente, en 1993 se transfirió como título global la concesión a los usuarios del distrito para operar y hacerse responsables del recurso (Fimbres, 1999).

En este acuífero, las extracciones iniciaron en 1945 con 17 pozos; pero a partir de 1949, la deformación de las curvas equipotenciales registró un cambio abrupto (Arregín, et al., 1968). Desde este año, los volúmenes de extracción se incrementaron de 100 a 600 hm³ en 1956; la elevación media del nivel estático comenzó a descender bruscamente de los 10 metros sobre el nivel del mar hasta empezar a registrar niveles negativos poco antes de 1956 (Figuras 6.2 y 6.3).

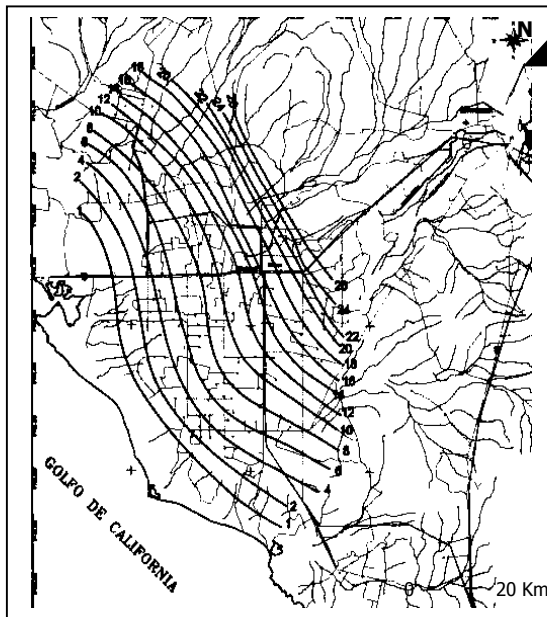


Figura 6.2 Piezometría para el año 1945 en el área de estudio (condiciones iniciales).

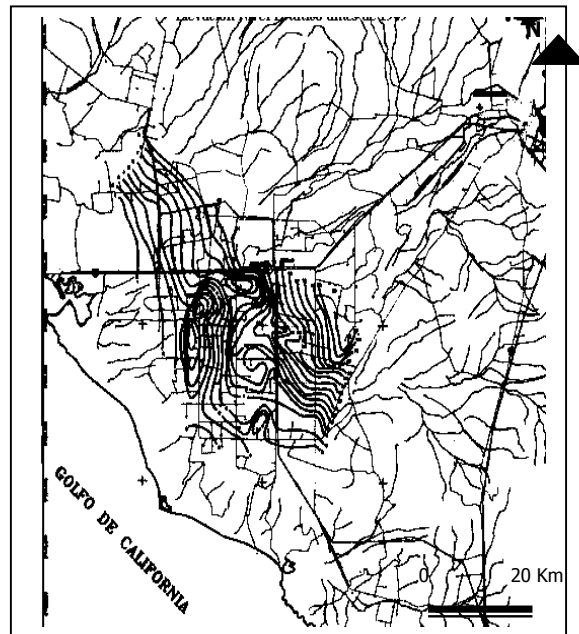


Figura 6.3 Piezometría para el año 1949.

El esquema original del flujo se representaba con las líneas equipotenciales perpendiculares a las líneas de flujo de noroeste a sureste, las cuales se trazan indicando el origen de la recarga al acuífero. Zonas de recarga ubicadas principalmente en la parte norte con el arroyo Bacoachi, al noreste con el río Sonora y el arroyo La Poza, y otras corrientes al noreste y al Este. A partir de 1950, la piezometría ya deja ver pequeños conos de abatimiento a la altura de la Calle 28 sur. Para 1955, estos conos se han ampliado; la curva cero se desplaza cerca de 15 kilómetros al noreste, lo que indica que la zona de mayor explotación coincide con la baja recarga al acuífero.

El incremento de las extracciones (hasta 1150 hm³ en 1966-67) definitivamente propició la inversión del flujo, y el cono de abatimiento mostró líneas equipotenciales de 25 metros por debajo del nivel del mar y la curva cero avanzó más de 45 kilómetros continente adentro con la misma dirección noreste

para llegar a la altura de Siete Cerros (Figuras 6.3, 6.4, 6.5, 6.6). Para 1990, a pesar de que las extracciones se redujeron por debajo de 500 hm³, los abatimientos continuaron en aumento, lo que se refleja en la piezometría, que registra curvas mayores de 50 metros por debajo del nivel del mar y la curva cero llegando a la calle Cero Sur; ello confirma el desequilibrio con la recarga del río Sonora. Asimismo se formó otro cono de abatimiento en la región norte del acuífero, 30 kilómetros arriba de la carretera a Bahía Kino, sobre la Calle 36 Norte, donde las líneas equipotenciales alcanzaron casi 20 metros por debajo del nivel del mar (Figuras 6.7, 6.8, 6.9).

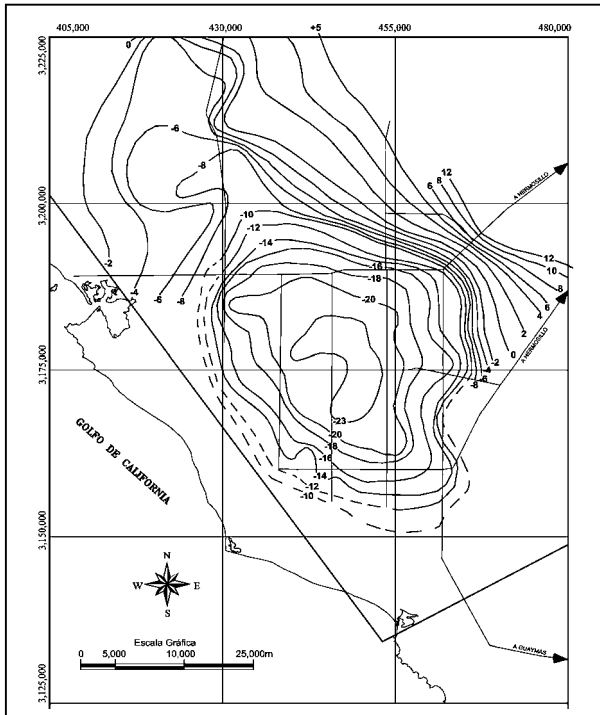


Figura 6.4 Piezometría para el año 1967.

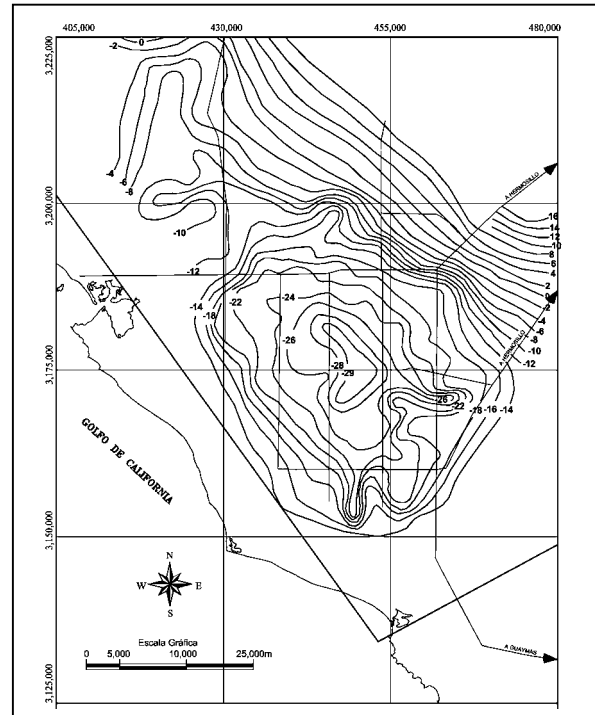


Figura 6.5.- Piezometría para el año 1970.

Hasta el año 2000, los abatimientos se incrementaron a un ritmo promedio de 1.20 m por año. Desde entonces a la fecha el descenso ha ido disminuyendo a 0.50 m en 2001, para colocarse en 0.29 m en 2004. El cono se colocó hacia la Calle 12 Sur y 13 transversal, donde los niveles rebasan los 65 metros por debajo del nivel del mar, y los 20 metros por debajo del nivel del mar al norte de la calle 36 Norte. Mientras tanto, se observan curvas de recuperación en zonas específicas, como respuesta a la intrusión de agua de mar propiciada por la inversión del flujo. Esta recarga se estimó en 98 hm³/año (Monreal y otros, 2000, 2001). La curva cero se mantiene, curiosamente, a la misma altura de la calle Cero Sur (Figura 6.10).

Con la información piezométrica se realizó el cálculo de la recarga total de agua dulce, la cual se estimó en 159.9 hm³/año, a diferencia de 350 hm³/año calculada por Ariel Construcciones (1968). El volumen de recarga proveniente del

mar sugiere que la posición del cono de abatimiento principal se mantiene prácticamente equilibrada con su profundidad máxima de 135 metros (65 metros bajo el nivel del mar), a una distancia de 32 km de la línea de costa desde 1999 (Figura 6.11).

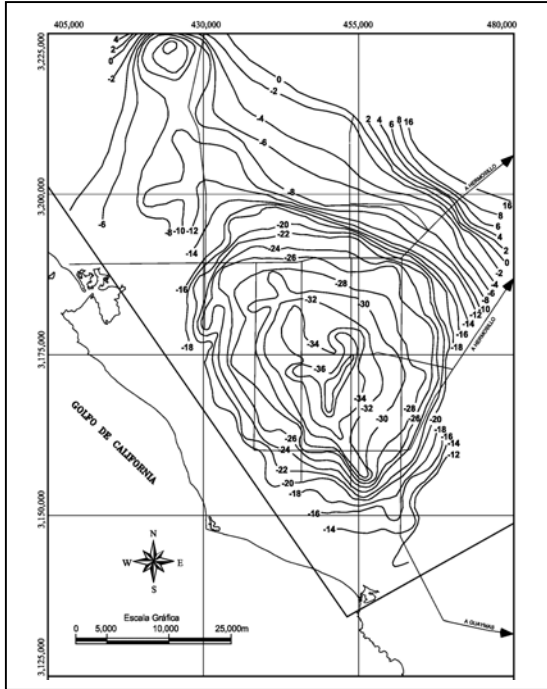


Figura 6.6. Piezometría para el año 1975.

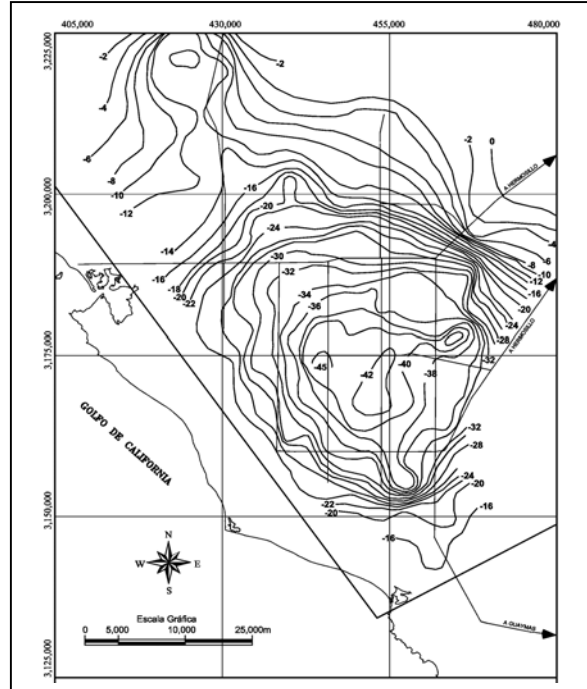


Figura 6.7. Piezometría para el año 1980.

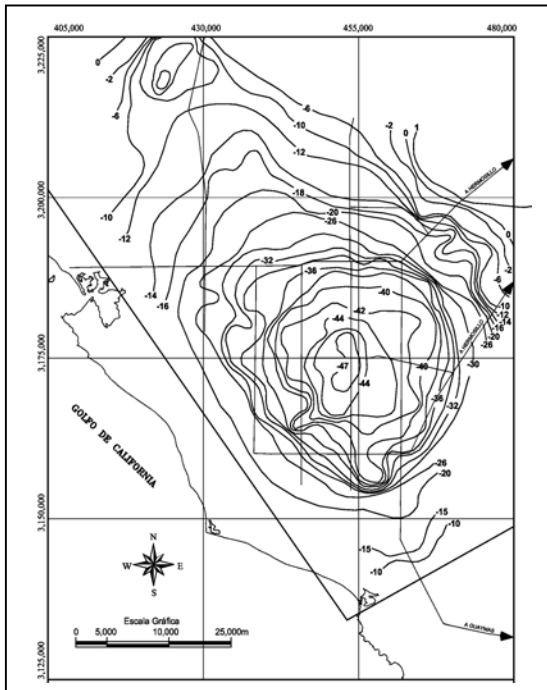


Figura 6.8.- Piezometría para el año 1985.

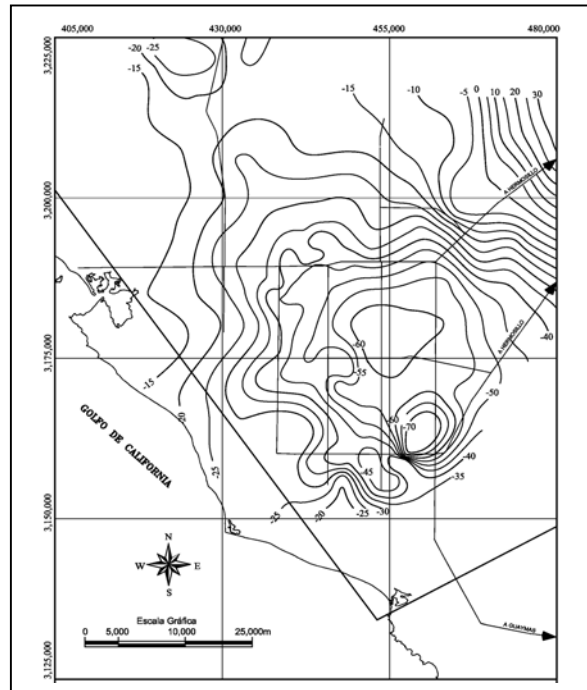


Figura 6.9 Piezometría para el año 1997.

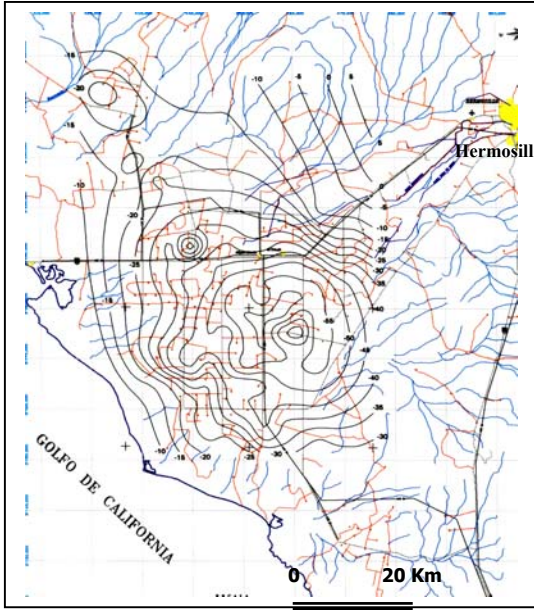


Figura 6.10 Piezometría para el año 2000 (Modificado de CNA, 2003).

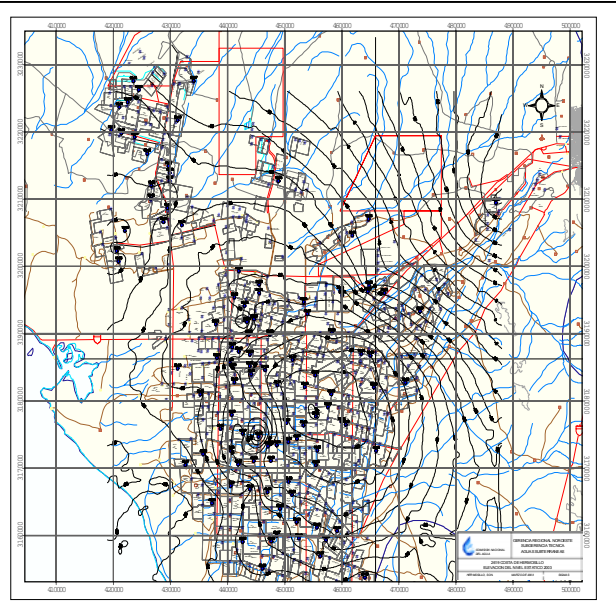


Figura 6.11 Piezometría para el año 2003 (Modificado de CNA, 2003).

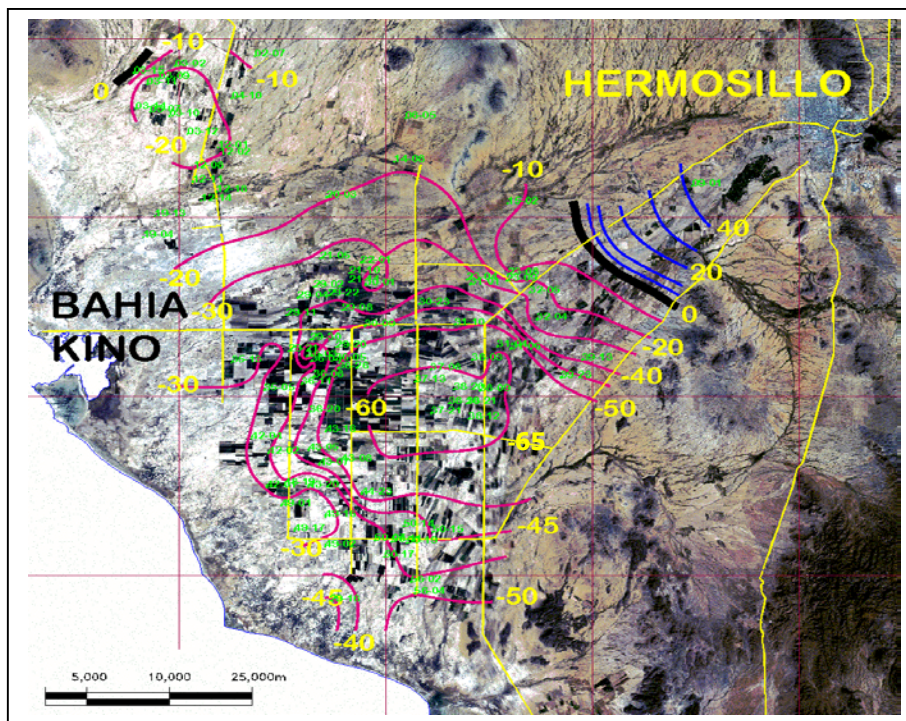


Figura 6.12 Piezometría actual en el acuífero Costa de Hermosillo. Nótese la posición de la curva cero.

La evolución para los años 2000-2001 registró rangos de entre -0.5 y 1.5 m, en una clara disminución del descenso típico de 1.09 m por año, a 0.5 m. Pero la evolución positiva se hizo más notoria como consecuencia de la recarga citada de

agua marina hacia el medio continental. La figura 6.12 muestra las evoluciones, en rojo las negativas y en azul las positivas.

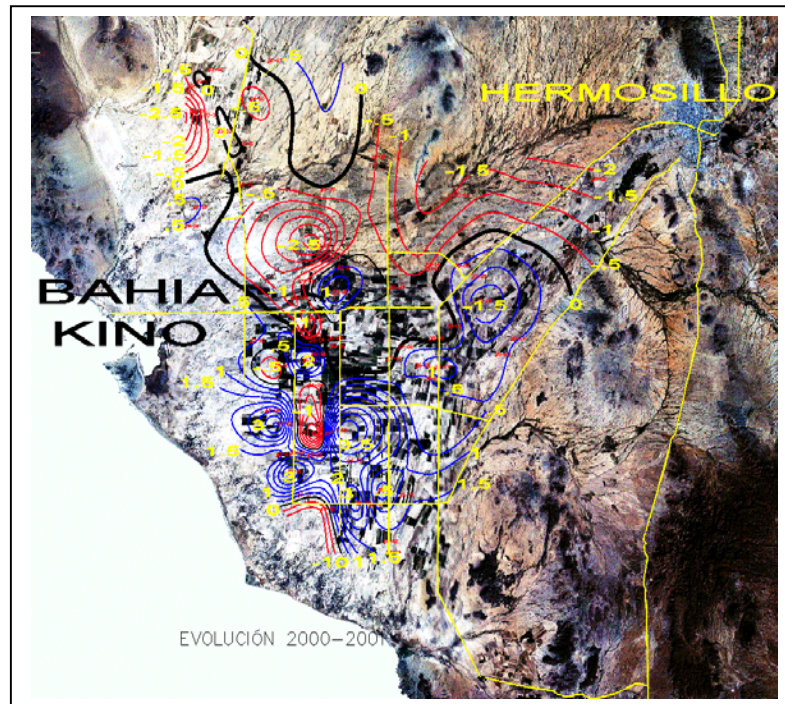


Figura 6.13 Evolución piezométrica 2000-2001 en el acuífero Costa de Hermosillo.

En la zona de Siete Cerros, la evolución varía entre 0.5 y 1.5 m/año, esto por el incremento de la extracción para esa zona. Actualmente la dirección del flujo es de noreste a suroeste, siguiendo la dirección del cauce del río Sonora, y existe en la confluencia del río Sonora y el arroyo La Poza una recuperación de los niveles del agua subterránea, como resultado del aporte de La Poza hacia la zona Siete Cerros. Este flujo está empezando a deformar sus equipotenciales por la extracción de la zona, y el descenso de la recarga proveniente del río Sonora, gradiente abajo de este sitio, está casi equilibrado, hasta antes de unirse a la inducción del acuífero de la Costa de Hermosillo (Figura 6.14).

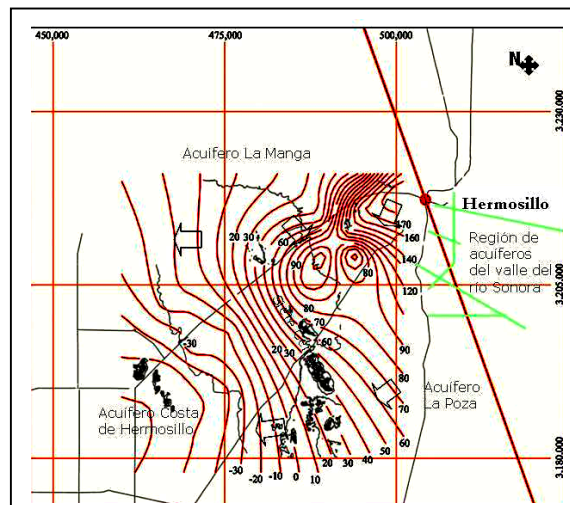


Figura 6.14 Detalle de la piezometría en la zona Siete Cerros 2003. Nótese la posición actual de la línea cero y la deformación incipiente de las curvas equipotenciales (Modificado de Hernández, 2004).

6.4 Comportamiento hidráulico del sistema.

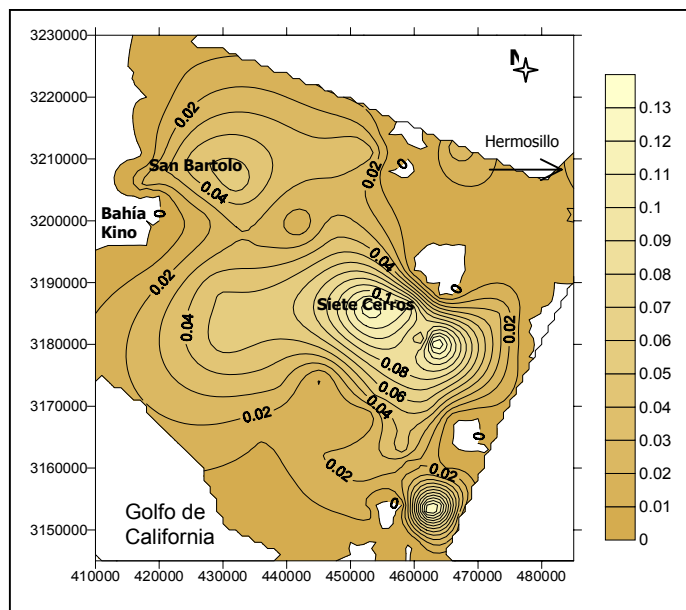
Los valores de transmisividad y conductividad hidráulica se ubicaron entre Hermosillo y Siete Cerros, así como al norte del acuífero de la Costa. Las transmisividades obtenidas en las pruebas son ejemplo del comportamiento total (Tabla 6.1). La distribución de isotransmisividades se muestra en la Figura 6.15.

POZO	COORD. X	COORD. Y	Transmisividad en m ² /s Abatimiento	Transmisividad en m ² /s Recuperación
Willard #1	516371	3198700	4.25 X 10 ⁻³	3.08X10 ⁻³
Hacienda de la Flor	505938	3215900	6.02 X 10 ⁻²	1.53X10 ⁻¹
Uni-Son Centro	503912	3217137	1.68 X 10 ⁻³	1.43 X10 ⁻³
Granja El Pollito	497001	3219715	3.94 X 10 ⁻⁴	3.43X10 ⁻⁴
Palo Verde	503283	3213323	6.78 X 10 ⁻⁴	
Yesca	493309	3208726	3.54 X 10 ⁻³	2.85X10 ⁻³
Yaco	492099	3210500	2.48 X 10 ⁻³	1.99X10 ⁻³
09-01	487015	3209417	1.9 x 10 ⁻²	
17-01	485139	3207308	2.02 X 10 ⁻²	1.97X10 ⁻²
39-05	467730	3181696	1.44 x 10 ⁻¹	1.36X10 ⁻¹
			1.25X10 ⁻¹	1.90X10 ⁻¹
Tojungo2	476221	3180659	1.25 X 10 ⁻⁴	9.88X10 ⁻⁵
Sayula	447533	3249958		6.62X10 ⁻⁴
Minera Nyco	463763	361355	2.08 X 10 ⁻²	
Vanessa	469178	3203761	5.36 X 10 ⁻²	
Pozo del Negro				1.03 X10 ⁻⁴
Noria del Negro			3.83X10 ⁻³	

Tabla 6.1 Valores de transmisividad de las pruebas por bombeo.

El resultado de la distribución muestra que los más altos valores se encuentran al centro y noreste del acuífero, con 7 a 10*10⁻² m²/s. En la parte media de la zona aparecen los niveles más profundos del cono de abatimiento y disminuye hacia el noroeste cerca de la línea de costa en Bahía Kino, donde la transmisividad varía de 5*10⁻³ a 6.9*10⁻² m²/s. Al suroeste del área la transmisividad oscila entre 2.5*10⁻³ y 3.5*10⁻² m²/s. En general se puede decir que los valores tienen una tendencia a disminuir cerca de la línea de costa y próximos a la laguna de San Bartolo, debido al mayor contenido de arcilla.

Figura 6.15 Distribución de transmisividades a partir de pruebas de bombeo.



6.5 Análisis piezométrico de Siete Cerros.

Las líneas equipotenciales en la zona de Siete Cerros muestran un comportamiento que sugiere las condiciones estructurales definiendo una falla; ésta se encuentra diferenciando las condiciones hidrodinámicas entre Hermosillo y de la calle Cero a Siete Cerros. La profundidad en el primer caso es somera, entre 8 y 20 m. La configuración piezométrica define el salto de la falla, y su respuesta al otro lado de la estructura es la profundización de niveles por debajo de 100 m (Figura 6.16). Las fallas definen los límites de fosas (ver capítulo 5) creando bloques, y la topografía del lecho del basamento está influenciada por ellas, de manera que al descender los niveles estáticos y estar más cercanos a la influencia de la estructura del basamento, pueden actuar como barreras al flujo de agua subterránea (Fetter, 2001). Utilizando la información gravimétrica que define el perfil del basamento con la anomalía de Bouguer, configurando en 3D (Figura 6.17) y utilizando además la configuración piezométrica 2003, se aprecia que responde con paralelismo, siguiendo prácticamente la topografía de la estructura del basamento. Adicionalmente, las características de los materiales sedimentarios que rellenan cada una de las fosas es distinto; una textura más gruesa y de mayor espesor en la zona de Siete Cerros proporciona más altos rendimientos en pozos y las mayores transmisividades, de $1.25 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ en la zona central sobre la ruta del antiguo cauce del río Sonora (capítulo 5) y de $3.54 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ al Este, cercano a Hermosillo en el ejido La Yesca. De igual manera, la alta conductividad hidráulica, al reducir los tiempos de residencia del agua en el acuífero, tiene una calidad baja en sales del orden de 250 mg/l (ver Hidrogeoquímica).

Además, si se considera que el descenso de niveles potenciométricos en la Costa de Hermosillo ha caído por debajo de la elevación de los pilares que separan a las fosas, el nivel general confirma por qué se ha diferenciado en cada una el comportamiento hidrodinámico.

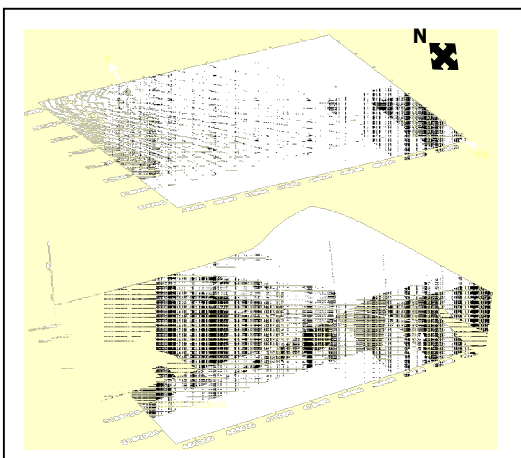


Figura 6.16 Configuración piezométrica 2003 en 3D, entre Siete Cerros, calle Cero y Hermosillo. Nótese la interpretación estructural (Modificado de Hernández, 2004).

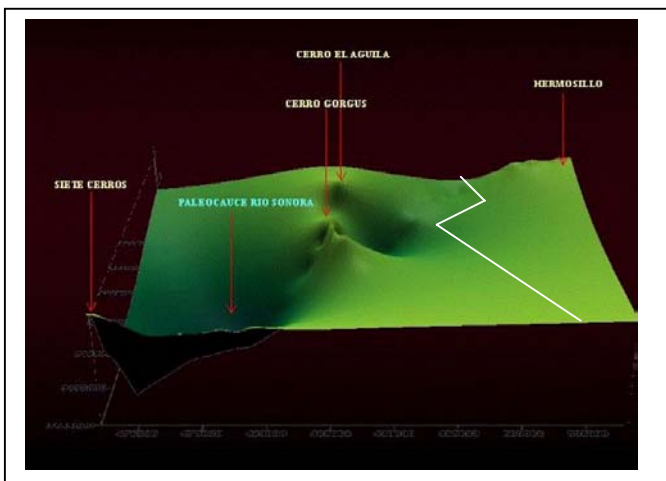


Figura 6.17 Imagen en 3D del basamento gravimétrico entre Siete Cerros y Hermosillo (Modificado de Hernández, 2004).

Un perfil gravimétrico entre Siete Cerros y Hermosillo define con mayor claridad la condición hidrogeológica descrita, al interpretar con la sobreposición de niveles estáticos para cada fosa y su separación hidrodinámica (Figuras 6.18 y 6.19).

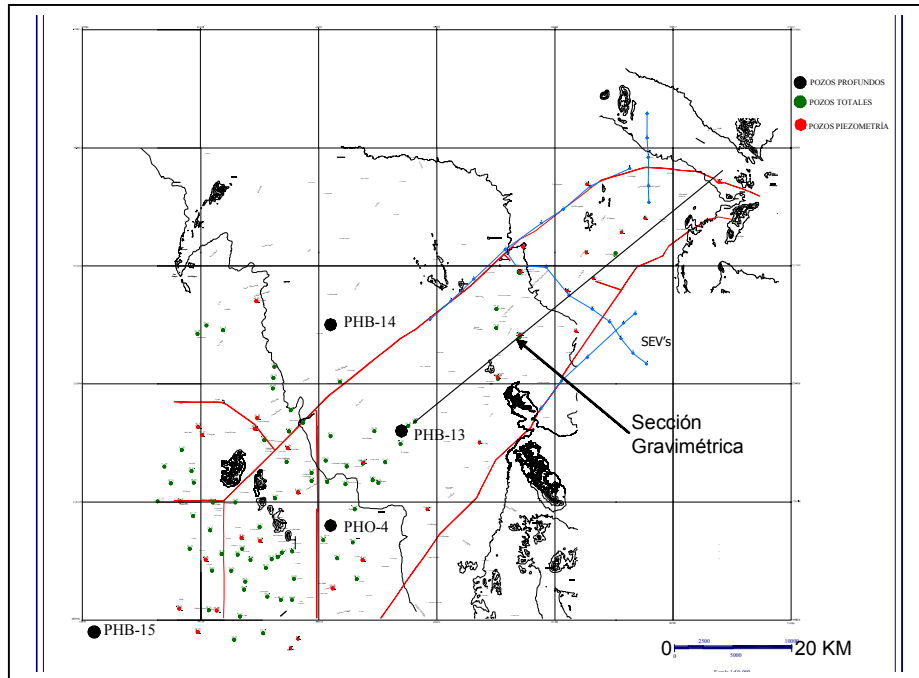


Figura 6.18 Localización del perfil gravimétrico entre Siete Cerros Y Hermosillo, mostrando la ubicación de pozos PHB-13, 14 (centro) y 15 (suroeste) y PHO-04 (Modificado de Hernández, 2003).

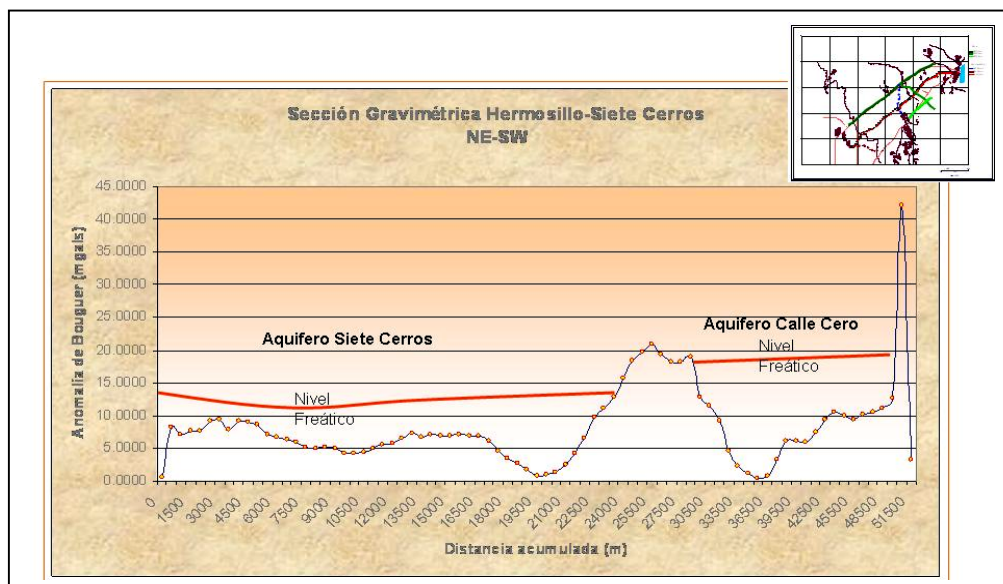


Figura 6.19 Perfil gravimétrico, representando la posición hidrodinámica para cada fosa o acuífero (Rangel, 2004).

7. CÁLCULO DE LA RECARGA

7.1 Balance hidrometeorológico.

Para realizar el balance hidrometeorológico, la estimación de la evapotranspiración real se considera la más representativa y de mayor peso para el cálculo de los volúmenes de agua que son trasladados a la atmósfera, ya que en su obtención se hace intervenir a todos los parámetros climatológicos. En consecuencia, a partir de ellos, los resultados se convierten en precipitación efectiva; es decir, el agua de lluvia que logra tener una participación en la recarga al subsuelo. En el balance de este estudio, las zonas que resultan positivas son aquellas donde pudiera existir un aporte de agua al subsuelo representando recarga, ya sea a lo largo de las corrientes superficiales intermitentes durante su escurrimiento luego de la precipitación, o bien a través de las relaciones que guarden éstas con la infiltración directa, las corrientes subsuperficiales y la recarga de frente de montaña (recarga de ladera) (Rangel, 1995).

Las zonas con un balance más cercano al equilibrio se encuentran en la planicie costera, y en general en la mayor parte de la cuenca baja y amplias zonas de la cuenca media. Estos resultados muestran que la humedad disponible no es suficiente para que exista una recarga local, dado que la precipitación es muy baja y el nivel freático es profundo. Lo anterior es consistente con la hidrología isotópica y las edades de agua subterránea, mayores a dos mil 500 años de haberse infiltrado en la Costa de Hermosillo (Rangel, 2000b).

Como resultado se observa que el área de estudio se encuentra por debajo del equilibrio en cuanto al aporte de una posible recarga por precipitación efectiva en las zonas bajas, es decir su balance es negativo. Sin embargo, es posible interpretar que existe una porción de recarga natural por agua de lluvia de ladera, la cual es recibida a través de infiltración directa en el piedemonte y otra pequeña parte por corrientes subsuperficiales de los subálveos de arroyos y ríos, principalmente en la zona de Siete Cerros. La recarga original tiene su origen en las mayores elevaciones topográficas, donde la evapotranspiración es menor y existe mayor precipitación efectiva.

7.2 Recarga en acuíferos del valle del río Sonora.

En esta zona, la recarga por escurrimiento se presenta próxima al río Sonora, principalmente durante dos períodos, en agosto-septiembre y febrero-marzo, y puede ser: 1) inmediata y reflejarse en el cauce como ascenso del gasto base y en pozos y norias de las zonas adyacentes al subálveo del acuífero de La Victoria, o 2) tardía en los acuíferos profundos de la Mesa del Seri.

Como parte del proceso, se calculó la precipitación efectiva para cada una de las estaciones de la cuenca del río Sonora (Figura 7.1): Esto permite determinar de una manera cualitativa y cuantitativa el volumen infiltrado para cualquier estación de las zonas alta, media y baja de la cuenca. Las zonas con precipitación eficaz o efectiva

positiva es en donde pudiera existir un aporte de recarga al subsuelo, ya sea a lo largo de las corrientes superficiales intermitentes durante su escurrimiento o a través de las relaciones que guarden éstas con la infiltración directa y las corrientes subsuperficiales; así, el agua que llega a escurrir por la superficie del terreno puede volverse a infiltrar aguas abajo (Samper, 1997). Para determinar el área de influencia de cada estación se elaboraron los polígonos de Thiessen y con ellos se calculó el volumen precipitado. En la Figura 7.1 se muestran los valores calculados de la precipitación efectiva, donde se observa que hay números positivos y negativos; el máximo valor calculado es de 39.39 mm por año para la estación Bacanuchi en la cuenca alta, mientras que el mínimo valor es de 2.2 mm por año para la estación El Cajón, que es la salida de la cuenca media.

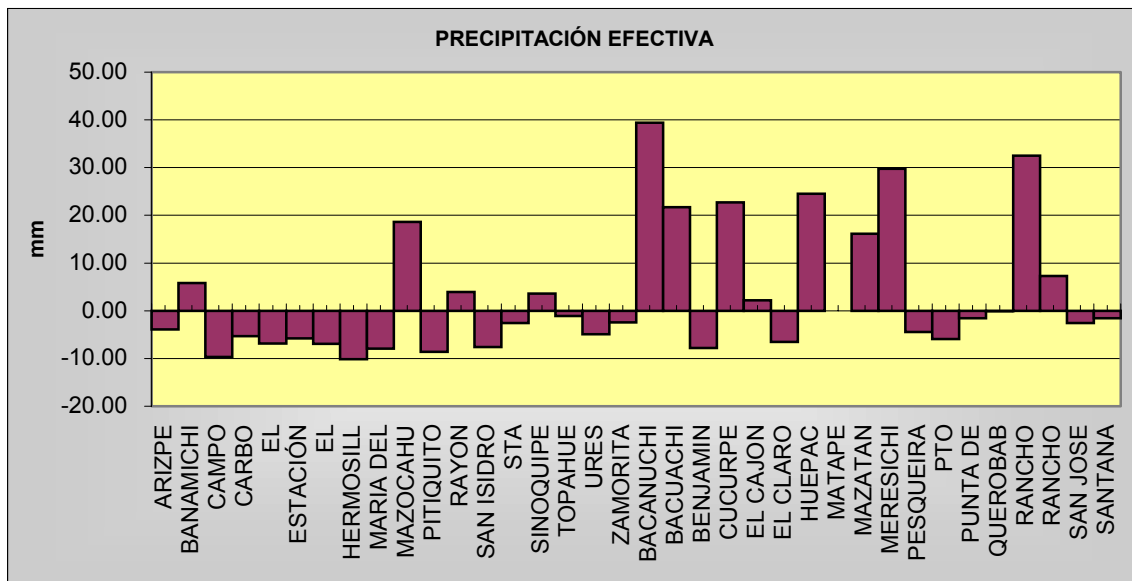


Figura 7.1 Precipitación efectiva calculada para cada estación climatológica de la cuenca del río Sonora.

Los valores positivos corresponden a zonas potenciales de recarga y, viceversa, los valores negativos corresponden a zonas con deficiencia de humedad. Esto define que la fuente primaria de recarga es la del frente de montaña. En un mecanismo en el que el agua se infiltra en la zona de ladera que se extiende hasta los valles, la cual fluye hacia abajo a través de la zona no saturada por una banda paralela al frente de montaña. La infiltración se realiza en los sedimentos gruesos no consolidados. Como resultado, el balance hidrometeorológico indica que las zonas de mayor recarga potencial se encuentran en las partes alta y media de la cuenca, en las localidades de Arizpe, Huépac, Banámichi, Mazocahui, Bacoachi, Rancho Aquituni, Meresichic, Cucurpe, Bacanuchi, Santa Rosalía, Sinoquipe y Rancho Viejo, El Cajón.

El volumen total que precipita en estas zonas de recarga, estimado por polígonos de Thiessen, es de 2,880 hectómetros cúbicos y, de ellos, la *precipitación efectiva* resultante para la cuenca es de 293 hectómetros cúbicos. Volumen que representa aproximadamente el 10% y que potencialmente forma parte de la recarga por infiltración directa por agua de lluvia hacia el subsuelo en la cuenca del río Sonora.

Respecto a la cuenca baja del río Sonora, donde se encuentra el área de estudio, todos los valores de precipitación efectiva son muy bajos, por lo que la infiltración local directa por lluvia en el acuífero de la Costa de Hermosillo es también muy baja a nula. Adicionalmente, los niveles piezométricos se encuentran a un promedio de 100 metros de profundidad, lo que reduce la probabilidad de alcanzar la zona saturada. Sin embargo, la entrada al sistema en estas zonas debe atribuirse más a la recarga inducida por el retorno de riego.

7.3 Recarga por agua de lluvia en el acuífero de la Costa de Hermosillo.

La estimación de la recarga por medio de balances de agua en regiones semiáridas y áridas es un tópico que presenta algunos aspectos inciertos, por lo que las técnicas de trazadores parece ser una de las opciones que ofrecen un potencial suficiente para estudios locales, en donde se requiere información puntual. Esta metodología comprende la estimación de la concentración media del ión cloruro en el agua subterránea, la precipitación media mensual en área de estudio y la concentración del ión cloruro en el agua de lluvia. La conceptualización matemática y la formulación general han sido usadas desde hace años y se mantienen vigentes (Eriksson, 1969; Sukhija, 1987; Edmunds, 1993; Abdulghaffar, 1995; Yong Wu, 2004). La técnica supone que: i) el cloruro se conserva y no existen fuentes adicionales de esta especie, diferentes a la atmosférica, ii) se conoce en detalle la zona de recarga del sistema analizado, iii) el volumen de precipitación en la zona de recarga puede estimarse apropiadamente, iv) se tienen estimaciones de la concentración de cloruros en la precipitación y en el agua subterránea en las inmediaciones de la zona de recarga.

Dado que se requiere de mucho tiempo para que se presente el flujo establecido, los únicos trazadores que se pueden utilizar son los naturales; dentro de ellos, el cloro es el más usado (Liu Beiling et al., 1994). Asumiendo que no hay otras entradas de trazador y que el agua y el trazador se transportan a la misma velocidad, se obtiene el balance del trazador entre la superficie y el nivel freático bajo la relación lineal:

$$rT_r = pT_p + f_d$$

Donde:

r = recarga media (L/T)

T_r = concentración media del trazador en la recarga (M/L³)

p = precipitación media (L/T)

T_p = concentración media del trazador en la precipitación (M/L³)

f_d = flujo de deposición de materia seca (M/L² t)

Entonces:

$$\text{Recarga} = \frac{\text{Precipitación} (Cl_p / Cl_r)}$$

Donde:

Recarga = hm³/año

Cl_p = Cloruro disuelto en la precipitación (mg/l)

Precipitación = hm³ / año

Cl_r = Concentración media de cloruro en la zona no saturada (mg/l)

Wood y Sanford (1995) demostraron que el método de balance de masa de cloruros en zonas semiáridas puede, bajo ciertas condiciones, producir períodos regionales de recarga de agua subterránea comparados con los obtenidos en los métodos basados en la física.

En la Costa de Hermosillo se recolectó agua de lluvia de tres días en la estación climatológica de la Escuela de Agronomía de la Universidad de Sonora y se analizó el contenido de cloruros en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la propia Universidad; los resultados se muestran en la Tabla 7.1:

Tabla 7.1.- Valores de cloruros en el agua de lluvia en ppm.

Muestra #	Día de Recolección	Cloruros en ppm.
1	30 de Septiembre del 2001	2.70
2	1 de Octubre del 2001	6.30
3	2 de Octubre del 2001	2.25
	promedio	3.75 ppm

Con este dato se realizó una estimación de la recarga por lluvia considerando solamente la zona no afectada por la intrusión salina ($3895.8 \times 10^6 \text{ m}^2$), con un promedio de 100 mg/l para la concentración en el agua subterránea:

$$R_p = 0.250 \text{ m} * 5092 \times 10^6 \text{ m}^2 (3.75/100 \text{ mg/l}) = 47.738 \times 10^6 \text{ m}^3$$

Recarga por lluvia = 47.7 hectómetros cúbicos/año.

Si bien existen zonas con muy baja relación para aplicar el método, como la planicie árida de Huapalai al noroeste de Arizona, donde Huntoon (1977) determinó que la evapotranspiración potencial se encuentra en el rango de 72 a 76 pulgadas por año (183 a 193 cm) con precipitación pluvial cuyos promedios van de 9 a 13 pulgadas por año (23 a 33 cm/año). Para la región se obtuvo una tasa de recarga anual de sólo 0.1 pulgadas por año (0.25 cm). En la Costa de Hermosillo la recarga obtenida representa un 3.7% de la lluvia promedio, lo que coincide con George (1992), quien cita que para zonas áridas semejantes, la recarga por lluvia puede llegar hasta un 5%.

No obstante, en este caso de aplicación, la limitación principal es que esta estimación se llevó a cabo sólo para el año 2001, y puede no ser suficiente como para calcular la recarga por lluvia; con esta premisa se acepta que se requieren más años de observación para obtener datos confiables. Sin embargo, el valor se considera satisfactorio; en la actualidad se han colocado, para el verano del 2005, 12 estaciones para captación de lluvia con fines de dar continuidad a la investigación.

7.4 Cálculo de la recarga horizontal.

La recarga de agua subterránea puede ser explicada como el proceso donde según la cantidad de agua presente en o fluyendo a través de intersticios del subsuelo

incrementa por medios naturales o artificiales. La cantidad de agua que puede ser extraída de un acuífero sin causar abatimiento es primeramente dependiente de la recarga de agua subterránea. El agua de lluvia es la principal fuente para la restauración de humedad en el sistema de agua de suelo y recarga del agua subterránea. Otras fuentes incluyen recarga de ríos, arroyos, agua de irrigación, etc. El movimiento de humedad en la zona no saturada es controlado por las relaciones entre la presión de succión, el contenido de humedad y la conductividad hidráulica. La cantidad de humedad que eventualmente llegará al acuífero se define como la recarga natural de agua subterránea, la cual depende del índice y duración del agua de lluvia, las condiciones subsecuentes en el límite superior, el antecedente de las condiciones de humedad del suelo, la profundidad del acuífero y el tipo de suelo.

7.4.1 Métodos de estimación de recarga.

En la evaluación de fuentes de agua subterránea, estimar el índice de restauración de un acuífero es probablemente la medida más difícil de todas. Los métodos disponibles para el cálculo de la recarga de agua subterránea directamente de la precipitación pueden ser divididos de manera general en tres: 1) métodos de entrada, 2) de respuesta del acuífero, 3) de descarga; en función de cómo se realizaron los estudios (Kumar C.P, 1977).

Los siguientes métodos se usan comúnmente para estimaciones de recarga natural de agua subterránea (Kumar, op cit):

- i) Método de balance de agua de suelo.
- ii) Método del plano de flujo cero.
- iii) Modelo de una dimensión del flujo de agua de suelo.
- iv) Técnica de modelado inverso.
- v) Método de fluctuación del nivel de agua subterránea.
- vi) Método híbrido de fluctuación de agua.
- vii) Método de balance de agua subterránea.
- viii) Técnicas de perfil de isótopos y solutos.

7.4.2 Método de balance de agua subterránea.

En este caso se optó por el método de balance de agua subterránea, que considera en forma general: **$I - O = \Delta W - \Delta t$**
donde:

I	=	entradas (m ³ /día) durante el tiempo Δt
O	=	salidas (m ³ /día) durante el tiempo Δt
W	=	cambio en el volumen del agua m ³

Tomado los diferentes componentes de entradas y salidas, la ecuación de balance del agua subterránea por un período está dada por:

$$R_i + R_c + R_r + S_i + I_g = E_t + T_p + S_e + O_g + \Delta W$$

Donde:

R_i	=	recarga por agua de lluvia
R_c	=	recarga por canales
R_r	=	recarga por irrigación
S_i	=	recarga por ríos
I_g	=	entradas de otras cuencas
E_t	=	evapotranspiración
T_p	=	corriente de agua subterránea
S_e	=	descargas hacia ríos
O_g	=	descargas hacia otras cuencas
ΔW	=	cambio en el almacenamiento de agua subterránea

Esta ecuación es la ecuación general del balance de agua subterránea de un acuífero sin confinamiento. Los límites de un área estudiada normalmente no representan líneas de corriente, es decir, no son perpendiculares a las líneas equipotenciales. Por lo tanto, las entradas y salidas laterales se deben considerar en la ecuación de balance. La ecuación sólo considera un sistema de acuíferos y no los flujos en un sistema de multiacuíferos.

Todos los elementos de la ecuación de balance de agua se calculan usando métodos independientes donde sea posible. Los cálculos de elementos de balance de agua siempre involucran errores, debido a defectos en las técnicas utilizadas. La discrepancia del balance de agua es dada como un término residual de la ecuación de balance de agua e incluye el error en la determinación de los componentes, los cuales no se toman en cuenta.

El balance de agua puede ser calculado en cualquier intervalo de tiempo. Para aplicar la ecuación anterior de manera correcta, es esencial que tanto el área y el período en los cuales se evalúa el balance sean seleccionados cuidadosamente. Todos los componentes de la ecuación de balance de agua aparte de la recarga de agua de lluvia, se estiman utilizando información hidrológica y meteorológica relevante.

7.4.3 Tasa neta de recarga de agua subterránea.

La estimación de la tasa neta de recarga de agua subterránea requiere que se lleve a cabo un balance en la superficie del suelo. El balance será en función de las características del perfil del suelo y del clima. La ecuación general que describe el balance de agua se puede escribir como:

$P + I = R + E_t + G + \Delta S$

Los dos términos de la izquierda representan la precipitación (**P**) y la irrigación aplicada (**I**). La suma de estos dos representa la adición neta a la superficie del suelo.

Los términos de la derecha de la ecuación son el escurrimiento (**R**), la evapotranspiración (**Et**), la infiltración o recarga subterránea (**G**) y el cambio de agua en el suelo (**ΔS**). Cada uno representa flujo de agua o cambio de almacenamiento, medidos en unidades de profundidad o lámina, sobre algún intervalo de tiempo arbitrario (Handbook of Hydrology, Maidment, 1992).

Para desarrollar cada uno de los términos referidos se trazó un plan de acciones (Figura 7.2), que inicia con la *piezometría*, las *pruebas de bombeo* para obtener *transmisividades* y el cálculo de las *entradas de flujo horizontales*, tanto de agua dulce como de agua salada, debido a la intrusión marina. Para el *cambio de almacenamiento*, se obtuvo el *rendimiento específico*, estimando el volumen de agua extraída para relacionarlo con el volumen de acuífero drenado. Este valor de rendimiento específico se relacionó directamente con el volumen calculado con los planos de evolución, el cual a su vez se obtuvo con la piezometría de los años 2000 y 2001.

Todos estos términos, junto con el bombeo, se incluyeron en la *ecuación de balance*, para calcular la *recarga vertical*. Esta *recarga vertical* comprende el agua proveniente de la lluvia y de los retornos de los riegos. La *recarga por lluvia* (R_i) fue calculada con el método de cloruros. Finalmente, la *recarga total* se obtiene de la suma de la *recarga vertical* y de las entradas de agua dulce y agua salada.

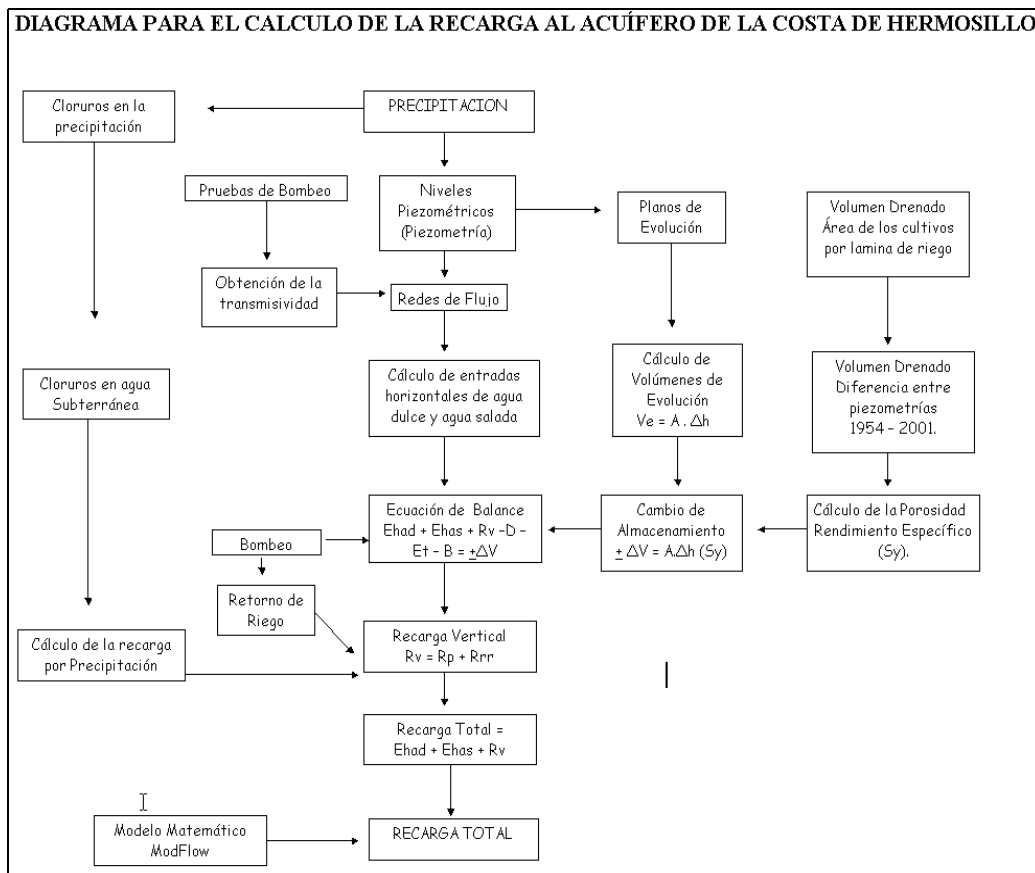


Figura 7.2 Diagrama de flujo para el cálculo de la recarga.

7.4.3.1 Cálculo de entradas y salidas horizontales (método de celdas).

Las celdas fueron configuradas utilizando la piezometría del año 2001 (Figura 7.3). El resultado del cálculo por este método de celdas fue el siguiente:

Entradas horizontales de la sección norte: $1.3 \text{ m}^3/\text{s} = 40.662 \text{ hm}^3/\text{año}$

Entradas horizontales de la sección Este: $0.327 \text{ m}^3/\text{s} = 10.3 \text{ hm}^3/\text{año}$

Entradas horizontales de agua de mar: $3.12 \text{ m}^3/\text{s} = 98.4 \text{ hm}^3/\text{año}$

Entradas horizontales de la sección Siete Cerros: $0.89 \text{ m}^3/\text{s} = 28.1 \text{ hm}^3/\text{año}$.

TOTAL ENTRADAS HORIZONTALES = $79.1 \text{ hm}^3/\text{año}$.

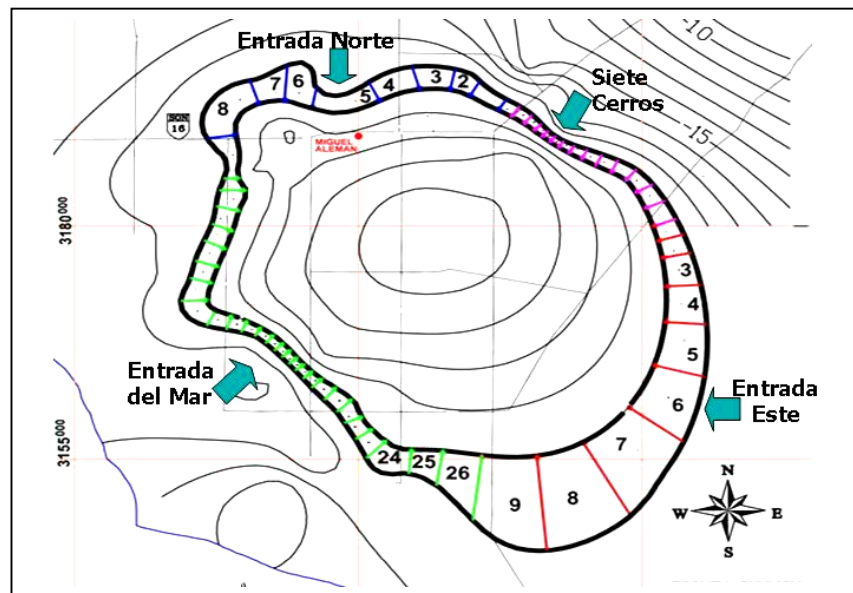


Figura 7.3 Celdas utilizadas en el cálculo de flujo subterráneo horizontal.

7.4.3.2 Cálculo del rendimiento específico (S_y).

Los parámetros de la función como depósito del acuífero pueden ser medidos en laboratorio y sobre el terreno. En laboratorio, el complejo agua/depósito o acuífero es caracterizado por un parámetro hidrodinámico importante, la *porosidad eficaz*. Sobre el terreno, las *pruebas de bombeo* y el *estudio de las fluctuaciones de la superficie piezométrica* determinan los parámetros hidrodinámicos del almacenamiento subterráneo, de los cuales el principal es el *coeficiente de almacenamiento*. Por lo tanto, tiene un gran peso en el balance la forma de asumir o calcular un rendimiento específico.

La porosidad eficaz (specific yield), **ne**, adimensional, expresada en porcentaje, es la relación del volumen de agua que se drena de una roca saturada debido a la

atracción de la gravedad contra el volumen de la roca (Meinzer 1923b en Fetter, 1994, 2001); **Ve** es el depósito que puede contener agua en estado saturado, o permite liberarla bajo el efecto de un drenado completo respecto a su volumen total, **Vt**. El contenido en agua volumétrica es, por lo tanto, igual a la porosidad.

En un acuífero libre, el *coeficiente de almacenamiento* es igual en la práctica a la *porosidad eficaz*. Por el contrario, en los acuíferos cautivos (confinados) es 100 o 1000 veces más pequeño. El rango usual de S_y varía de 0.01-0.30 para acuíferos libres y de 0.001 a 0.0001 para acuíferos cautivos (Freeze and Cherry, 1979). Entonces, la función de capacidad de un depósito es determinada por dos parámetros, según el método de su medición: la porosidad eficaz y el coeficiente de almacenamiento (Ketchum, 2000).

La Tabla 7.2 muestra algunos de los valores obtenidos por Walton (1970) y Johnson (1967) para diferentes tipos de materiales.

Tabla 7.2 Valores de rendimiento específico en por ciento

MATERIAL	Walton, 1970	Johnson, 1966
Arcilla	1 – 10	0 – 5
Arena	10 – 30	10 – 28
Grava	15 – 30	20 – 35
Arena y Grava	15 – 25	20 – 35
Arenisca	5 – 15	
Esquisto	0.5 – 5	
Caliza	0.5 – 5	

Por su parte, Lohman (1983) trata sobre métodos para estimar el rendimiento específico (S_y), y menciona que anteriormente el rendimiento específico generalmente utilizado era de entre 0.1 y 0.3 (10 y 30%) y que se requerían grandes períodos de bombeo para drenar los materiales que contenían agua. En conclusión, en la ausencia de cualquier determinación, como en un rápido reconocimiento, no estaríamos muy lejos si se asumiera que para períodos largos de drenado, el rendimiento específico de un acuífero libre es de alrededor de 0.2 (20%), como valor promedio entre los límites generales indicados.

Resumiendo el concepto, el rendimiento específico es el rendimiento de agua del material que se obtiene por drenaje debido a la gravedad, tal como ocurre cuando el nivel del agua subterránea desciende. Más exactamente, el rendimiento específico de una roca o suelo ha sido definido como la relación entre (1) el volumen del agua, el cual después de ser saturado dejará pasar por gravedad, a (2) su propio volumen (Fetter, 2001). Esto puede expresarse como:

$$S_y = V_g/V_t \text{ (sin dimensión)}$$

Donde:

S_y = Rendimiento específico

V_g = Volumen de agua extraída

V_t = Volumen total del acuífero drenado

Para obtener el rendimiento específico, en el presente estudio se analizaron dos áreas donde se conoce con exactitud el volumen extraído de agua y el volumen total drenado, denominadas Costa de Hermosillo y Siete Cerros. Para el cálculo se utilizaron las piezometrías de los años 1954 y 2001 y el "krigado" del programa de cómputo Surfer versión 8, con el que se determinaron los volúmenes total y drenado y la diferencia entre ambos, la cual resultó de **35,310 hm³**. La distribución de este volumen extraído en el período de análisis se muestra en la Figura 7.4.



Figura 7.4.- Volumen total extraído de 1954 a 2003.

En el área de Siete Cerros se calculó el volumen total drenado con las piezometrías y los abatimientos promedio de los últimos cincuenta años, y se contabilizaron las áreas de cultivo, tipo de cultivos y láminas de riego por cada uno de ellos. Así se obtuvo el volumen anual de agua extraída, que se dividió entre el volumen total drenado para obtener la porosidad eficaz (rendimiento específico, S_y).

Tabla 7.3 Relación de campos agrícolas con cultivos anuales, perennes y hortalizas de la zona de Siete Cerros.

Cultivos	Superficie m ²	Lámina m	Volumen m ³
Vid R. Presurizado	6650000	1.31	8711500
Vid R. Gravedad	9040000	2.1	18984000
Nogal R. Presurizado	740000	1.43	1058200
Nogal R. Gravedad	4990000	2.25	11227500
Cítricos R. Presurizado	2020000	1.4	2828000
Cítricos R. Gravedad	4990000	2.25	11227500
Trigo, Alfalfa, Hortalizas	11420000	0.8	9136000
agua extraída en un año= 63.2 hm ³			63'172,700

Por lo tanto, el volumen total drenado **Vt** para la zona en Siete Cerros da como resultado:

$$S_y = V_g/V_t = 63.2 / 471 = 0.134 = \underline{\underline{13.4\%}}$$

Realizado de la misma manera para el volumen total drenado del acuífero de la Costa de Hermosillo, resulta:

$$S_y = V_g/V_t = 35.3 / 293 = 0.12 = \underline{\underline{12\%}}$$

Ambos rendimientos específicos corresponden con el valor promedio reconocido para arenas finas y limos (Johnson, 1966, en Fetter, 2001). Valor que resulta satisfactorio para las características texturales de los materiales del acuífero de la Costa de Hermosillo y Siete Cerros. Finalmente se tomó el promedio de los dos cálculos, que dio el resultado de:

$$\text{Rendimiento específico} = \underline{\underline{0.13 (13\%)}}$$

El valor de rendimiento específico (S_y), coeficiente de almacenamiento para acuíferos libres usado en este caso, es de 0.13, es decir 13%, el cual se encuentra en el rango de los valores obtenidos en estudios anteriores para la Costa de Hermosillo (0.10 de Matlock et al., 1966; 0.08 de Cruinckshak y Chávez en 1969; 0.15 de Domenico en 1974, y 0.15 de Andrews en 1981).

7.4.3.3 Cálculo del cambio de almacenamiento período 2000-2001.

La evolución piezométrica 2000-2001 se tomó para el cálculo como representativa del drenado de agua dulce del sistema; a partir del año siguiente, las evoluciones tendieron a ser menores y a generar zonas positivas con recuperación atribuible a la recarga de agua de mar (Figura 7.5). Entonces, tomando el volumen de las áreas de la evolución referida, se calculó el cambio de almacenamiento:

$$\text{Volumen de almacenamiento} = \Delta V = \text{Area} \times \Delta h = 2,068.3 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$\text{Cambio de almacenamiento} = \Delta V * S_y = -2,068.291000\text{m}^3 * 0.13$$

$$\text{Cambio de almacenamiento} = \underline{\underline{-268.8 \times 10^6 \text{ m}^3}}$$

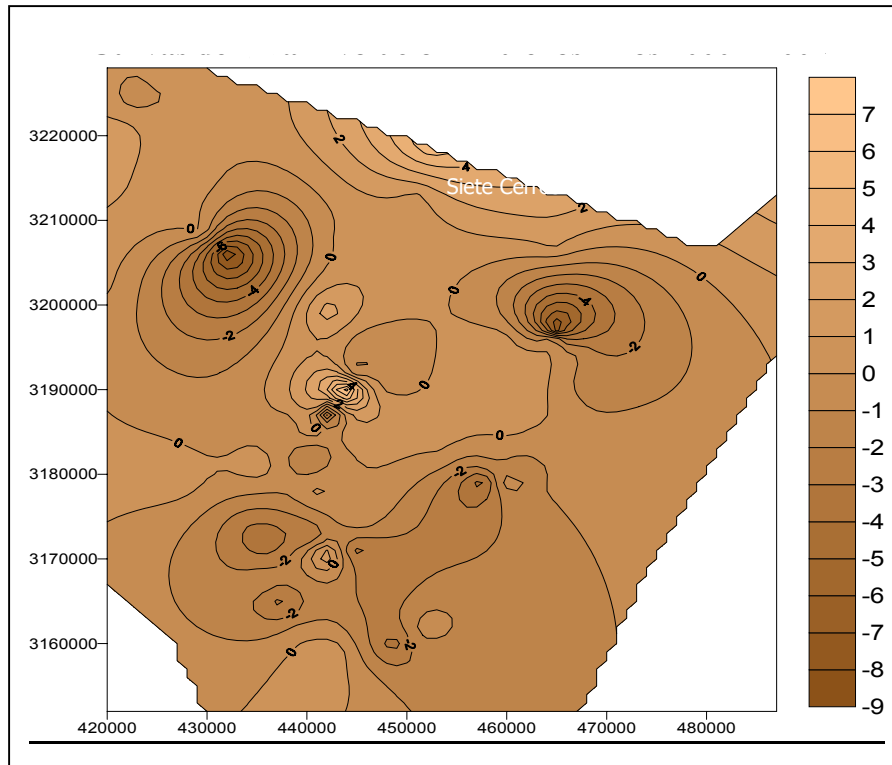


Figura 7.5.- Plano de curvas de igual evolución entre los años 2000-2001, acuífero Costa de Hermosillo.

7.5 Extracciones por bombeo.

El término referente al bombeo o extracción del agua subterránea se tomó del trabajo realizado por el Colegio de Posgraduados de Chapingo (1999) para la Comisión Nacional del Agua, cuya estimación de volúmenes extraídos para uso agrícola en la Costa de Hermosillo fue de **527.2 x10⁶ m³** por año. Con este factor final se integraron los resultados del balance para el área de estudio en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4 Resultados del cálculo de recarga del sistema acuífero Costa de Hermosillo.

Recarga al Sistema Acuífero Costa de Hermosillo 2000-2001			
AGUA SALADA	Entrada horizontal	98.4 x 10 ⁶ m ³	98.4 x 10 ⁶ m ³
AGUA DULCE (entrada horizontal)	Sección Este	10.3 x 10 ⁶ m ³	79.103 x10 ⁶ m ³
	Sección Norte	40.6 x 10 ⁶ m ³	
	Sección Siete Cerros	28.1x10 ⁶ m ³	
BOMBEO			-527.235 x 10 ⁶ m ³
CAMBIO DE ALMACENAMIENTO	Cambio de volumen*rendimiento específico 2068.29 X 0.13=		-268.8 x10 ⁶ m ³
RECARGA VERTICAL			80.8 x10 ⁶ m ³
RECARGA AGUA DULCE + AGUA MARINA			258.3 x10 ⁶ m ³
RECARGA TOTAL DE AGUA DULCE 2000-2001			159.9 X 10⁶ m³

7.6 Recarga analizando el período 1997-2001.

La Tabla 7.5 muestra los resultados de un ensayo de estimaciones utilizando las piezometrías de los años 1997 al 2001; resulta interesante citar que los promedios de abatimiento anual son de 1.09 m en el período considerado y que la variable asumida en este caso fue la recarga vertical. Con lo anterior se obtuvo un promedio de **72.5 x 10⁶ m³/año.**

Tabla 7.5 Cálculo de la recarga vertical para las evoluciones de los últimos cuatro años, de 1997 a 2001.

Año	Rv	Cambio de Almacenamiento	Bombeo	Entradas Horizontales
1997-1998	78.09	-271.6	527	-177.548
1998-1999	48.15	-301.5	527	-177.548
1999-2000	82.9	-266.7	527	-177.548
2000-2001	80.8	-268.8	527	-177.548
PROMEDIO	72.5	-277.2		

De aquí que la recarga total promedio para los cinco años resulta ser de 151.6 hm³/año de agua dulce y 98.4 hm³/año de agua marina. La diferencia con la recarga del período 2000-2001 es de 8.31x10⁶m³, que representa aproximadamente 5%.

8. HIDROGEOQUÍMICA

8.1 Generalidades.

La geoquímica del agua en la región de estudio ha sido trabajada por diversos autores, para áreas específicas, sin tener una interconexión entre regiones geográficas o bien con la regionalización de acuíferos. Los análisis químicos se han limitado a caracterizar familias de agua, la propia intrusión marina o bien para conocer la calidad del agua subterránea del área en cuestión para uso doméstico o agrícola, pero siempre interpretado como espacios independientes del sistema hidrológico de la cuenca de río Sonora.

El presente estudio reunió en una sola base de datos los resultados disponibles de análisis químicos de laboratorio, llevados a cabo en la región por diversos autores en distintas épocas, con el objeto de integrar con un solo criterio de regionalización del sistema recarga-descarga a los acuíferos contenidos en la cuenca baja del Río Sonora y revisar su evolución, sus interrelaciones y el movimiento del flujo entre los acuíferos que rodean la zona de la Costa de Hermosillo, pues al menos en condiciones iniciales fueron sus zonas de recarga. La información obtenida de los estudios anteriores comprende análisis químicos de agua proveniente de diversas fuentes. Éstas, como fue previamente descrito, comprenden las dos grandes regiones de estudio en la cuenca baja: (a) acuíferos del valle del río Sonora y (b) acuíferos de la Costa de Hermosillo, lo que incluye la caracterización de la franja de interfase salina. Las muestras son de agua tanto superficial como subterránea, entre las que se clasificaron norias, pozos someros (<100 m), pozos profundos (>100 m), agua de ríos y manantiales de los acuíferos del Zanjón, La Victoria, La Poza, Willard, Hermosillo (zonas urbana y suburbana) y la Costa de Hermosillo.

Entre los estudios con análisis químicos de muestras de agua subterránea disponibles se encuentran los de las empresas Benton y Asesores S.C (1998), GYMSA (1990), Consultores S.A. (1977), Marín y otros (1996); diversos análisis recopilados de la SARH (1977) y la CNA de años anteriores, como son de 1989-1995, en los que se realizaron análisis de agua subterránea de entre 150 a 300 muestras por año, principalmente para la Costa de Hermosillo, que resultaron muy útiles para analizar la evolución geoquímica en la franja de intrusión; además los efectuados por el Departamento de Geología de la Universidad de Sonora para la CNA (Monreal y otros 2000, 2001). Estas muestras, más 191 analizadas en dos campañas para este trabajo, sumaron un total de 556 disponibles; fueron analizadas por el Laboratorio Analítica del Noroeste, el cual cuenta con el certificado de la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA), con 21 parámetros determinados, que incluyen elementos mayores y menores, metales y trazas. Los resultados del análisis de iones están expresados en mg/l, convertidos a meq/l para llevar a cabo diversas relaciones geoquímicas.

8.1.2 Muestreo y análisis físico-químico.

8.1.2.1 Plan de muestreo.

Para fines de identificación y rastreabilidad, se subdividió la región de estudio en tres amplias franjas para darle una mejor cobertura:

- 1) Área Río Bacoachi (PMB-01...n), con tres áreas de muestreo:
 - (a) zona de recarga
 - (b) zona del Río
 - (c) zona de descarga
- 2) Área Hermosillo (PMH-01...n), con dos áreas de muestreo:
 - (a) zona urbana-suburbana
 - (b) costa Este (Hermosillo, Siete Cerros)
- 3) La Poza (PMP-01...n), con dos áreas de muestreo:
 - (a) zona sur de Hermosillo
 - (b) zona oeste de Hermosillo

La recolección de muestras de agua subterránea se realizó a boca de pozo (muestra mixta), con un plan de muestreo que siguió tres rutas entre las calles agrícolas (12-20, 20-28 y 28-36), cuyo objetivo fue obtener una caracterización geoquímica representativa de los pozos que bombean agua dulce, salobre y salina. Es decir, en dirección del flujo subterráneo, llegar hasta aquellos que han sido afectados por la intrusión salina. En cada pozo se realizó calibración de campo de instrumentos previa a la medición de C.E., pH, T en °C de la muestra y temperatura ambiente en °C, así como levantamiento de las coordenadas UTM con un equipo de posicionamiento Garmin GPS.

Para la interpretación hidrogeoquímica se utilizaron dos principales representaciones: a) *Espacial*, con la que se muestra la distribución de los diversos elementos mayores y la cual tiene mayor influencia en la composición química del flujo subterráneo. b) *Temporal*, con la que se define su carácter típico y se busca la probable evolución de los diversos parámetros presentes en el flujo subterráneo. Adicionalmente se revisa el origen de la presencia de diversos tipos de contaminantes que han degradado, en algunas zonas, la calidad del agua subterránea, tales como flúor, manganeso, arsénico y nitratos, principalmente

En el primer caso, la representación espacial se apoya en mapas hidrogeoquímicos, de los cuales se describe la distribución de isopleas de elementos mayores Ca, Mg, Na, HCO₃, Cl y SO₄. De igual manera se analizaron las distribuciones de STD, NO₃, pH, temperatura y conductividad eléctrica, así como diversos índices geoquímicos que relacionan los procesos de disolución en el sistema agua-roca y que son apoyo para la interpretación del movimiento del flujo subterráneo. En el segundo caso, se utilizaron los métodos de Piper y Stiff para caracterizar y zonificar la presencia de diferentes tipos de familias hidrogeoquímicas y diagramas semilogarítmicos para acentuar las diferencias entre tipos de aguas aun del mismo acuífero; con la clasificación de Chase-Palmer se buscaron apoyos para entender la diferenciación hidroestratigráfica

y el origen por sus relaciones de alcalinidad desde sus zonas de recarga. Igualmente, se realizaron diversas clasificaciones por calidad del agua para cada acuífero; entre ellas se encuentran la Relación de Absorción de Sodio (RAS) y la clasificación de potabilidad por salinidad en términos de STD y CE.

8.1.3 Muestreo de agua para análisis isotópico

El plan de muestreo incluyó la caracterización de las dos grandes regiones Costa de Hermosillo, para caracterizar la migración de la intrusión salina, y el acuífero y el valle del Río Sonora. Se analizaron 39 muestras en la primera campaña y 46 en la segunda por ^{14}C , ^{18}O y deuterio. Además se integraron los análisis de Payne y otros (1978), para un total de 124 análisis; éstos últimos incluyeron análisis por tritio. El objetivo estuvo enfocado en definir con mayor certidumbre la caracterización isotópica de los diferentes tipos de agua del área de estudio en sus distintas zonas de entrada de recarga, siguiendo una hipótesis bajo el modelo hidrogeológico de distribución acuífera regional y apoyándose en las familias isotópicas sugeridas por trabajos previos de otros autores. Así se consideró toma de muestras para:

- a) Zona La Victoria-Mesa del Seri
- b) Zona El Bacoachi
- c) Zona El Zanjón
- d) Zona urbana de Hermosillo
- e) Zona de La Poza
- f) Zona de Willard
- g) Interfase salina (agua dulce con presencia de agua marina)
- h) Agua de mar

Con este criterio, para isótopos estables y C-14, se pretendió que llenara los siguientes requisitos:

- a) Que representara todas las profundidades.
- b) Que representara todas las regiones geográficas del área de estudio (regionalización de acuíferos).
- c) Que representara las hipotéticas zonas de recarga y descarga del acuífero de la Costa de Hermosillo.
- d) Que fueran representativas de las diferentes salinidades en el sentido la dirección del flujo subterráneo.

8.2 Zona de intrusión marina.

8.2.1 Conductividad eléctrica vertical en pozos abandonados.

La intrusión salina hacia el acuífero de la Costa de Hermosillo obligó a muchos usuarios en las últimas dos décadas a que se diera con mayor rapidez el abandono de pozos que estaban siendo alcanzados por el frente. El avance de la salinidad tuvo en los años 75 al 85 una fuerte difusión, desarrollado después de 20 años de operación intensa

que provocó la pérdida de la carga hidráulica y generó un amplio y profundo cono de abatimiento producto de la sobreexplotación.

En determinadas zonas el incremento de la salinidad fue muy notorio; en algunas otras, a veces próximas a ellas, no fue perceptible o apenas llegó a incrementarse. Esta condición se mantuvo durante muchos años sin que se lograran entender bien las condiciones hidrogeológicas que diferenciaban ese comportamiento.

En algunos de los pozos abandonados, ubicados a una distancia no mayor de 20 km de la línea de costa, se realizó un programa de registro de conductividad eléctrica vertical (CEV) en octubre de 1999. Para ello se empleó una sonda marca Solinst, equipada para medir con rango de hasta $100,000\mu\text{S}/\text{cm}$ y con sensor de temperatura. Estos pozos se utilizaron como una red de monitoreo aproximadamente paralela a la línea de costa. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que esta red fue implementada para ese uso y que los pozos generalmente no tienen la suficiente profundidad ni la ubicación adecuada, además de que físicamente su deterioro es avanzado pues fueron abandonados cuando sus condiciones eran deplorables. De aquí que existen algunas limitantes para considerarle una buena eficiencia como red; por ejemplo sus profundidades, que no rebasan cien metros, por lo que, descontando la profundidad al nivel estático, los metros de registro se reducen considerablemente. Aun así, con los registros levantados y su correlación con la química y la geofísica, se logró hacer una interpretación del comportamiento de la CE a 40, 70 y 100 m de profundidad, suficiente para interpretar el avance de la salinidad y de la migración de la intrusión salina en sentido lateral y vertical.

De esta forma, uno de los elementos más importantes y más ampliamente utilizados en este estudio para determinar y caracterizar el avance de la salinidad fue la conductividad eléctrica (CE) expresada en $\mu\text{S}/\text{cm}$ ($1\ \mu\text{S}/\text{cm} = 10^{-6}\ \text{S}/\text{cm} = 10^{-6}\ \text{mhos}/\text{cm}$), la cual se juzga un parámetro representativo de la salinidad en consecuencia de las siguientes consideraciones:

- a) Dado que la CE es una función de la temperatura, del tipo de iones presentes y de su concentración, la determinación de esta propiedad a temperatura constante es un método sencillo para estimar la calidad química del agua (Davies, 1971).
- b) La simplicidad del método analítico promueve una menor incertidumbre en las mediciones.
- c) Su determinación se realiza directamente y no se le infiere de otros parámetros hidrogeoquímicos, como es el caso de los sólidos disueltos totales.
- d) Responde sensiblemente a los cambios de concentración de los electrolitos fuertes (Maron y Prutton, 1965), que son los de mayor interés hidrogeológico.

Por lo anterior, diversas interpretaciones se basaron en la aplicación directa de la CE o bien de su correlación con la geofísica para la extensión de la intrusión salina y examinar la migración del agua salobre y su distribución espacial a diferentes

profundidades. También se utilizó para identificar la posible estratificación de la calidad del agua y seleccionar profundidades de muestreo discreto de agua, ya que entre las variables a tomar en cuenta, por las que puede deformarse la configuración, están la medición en pozos que bombean de diferentes hidroestratos, monitoreo en pozos que inician su bombeo justo antes de la medición y monitoreo en pozos de observación fuertemente influidos por lluvia o recarga por inundación superficial (Mazor, 1997).

Un criterio que se consideró representativo para la interpretación de la calidad del agua en función de la medición de la CE, es el establecido por la APHA (1995), que clasificó la calidad del agua de acuerdo con los criterios siguientes:

a) 100 a 2000	$\mu\text{S/cm}$ a 18° C	Agua dulce
b) 2000 a 5000	$\mu\text{S/cm}$ "	Agua salobre
c) 5000 a 45,000	$\mu\text{S/cm}$ "	Agua de mar
d) 45,000 a 100,000	$\mu\text{S/cm}$ "	Salmuera

8.2.2 Resultados de los registros de Conductividad Eléctrica Vertical (CEV).

Los resultados observados de esta actividad se pueden agrupar en tres tipos de acuerdo con su comportamiento (Figura 8.1):

- 1) Pozos con salinidad uniforme.
- 2) Pozos con salinidad estratificada.
- 3) Pozos con interfase salina.

Pozos con salinidad uniforme. Muestran homogeneidad de los valores de CEV a todo lo largo de la columna registrada. Los casos típicos son los pozos PHB-15, PH-B-17, 20-17, MD-01, 35-04, PO-1, SPR México, PB-01, MD-06 y 35-04 (Fig. IV. 6-1). Con excepción del pozo PHB-17, que muestra agua salobre en toda su columna (4,000 $\mu\text{S/cm}$), el resto tiene agua que varía entre 450 (pozo 35-04) y 1050 $\mu\text{S/cm}$ (PHB-15). La profundidad de los pozos es variable; van desde 70 m en el pozo 20-17, hasta 432 m en el PHB-15.

Pozos con salinidad estratificada. Los pozos agrupados en este tipo de calidad del agua muestran salinidad menor en los primeros metros de registro, luego incrementan fuertemente su salinidad, para descender la calidad del agua tras un intervalo de espesor variable (pozos 56-01, 55-05, 49-11). Inician en el nivel estático con calidad salobre que incrementa gradualmente. Al término de este intervalo, su salinidad crece abruptamente, formando un "estrato" salino de entre 20 y 30 m de espesor, en el cual se registra la CE máxima de la columna. La CE en este "estrato" varía desde 10,000 $\mu\text{S/cm}$ a 30,000 $\mu\text{S/cm}$.

Pozos con interfase salina. La mayoría de los pozos registrados están agrupados en esta clasificación. Muestran un claro inicio con salinidades bajas o agua dulce desde

el nivel estático, que se incrementan con la profundidad, hasta alcanzar valores de alta salinidad. Este comportamiento se considera como el típico del acuífero.

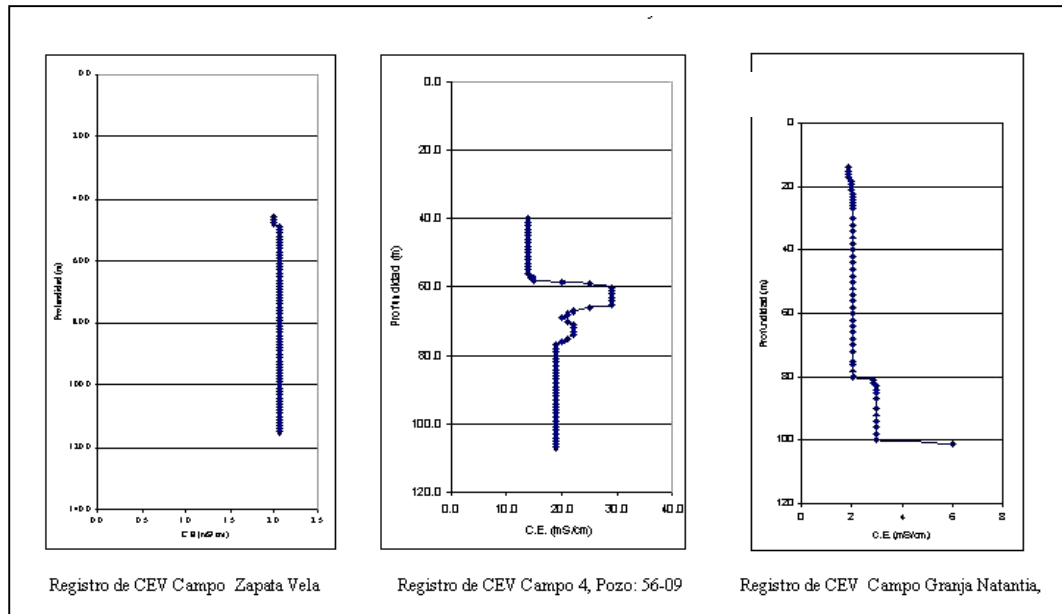


Figura 8.1 Perfiles de conductividad eléctrica (CEV) tipo en la zona de intrusión de la Costa de Hermosillo. Columna izquierda, salinidad uniforme; centro, salinidad estratificada; derecha, interfase salina.

8.3 Geoquímica del agua subterránea.

8.3.1 Caracterización geoquímica del agua subterránea mixta.

En la interpretación hidrogeoquímica se utilizaron como herramientas los métodos de clasificación por iones dominantes de Stiff y Piper. Las gráficas de Stiff se presentan en un conjunto de 50 muestras, las cuales se colocan, para su apreciación, en sentido de la dirección del flujo subterráneo; con ello se indica la calidad del agua subterránea que caracteriza al acuífero de agua dulce, su transición a salobre en la zona de interfase y finalmente la calidad salina, donde el frente de intrusión alcanza los más altos valores de concentración de sales (Figura 8.1a).

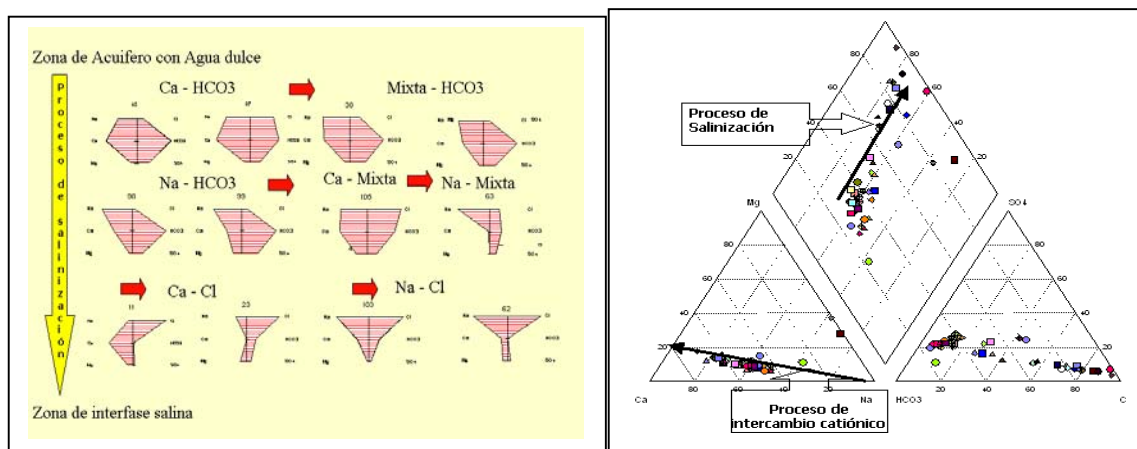


Figura 8.1a Diagramas de Stiff y Piper; muestra las facies hidroquímicas y los procesos de salinización e intercambio catiónico en el acuífero Costa de Hermosillo en el sentido de la dirección del flujo.

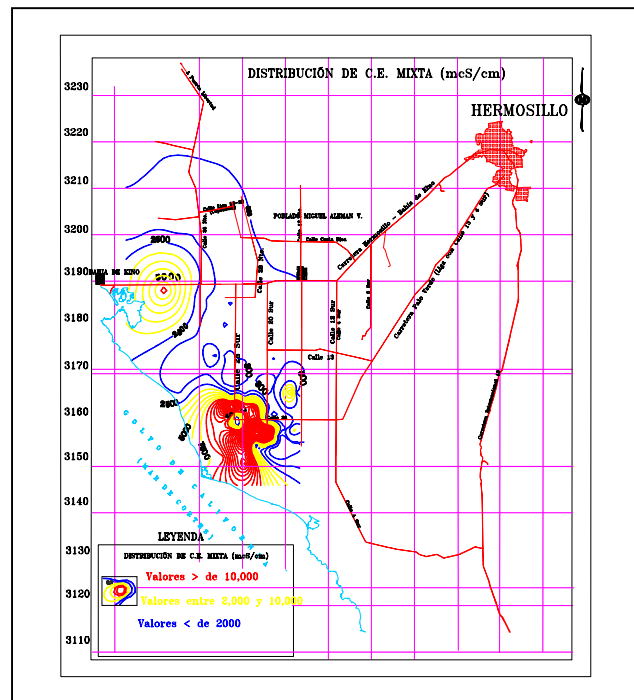
8.3.2 Resultados de la Conductividad Eléctrica Dinámica (Mixta).

Se considera que la conductividad eléctrica (CE) medida en 153 muestras representa la dinámica actual de la salinidad en el acuífero. La CE fue medida a la boca de cada pozo, sin modificar su régimen de bombeo agrícola. Es decir, se tomó muestra y se midió únicamente en aquellos pozos que mantenían aún su período de riego continuo durante el estudio. En sólo 16 de las muestras se arrancó el bombeo para tomar la muestra y sus parámetros, luego de 15 minutos de espera.

La CE obtenida es mixta; sin embargo, por ser de una columna de agua casi uniformemente captada por los pozos de producción, se considera representativa de la dinámica del acuífero. Sus valores varían ampliamente, desde mínimos de 220 a un máximo de 40,800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la zona con mayor penetración marina (Figura 8.2). Un valor representativo de la CE para el agua dulce del acuífero es 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La configuración de la CE muestra una distribución que coincide muy cercanamente con la hidrodinámica del sistema. La Figura 8.3 evidencia la CE en 1975 y demuestra cómo se ha modificado la salinidad del acuífero a gran velocidad, y posiblemente continuará modificándose. La distribución de la salinidad como se observa entre las calles 28 y 36 sur, si bien la mezcla de aguas se aprecia incipiente hasta la calle 20. Esto es hasta 36 km tierra adentro.

Figura 8.2 Distribución de la C.E. en la Costa de Hermosillo. En azul agua con menos de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$; amarillo agua entre 2500 y 7500 y en rojo entre 7500 v 40.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



8.3.3 Distribución de C.E. a profundidad

Tomando como base la conductividad eléctrica levantada en los pozos abandonados y la red de pozos de observación (PCH's y PHB), se obtuvieron las distribuciones espaciales a 40, 70 y 100 m de profundidad de la CE mixta, de las que se presentan la primera y la última (Figura 8.3, 8.4). Éstas muestran que la distribución de una porción del agua que tiende a ser salobre (1000-2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) representa una mezcla de agua que está sujeta en tiempo y espacio a la dinámica de extracción por bombeo. La distribución de la CE mixta es parcialmente diferente de la CEV para 40, 70 y 100 m de profundidad, ya que la mixta muestra una lengua de agua dulce somera, que no se observa a los 40 m de profundidad. Esta presencia de agua dulce fue

confirmada con exploración directa en un pozo de bombeo. Lo consistente de las distribuciones es que en todas ellas se define la zona de interfase y los centros de mayor salinidad se localizan hacia las dos zonas de mayor influencia de la intrusión, El Sahuaral al sur y frente al estero de Bahía Kino, en la porción norte, entre las calles 28 y 36. En esta zona, la CEV muestra un espesor de más de 80 m de agua ligeramente salobre ($> 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$). A mayor profundidad, la salinidad aumenta y la superficie de agua dulce es menor, tendencia que se mantiene hasta los 100 m de profundidad de la columna de agua. El área sur es la zona mayormente afectada por la intrusión salina; muestra los más altos valores de CE entre los campos Zapata Vela (87), con $4,040 \mu\text{S}/\text{cm}$; Lerdo de Tejada (88), con $31,700 \mu\text{S}/\text{cm}$; Fco. I. Madero (30), con $1,504 \mu\text{S}/\text{cm}$; Ángel Grande (84), con $39,800 \mu\text{S}/\text{cm}$; Hermosillo-Sahuaripa (48), con $14,123 \mu\text{S}/\text{cm}$; Campo 4 (16), con $2,606 \mu\text{S}/\text{cm}$; y el pozo 49-11 (62), ubicado sobre la calle 28, con $40,800 \mu\text{S}/\text{cm}$. Esta distribución de la salinidad en términos de la CE en todo el acuífero de la Costa de Hermosillo, es muy consistente con la interpretación hidrogeofísica y con el uso de las distribuciones espaciales de iones mayores y trazas.

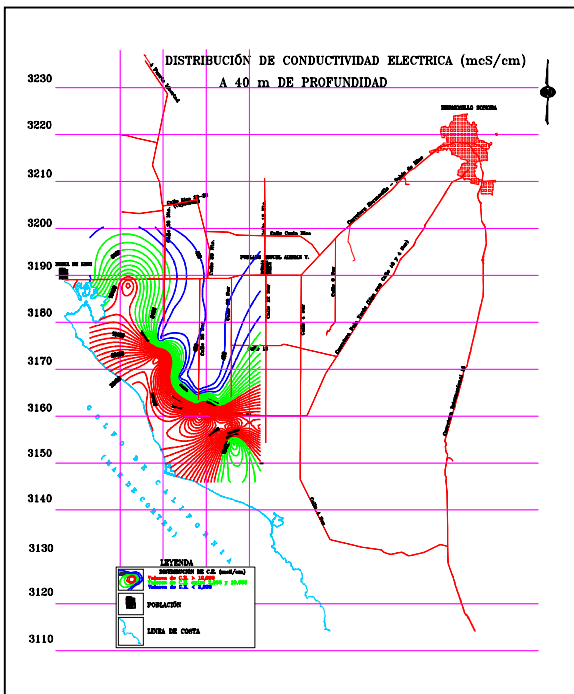


Figura 8.3 C.E. a 40 m de profundidad

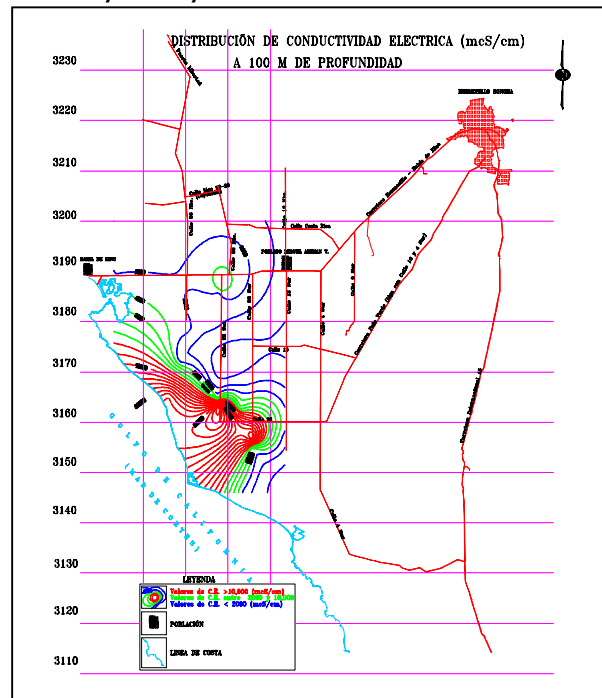


Figura 8.4 C.E. a 100 m de profundidad

El espesor medido en la zona de transición utilizando los perfiles de CEV, representa la geometría de la cuña de agua del frente de intrusión; se observó que su espesor en los perfiles denominados de "intrusión salina" corresponden con lo descrito por Tulipano (2003): "es delgado cerca de la línea de costa, del orden de la magnitud de las fluctuaciones del nivel del mar, mientras que tierra adentro alcanza varias decenas de metros". No fue así en los otros tipos de perfiles, donde sugiere que la posición depende más de las características litológicas del medio. En el caso del perfil denominado de "intrusión salina", existe un espesor definido del frente de intrusión, en cambio en los otros se alterna con agua dulce, por tanto se observa que, si incrementa

el espesor de la zona de transición, crecerá la salinización del agua dulce. En estos términos se estará estableciendo realmente una sobreexplotación; esto es, el régimen afecta al acuífero con una progresiva salinización causada por la mezcla del agua salada al abatirse la dulce por la intrusión lateral o el fenómeno de crecimiento del cono de abatimiento (Tulipano, op cit).

8.3.4 Resultados de la CE contra el tiempo de bombeo.

El análisis fue de dos tipos: de corta duración, realizando ensayos de bombeo de 10 a 72 horas, y de largo plazo, tomando como referencia los valores de CE del estudio de Marín y otros (1996), en los casos donde se tenía coincidencia con pozos muestreados. En el primer tipo se observó lo siguiente:

- a) Al examinar las gráficas de conductividad eléctrica (CE) contra el tiempo, se aprecia que los pozos no evolucionan; es decir, no existen valores que salgan notoriamente de la tendencia secular.
- b) Sus variaciones tienden a estabilizarse en pocas horas, evolucionan muy rápido, pero el cambio de su CE es despreciable a corto plazo.
- c) En todos los casos se observó que la CE se mantiene dentro del intervalo de 330 a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sin importar la ubicación geográfica ni la profundidad de los pozos, ya que los pozos agrícolas del ensayo se encuentran entre las calles 20 y 28 y el pozo PB-O1 se localiza al oeste de la calle 36 (entre 5 y 35 km de la línea costera); la distancia es de casi 20 km entre uno y otro. Tomando en cuenta la profundidad, los pozos Nochistongo y PB-O1 tienen 300 y 200 m respectivamente. El primero cementado hasta 160 m y ademe ranurado desde esta profundidad hasta el fondo; el PB-O1 tiene tubería ciega los primeros 30 m. Al menos en el primer caso era de esperarse una respuesta representativa de estratificación de acuíferos. Sin embargo, la tendencia es uniforme en valores de 1300 a 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- d) La uniformidad de los valores de la CE durante el ensayo de bombeo (400-490 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sugiere que no se presentó la influencia de una alimentación de flujo subterráneo vertical adicional a corto plazo, demostrado por la salinidad uniforme durante el tiempo de bombeo, por lo que se considera que este rango representa la calidad regional del agua dulce del acuífero.

El análisis de largo plazo sirvió de apoyo en la búsqueda de la definición de la hipótesis de estratificación acuífera. Se esperaba tener igualmente cambios bruscos en la calidad del agua extraída con el tiempo de bombeo, sin embargo existe uniformidad de la salinidad en forma regional. Para ello, la figura 8.5 compara los valores de CE y muestra que hay cierto paralelismo en la tendencia de los valores registrados en el año 1995 (Marín y otros, 1996) y los registrados cinco años después, durante este estudio. La evolución indica continuidad, en la mayoría de los casos, hacia el incremento de la salinidad en los pozos 89, 32 y 68, ligero en el primero y más definido en los siguientes, con excepción de uno de ellos (Tabla 8.1). Ello sugiere igualmente uniformidad en el comportamiento de la CE a largo plazo, a pesar de la dinámica. Al mes de Agosto de

2006, el pozo 68 presenta una CE de 2598 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Lo anterior demuestra que la CE es representativa de una calidad del agua regional, pero también denota cuando existe un fuerte deterioro de la calidad del agua de un acuífero.

Tabla 8.1 Evolución de la conductividad eléctrica en función del tiempo.

No.	No. Pozo	No. Muestra	Localidad	C.E. (1995)	C.E. (2000)
1	30-14	12/20-01	Los Pinitos	696	560
13	56-02	12/20-15	R. De Gpe.	567	540
14	56-04	12/20-16	El Rosario	460	520
32	29-17	20/28-02	Ma del Carmen	496	1233
49	49-14	20/28-24	20 de Nov.	637	466
52	43-07	20/28-30	San Jorge	466	673
55	43-02	20/2834	Atlántida	324	410
68	36-01	36-9	Valle Grande	675	1390
89	38-24	MD-11	San Juan	437	528

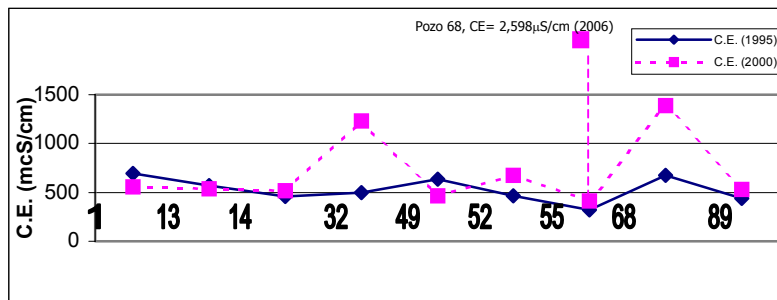


Figura 8.5 Comparación de la CE de 1995 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) obtenida por Marín y otros (1996) comparado con los mismos pozos para el año 2000.

8.3.5 Muestreo en Pozos de Observación (PM, PO) y Centinelas (PCH).

Pozos de Observación (PM, PO). En 2 pozos de observación (PO) y 5 de monitoreo (PM), construidos durante este estudio a 5 km de distancia de la línea de costa, se efectuó muestreo discreto de acuerdo con sus características constructivas y los objetivos. Se utilizó una botella tipo Kemmerer marca Wildco 1280-A15 de 2" de diámetro, metálica, capaz de introducirse en el ademe de 4", con capacidad para extraer 0.6 litros. La profundidad de muestreo en todos los casos fue 50 m, definida luego de que no se observaron cambios significativos de la conductividad eléctrica vertical (CEV) en toda la columna registrada. El agua de las muestras fue envasada siguiendo el protocolo de muestreo descrito y transportada a los laboratorios para su análisis.

Resultados observados de muestreo y geoquímica de pozos de observación. Los resultados revelan consistencia con los descritos en los perfiles de CEV, un modelo generalizado formando un espesor variable de agua salobre ($> 2,000 \mu\text{S}/\text{cm}$) y el grueso de la columna constituido por agua salada ($>10,000 \mu\text{S}/\text{cm}$). De estos pozos, el PM-3 y el PM 5 son representativos de la franja que define la frontera espacial entre agua dulce y salobre, y con ello se espera que cumplan con el objetivo de monitorear la dinámica de la zona de interfase. Dentro de este esquema, a excepción

del pozo de monitoreo PM-2, que inicia su columna con agua salina de 14,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el resto presenta una calidad de agua salobre en toda la columna. La clasificación del tipo de aguas en estos pozos es, de acuerdo con Stiff, Cl-Na; a excepción del pozo PM-3, con Cl-Ca, dado que se localiza en la zona central del acuífero, donde existe la mayor concentración de bombeo, por lo que la alta actividad dinámica produce un fuerte intercambio iónico inducido por la mezcla de aguas salinas (Cl-Na) que están recargando al agua del acuífero ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$)

Recolección de muestras en Pozos Centinelas (PCH). Estos pozos fueron construidos por el Comité para el Desarrollo de los Recursos de las Cuencas Centro y Norte de Sonora entre los años de 1975 a 1978. En ellos se programó toma de muestras de agua y rehabilitación. Son nueve pozos cuyo objetivo fue observar y monitorear la intrusión salina. Están construidos con dos piezómetros, con tubería de ademe de 6" lisa y ranurada para observar lo que se consideró un sistema estratificado compuesto por un acuífero superior y un acuífero inferior. Dentro de cada piezómetro se encuentra una tubería galvanizada de 2", que tiene la función de servir de sifón, para que al inyectar aire comprimido se pueda extraer agua de cada uno a diferentes profundidades.

La tubería de los pozos se encuentra en estado físico variable, de bueno a inservible, lo cual denota el abandono en que cayeron desde su construcción. Esta condición limitó la actividad de rehabilitación y, desde luego, la toma de muestras; a pesar de ello, el resultado no se considera malo, pues se logró tomar muestra en seis de los nueve pozos. Los pozos muestreados están en condiciones físicas para seguir siendo utilizados y obtener muestras en el futuro.

Resultados obtenidos de la rehabilitación y la toma de muestras. El pozo PCH-4 no se localizó, ni aun apoyándose en personal de la CNA y en lugareños que trabajaron en su construcción. En los pozos PCH-1 y PCH-6 se reventó la tubería galvanizada al interior cuando se inyectó aire. En el pozo PCH-7 se logró tomar muestra de uno de los dos piezómetros, el otro está corroído. En el resto la actividad cumplió con su objetivo. La calidad del agua observada en los pozos varía según el objetivo y en consecuencia de la ubicación donde fueron construidos. Los pozos PCH-2 (R) y PCH-9 (A y R) tienen agua de buena calidad, sus concentraciones de sólidos totales disueltos son de 167, 519 y 513 mg/l respectivamente. Sus tipos de agua son Cl-Na y Cl-Ca.

El PCH-1 no fue posible muestrearlo; sin embargo, el propietario del rancho San Diego, localidad donde se encuentra el pozo, informó que ha utilizado esa agua para consumo y es dulce. La proximidad con los pozos de la Comisión de Agua Potable de Hermosillo, que abastecen al poblado de Kino, y su calidad lo confirman. Los otros pozos PCH se ubican en zonas donde la salinidad ha degradado la calidad del agua, por lo tanto presentan concentraciones de sólidos totales que varían entre 6,288 y 29,047 mg/l. Los tipos de agua se clasifican, de acuerdo con Staff, en Cl-Na y Cl-Ca; la distribución de familias se aprecia en la Figura 8.6.

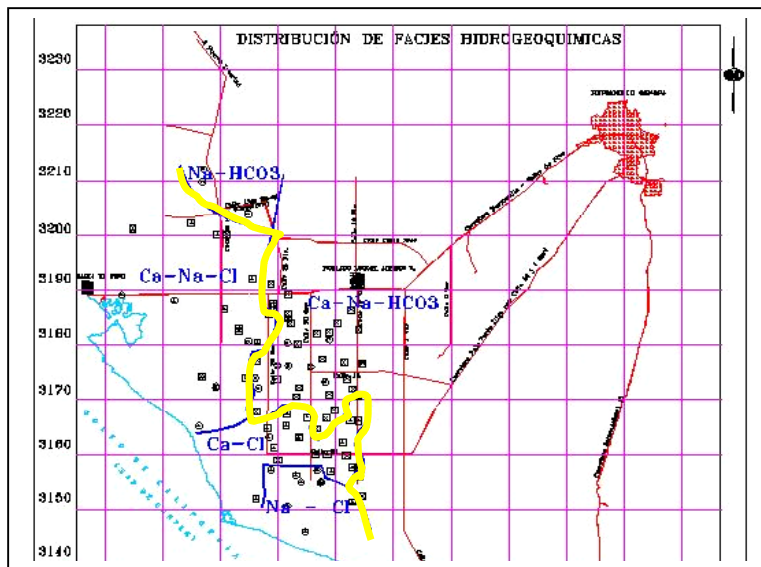
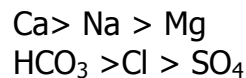


Figura 8.6 Distribución de familias de agua, con énfasis en el frente de intrusión e interfase salina marcada en amarillo en límite con el agua dulce del acuífero.

Con base en los diagramas de Piper y Stiff, se identifican los tipos de aguas existentes, que representan la actividad iónica del sistema.

- | | |
|----------------------------|------------------------------|
| 1) HCO ₃ -Ca | Bicarbonatada cálcica |
| 2) HCO ₃ -Ca-Na | Bicarbonatada cálcico-sódica |
| 3) HCO ₃ -Na-Ca | Bicarbonatada sódico-cálcica |
| 4) Cl-Ca | Clorurada cálcica |
| 5) Cl-Ca-Na | Clorurada cálcico-sódica |
| 6) Cl-Na | Clorurada sódico |

La distribución de las facies hidrogeoquímicas para todo el acuífero de la Costa de Hermosillo se muestra en la Figura 8.7; en ella se observa que predomina el tipo de familia Ca-HCO₃, típico de acuíferos en aluviones con algunas zonas con variaciones a mixta, en una relación de:



En la porción norte del acuífero predomina la facies Na-HCO₃, probablemente debido a la mayor influencia de rocas volcánicas que afloran en las zonas de recarga; al sur, frente a Punta Baja y en el Sahuaral, se observan dos facies cloruradas, Cl-Ca y Cl-Na respectivamente, y al oeste de la calle 36 hay predominio de la facies mixta de Cl-Ca-Na. La tendencia de la distribución de concentraciones indica que en forma general el agua tiende a estar más concentrada en sodio y carbonato gradiente abajo desde los frentes de montañas hacia el centro del acuífero, y a través de las partes centrales de las fosas descritas por hidrogeofísica hasta los puntos de descarga. La facies hidrogeoquímica Ca-HCO₃ extiende su predominio hasta la porción de acuífero al oeste de Siete Cerros y en la parte alta de la cuenca próxima a Hermosillo, confirmando así uno de sus posibles orígenes.

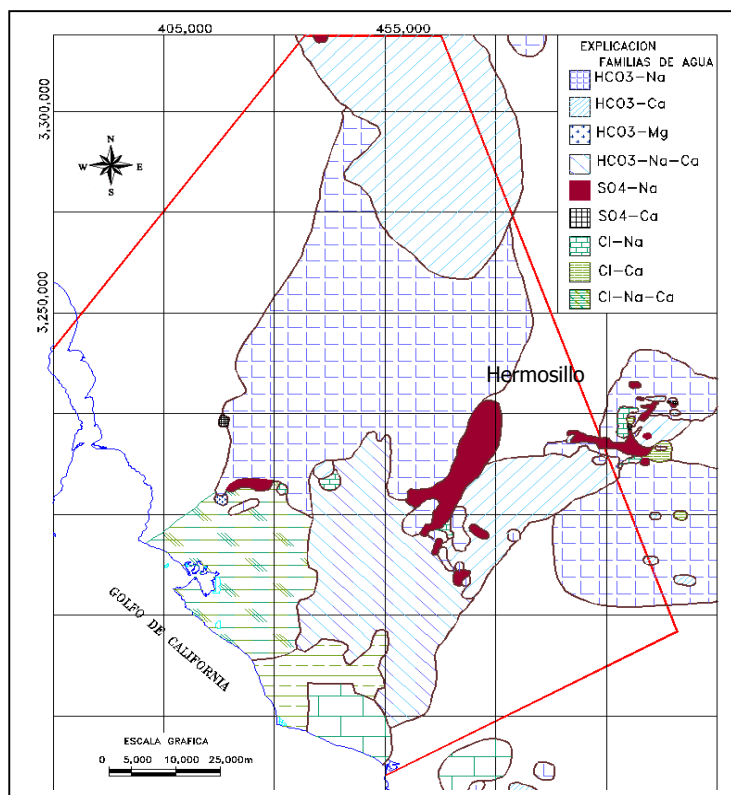


Figura 8.7 Distribución de familias de agua en los acuíferos Costa de Hermosillo y valle del río Sonora.

8.3.6 Muestreo Discreto en Pozos Abandonados (MD).

Esta actividad se desarrolló en 14 pozos de la red de monitoreo de la conductividad eléctrica vertical (CEV). La toma de muestras se realizó a profundidades seleccionadas con los registros obtenidos en esa actividad; se utilizaron dos botellas muestreadoras marca Wildco, una de acrílico de 3" de diámetro y capacidad de 1.2 lt. y otra metálica de 2" y capacidad de 0.6 lt. En campo se siguió el mismo protocolo descrito para el muestreo mixto hasta su entrega para análisis a los laboratorios. Las familias de agua de estos pozos son principalmente Ca-Cl y Na-Cl, predominando esta última, lo que las relaciona estrechamente con la zona afectada por la intrusión salina.

En la zona de recarga potencial al acuífero de la Costa de Hermosillo, actual cauce del río Sonora y sus acuíferos interdependientes, definen el origen de un flujo local a transicional (semirregional) de recarga, de acuerdo con el criterio de Tóth (1963, en Fetter, 2001), que circula a través de rocas ígneas antes de su descarga en los sedimentos del acuífero La Victoria-Mesa del Seri. Esta composición litológica se caracteriza por ser sódica-bicarbonatada (Figura 8.7), si bien aparenta una distribución heterogénea, ya que se presenta en zonas aisladas, tanto en la parte centro-norte como hacia el sur y al Este de la presa Abelardo Rodríguez L. (Molino de Camou), así como en toda la parte central de esta zona. Esta heterogeneidad aparente se debe tanto a las zonas de captación de los aprovechamientos utilizados para el monitoreo como a la

geometría errática del acuífero, pero se considera que ésta es la familia típica del acuífero La Victoria.

Las aguas cálcicas-bicarbonatadas se encuentran en su mayoría en la parte centro-sur, cerca del cauce del río Sonora, mostrando la relación estrecha con la recarga desde el subálveo y por lo tanto su condición de agua de reciente infiltración. Hacia el extremo sureste del vaso de la presa, los aprovechamientos del acuífero de la Mesa de Seri corresponden a la familia sódica-sulfatada, debido a la condición de evaporación intensa que ha generado depósitos evaporíticos en esa zona, en un proceso que ocurre cuando el agua del vaso alcanza a cubrirla con pequeños tirantes de agua y después tienden a desecarse. La mayoría de los cortes litológicos de estos pozos muestran la presencia de arcillas, arcilla con poca arena, arenas arcillosas en los primeros 30 metros, ambiente relacionado con aguas con circulación restringida. Por debajo de esta secuencia, los pozos que alcanzan mayor profundidad cruzan por una secuencia de arenas, gravas y boleos e intercalaciones de basaltos muy fracturados y alterados, dando como resultado un carácter cálcico-bicarbonatado. Existen aguas sódicas-sulfatadas cerca del cauce del río San Miguel de Horcasitas en forma alineada de norte a sur, paralela al río, desde El Saucito hasta La Victoria; esta misma familia se presenta en la zona de La Colmena, cerca de El Nogal, así como cálcicas-sulfatadas al sur de El Nogal.

Las aguas más someras son cálcicas-bicarbonatadas y corresponden a agua de reciente infiltración, cuya influencia depende del flujo base del río Sonora; esta agua se encuentra en San Pedro El Saucito, en norias de la zona de La Colmena y en San Bartolo, pero la mayor concentración de pozos de esta familia está al noreste de la presa Abelardo Rodríguez L., donde los aprovechamientos someros reciben mayor influencia del flujo del río.

8.3.7 Resultados de la interpretación hidrogeoquímica.

Las isólinas de concentración de sodio y cloruros son consistentes con su distribución y la configuración de la CEV. De igual manera, la distribución de bromuro tiene una configuración semejante a las mencionadas; esto es importante si se toma en cuenta que Hem (1970) encontró que su presencia confirma la intrusión marina. Ello, considerando que es un elemento conservativo, abundante en agua de mar (>65 mg/lit) y no en agua continental (Hem, 1970). Otros autores lo han utilizado como trazador con el cloruro para definir los frentes de intrusión (Custodio y otros, 1997, 2003); sus trabajos mencionan que una relación alta de rCl/rBr generalmente representa una muestra inequívoca de presencia de agua de mar.

Su distribución es muy semejante en el acuífero bajo estudio, y confirma las zonas más afectadas por la intrusión salina obtenidas por métodos indirectos y directos (Figura 8.8). La Figura 8.9 muestra el paralelismo que existe entre las concentraciones encontradas de ambos iones a cinco años de evolución en la Costa de Hermosillo.

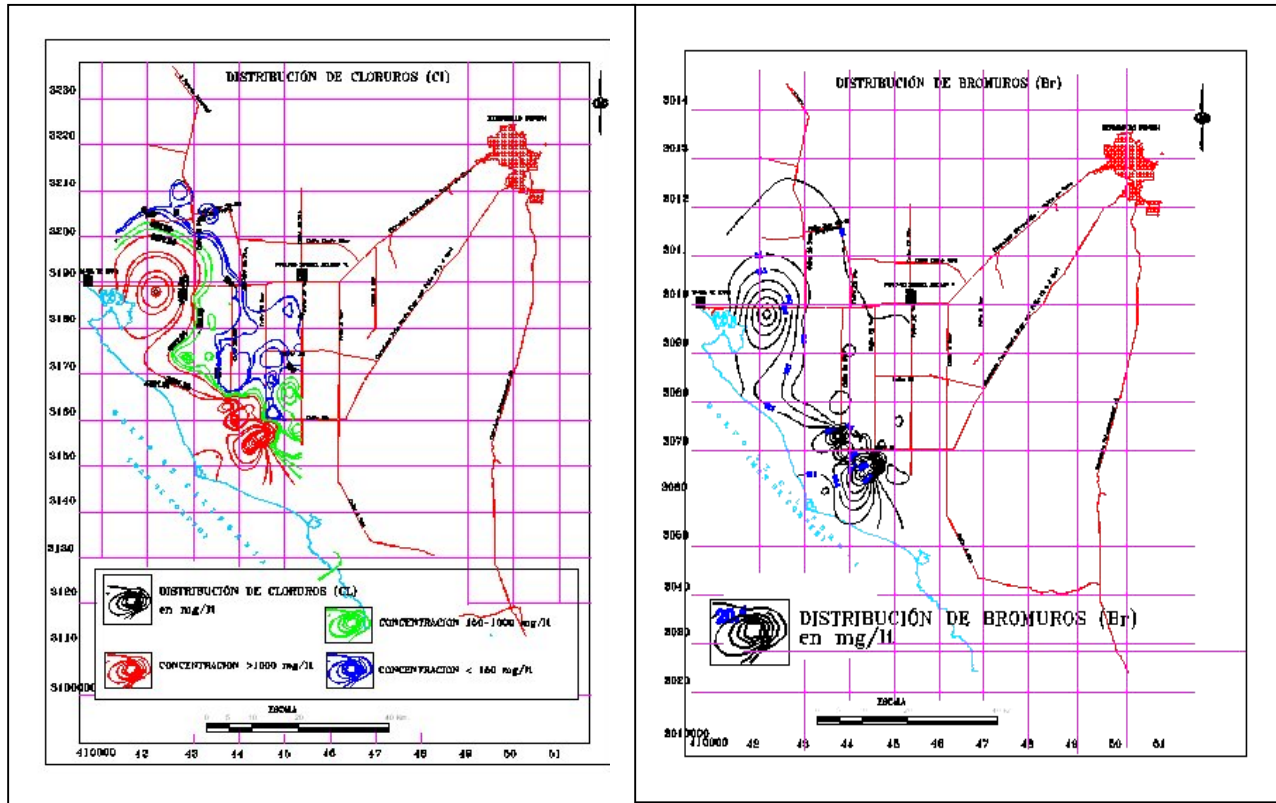


Figura 8.8 Distribución de la concentración de cloruros (mg/l), a la izquierda. A la derecha, bromuros. Ambos iones generan una ordenación que es consistente con la posición de la máxima salinidad mostrada en términos de CE y STD, para definir la zona de interfase marina en verde y el frente de intrusión en rojo.

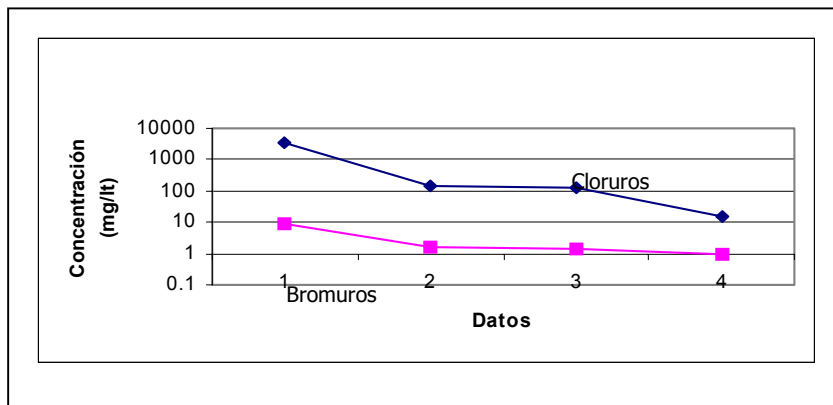


Figura 8.9 Comportamiento de bromuros y cloruros.

Las relaciones de índices geoquímicas, como $rCl/rHCO_3$, expresan igualmente la distribución de la salinidad (Figura 8.10). En consecuencia, se definen espacialmente dos zonas de mayor salinidad y afectación por la intrusión salina, al sur El Sahuaral y al norte el estero de Bahía Kino y una franja de agua dulce que ha permanecido protegida. La calidad del agua dulce en esta zona, se confirmó con la perforación del pozo PB-1 cuya salinidad del agua subterránea, en términos de CE, fue de 350 $\mu S/cm$.

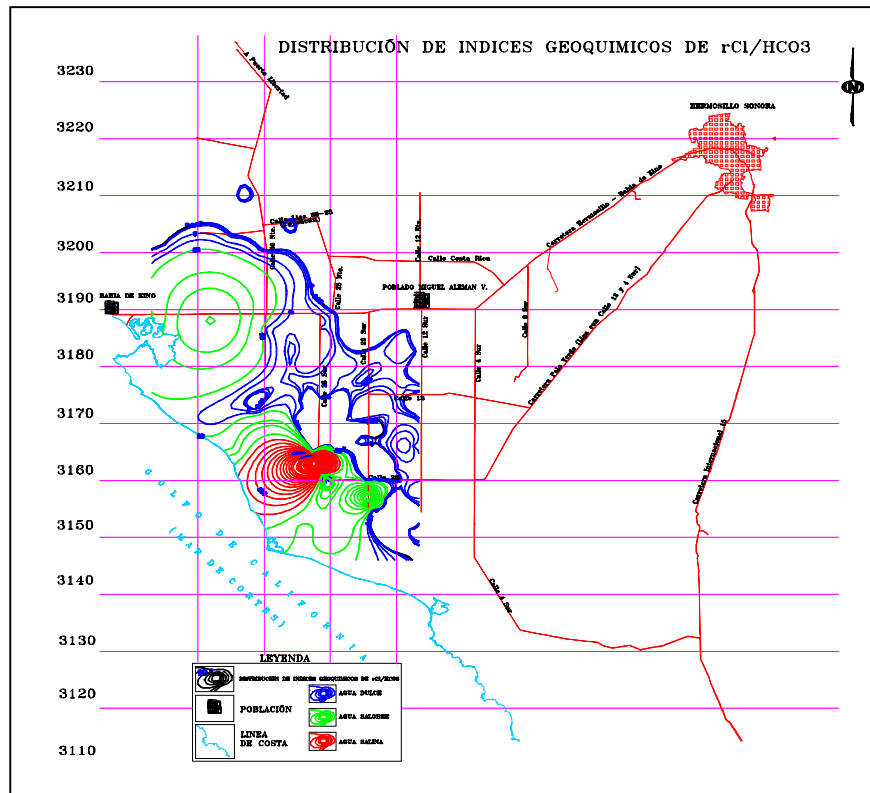


Figura 8.10 Distribución del índice $rCl/rHCO_3$. Nótese la semejanza con la distribución de CE para el agua mixta. Las líneas en azul representan agua dulce, en verde la zona de interfase y en rojo el frente de intrusión marina.

8.3.8 Calidad del agua en términos de salinidad (STD).

La calidad del agua dulce que se considera representativa del acuífero es en términos de STD 350 mg/lit. Esta salinidad se relaciona con la distribución litológica (mayor y menor permeabilidad); en consecuencia, donde éste aún no ha sido afectado por la intrusión salina, *los sólidos totales disueltos (STD) varían entre 228 a 844 mg/lit*, con una consistencia mayor entre 400 y 450 mg/lit; estas zonas cuentan con una permeabilidad más alta. Con base en el universo de muestras, se puede decir que el agua dulce se encuentra en mayor proporción entre las calles 12 y 20; disminuye el número, pero aún es importante, entre las calles 20-28; y el menor número se encuentra entre las calles 28-36, donde se advierte la presencia de pozos con agua de mayor salinidad. De las 153 muestras de agua obtenidas, 25 tienen valores de CE entre 1000 y 10000 $\mu S/cm$, lo que representa el 23.35% del total. De estas muestras se obtuvo una relación entre STD y CE, cuyo coeficiente de correlación es cercano a la unidad (0.976), observándose que se pueden describir como una función lineal, que se ajusta a una recta cuya ecuación es $y = 1.298x - 66.239$. Incluyendo todo el universo de muestras obtenidas en este estudio, la función lineal es una recta con ecuación $1.312x + 27.915$ y coeficiente de correlación de 0.98. El valor del factor M de la recta es idéntico al obtenido por métodos geofísicos con los valores de resistividad y STD del fluido (capítulo 3). El número de muestras que se encuentran con valores menores a 1000 $\mu S/cm$ es el 85%. Existe un amplio intervalo de concentraciones de sólidos

disueltos, por lo que *la calidad del agua proveniente del relleno aluvial varía de dulce a tolerable*, según el criterio de potabilidad de la APHA (1995). Las zonas con influencia de la faja costera presentan calidades de tolerable a salobre en la zona norte y de salobre a salada en la sur, con intervalo de 2000 a 31,520 mg/l de STD, en las que se nota el efecto de la intrusión marina. De igual manera, la relación entre la CE y los cloruros está definida como una función lineal que se ajusta a una recta cuya ecuación es $y = 2.3501x + 530.88$, con un coeficiente de correlación de 0.97 (Figura 8.11). En ella se aprecian los tres grupos de calidad de agua bien definidos: dulce ($< 2000 \mu\text{S/cm}$), salobre (2000 a $10,000 \mu\text{S/cm}$) y salina ($> 10,000 \mu\text{S/cm}$).

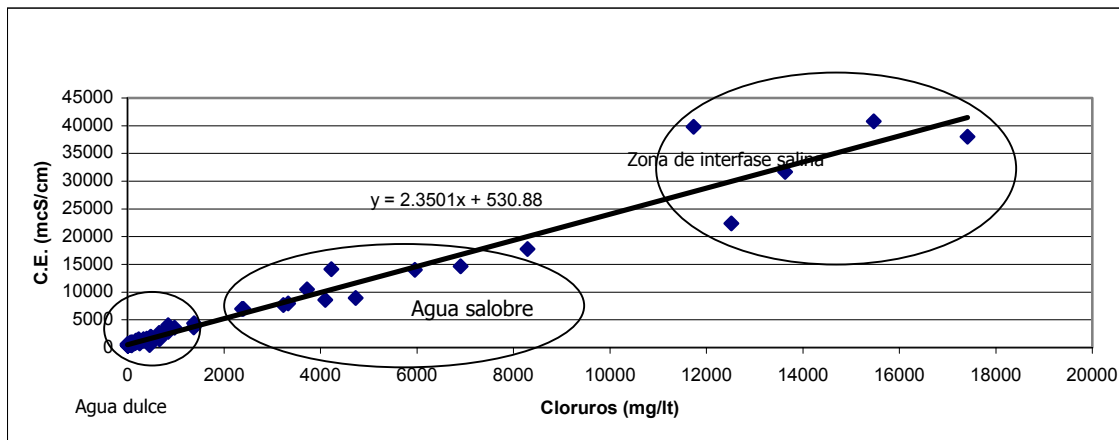


Figura 8.11 Relación entre la CE ($\mu\text{S/cm}$) y cloruros en el acuífero Costa de Hermosillo.

La Figura 8.12 muestra cómo es la relación de la concentración de STD para las aguas bicarbonatadas y las cloruradas. En ella se observa que las aguas bicarbonatadas tienen valores más bajos y las cloruradas más altos. El universo de muestras es de 95, con 50 bicarbonatadas y 45 cloruradas, lo que da una idea más clara de la presencia de agua mezcla intrusionada en casi el 50% de las muestras, prácticamente el equivalente al volumen alcanzado por la intrusión en el acuífero.

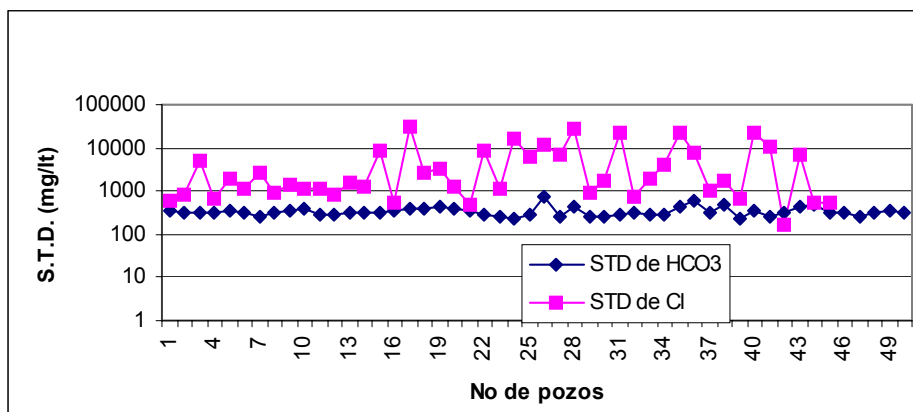


Figura 8.12 Concentración de STD para aguas bicarbonatadas y cloruradas.

El agua subterránea intrusionada por el agua de mar se correlaciona con esta diferente abundancia del ión dominante. Los índices geoquímicos de la relación

rCl/HCO_3 , según el criterio de Schoeller, sugieren que el 74% de 97 muestras corresponde a agua dulce, cuyos valores de CE son menores a 2,000 $\mu S/cm$ ($rCl/HCO_3 = 0.1-5$); el 11% son aguas salobres $CE = 1492 - 4400 \mu S/cm$ ($rCl/HCO_3 = 5.0-20$) y el 15% restante son aguas que denotan intrusión marina con valores de CE entre 7,000 – 40,800 $\mu S/cm$ ($rCl/HCO_3 > 20$).

Flúor. Las concentraciones de flúor son prácticamente nulas en todo el acuífero de la Costa. La presencia de este ión se registró solamente en los pozos Los Janos I y II (muestras 36 y 37), muy cercanos uno de otro, aproximadamente 15 km al noreste de Kino. Las concentraciones varían entre 0.27 y 0.96 mg/lit para el agua de acuífero, valores que se consideran bajos y dentro de los límites permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994).

La excepción principal dentro del área de estudio es el pozo PHB-15, cuya concentración es comparativamente alta, de 8.31 mg/lit. Esta agua ha mostrado un comportamiento geoquímico e isotópico distinto al del acuífero de la Costa, por lo que su caso se considera aparte, dado que se le atribuye un origen diferente, como se explica más adelante. Se cree que la presencia del flúor en el agua de este pozo está asociada con la presencia de rocas volcánicas ricas en metales alcalinos, las cuales forman parte de su columna litológica. Ello también lo distingue y confirma el origen y el medio de almacenamiento diferentes de esta agua subterránea con los del acuífero granular de la costa. La interpretación del agua aplicando índices geoquímicos ($rNa/Ca+Mg$) es útil para diferenciar el medio en el que se encuentra almacenada el agua subterránea; se aprecia que la química del agua del acuífero es completamente distinta de la representada por la muestra del pozo PHB-15, cuyas características ayudan a confirmar la presencia de agua proveniente de un medio rocoso compuesto por rocas volcánicas extrusivas, muy diferente al medio granular (Figura 8.13).

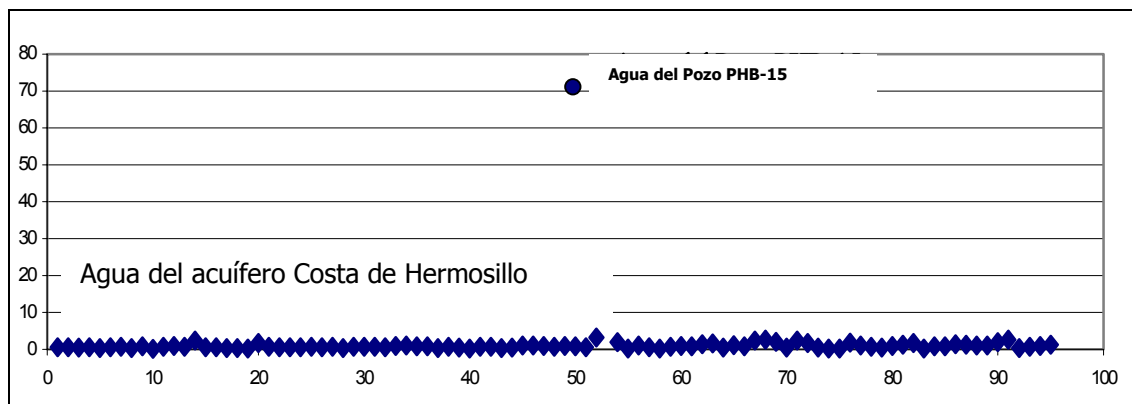


Figura 8.13 Índice geoquímico de $rNa / r(Ca+Mg)$. Las abscisas denotan el índice geoquímico y las ordenadas el número de muestras.

Estroncio y Litio. La química del estroncio es muy parecida a la del calcio. El estroncio es prácticamente común en pequeñas cantidades, reemplazando al calcio o al magnesio en los minerales de las rocas ígneas. En el agua subterránea se presenta en bajas concentraciones, sin embargo, cuando su presencia es en grandes cantidades,

puede ser importante para distinguir entre aguas salobres-salmueras y agua dulce (Hem, 1970). En el área de estudio, las concentraciones de estroncio (Sr) predominan en valores traza menores a 1 mg/l, los cuales representan el 53% de las muestras, lo que es consistente con la distribución de la CE para aguas dulces, no afectadas por agua salina. Las concentraciones más altas se ubican en las zonas del Sahuaral y estero de Kino, y confirman la definición de las zonas de mayor afectación por intrusión salina a partir de las distribuciones espaciales de cloruros y bromuros. Estas muestras varían entre 13.4 y 51.2 mg/l de estroncio y corresponden a los pozos PM1, PM2, 88 (Lerdo), 84 (Ángel Grande) y pozo de observación PCH-3R. Todos ellos están por muy encima de la norma de potabilidad de la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) de 1.4 mg/l y adicionalmente sus concentraciones son considerablemente mayores al valor típico de 8 mg/l del Sr en el agua de mar.

El litio (Li) es un metal alcalino, que tiene tendencia a almacenarse en pegmatitas y medios evaporíticos y su radio iónico permite algo de substitución por magnesio (Rankama y Sahama, 1950). Sin embargo ha sido poco utilizado, al igual que otros elementos trazas analizados, en un medio costero para confirmar sospechas sobre la posición de la interfase salina. En este caso se tomó como base que las concentraciones de litio (Li) en las muestras de agua de la costa prácticamente no existen donde el agua dulce no ha sido alcanzada por la intrusión salina. De aquí que en aquellas donde se presenta coincide plenamente con muestras que se encuentran entre la zona de interfase y la intrusión marina, tales como La Laguna (11), SPR Emiliano Zapata, Campo Cuatro, los pozos de monitoreo PM 1 y 2 y PCH-9A-R. Las concentraciones varían de 0.03 en los pozos 87 y 106 a 0.14 mg/l en el pozo 62. En el PHB-15 se tiene una concentración de 0.12 mg/l, la cual se podría correlacionar más bien con el origen del agua almacenada en rocas volcánicas que con intrusión marina.

Dureza. La concentración de la dureza del agua en términos de CaCO_3 , predomina con valores altos, generalmente como respuesta a las altas concentraciones de calcio y magnesio en la zona de interfase y en el frente de intrusión. Los valores más bajos y típicos del acuífero se encuentran en la franja donde se tiene agua de buena calidad. De acuerdo con la clasificación de Durfor y Becker (1964), el 13% son aguas moderadamente duras (61 a 120 mg/l), el 21% son duras (121 a 180 mg/l), el 66% son muy duras (>180 mg/l) y predominan como aguas altamente incrustantes.

Alcalinidad. Este parámetro es la expresión de las especies moleculares de ácidos débiles, los cuales no están totalmente disociados por encima de un pH de 4.5 (Hem, 1978). La alcalinidad representa la actividad del ácido débil más común en el agua subterránea, el ácido carbónico (HCO_3). Los iones hidrógeno producidos por disociación de las especies de ácido carbónico disuelto son la principal fuente de H^+ , mismo que representará el proceso de disolución roca-mineral. De aquí que la alcalinidad sea entendida en la geoquímica del agua como la capacidad de la solución para neutralizar los ácidos. Por lo tanto, el pH de un agua indica directamente las relaciones de ciertas especies iónicas con otras, si se establece el equilibrio. En el área

de estudio, la alcalinidad mayor tiene una concentración de sólidos totales de 22,594 mg/lit, y por su dominancia iónica es del tipo Na-Cl y pH de 6.0; la menor tiene concentración de STD de 325 mg/lit y se clasifica como HCO₃-NA, con pH de 7.0. Respecto al pH, el mayor valor de este parámetro se registró con 8.0 y el menor con 6.0. Su correspondencia con la dureza es baja para el primero con 187.39 mg/lit y alta para el segundo con 6981.79 mg/lit, en términos de CaCO₃. La concentración de STD es de 417 para el primer caso y de 22594 mg/lit para el segundo. La clasificación por iones dominantes para estas muestras es de Ca-HCO₃ y Na-Cl, respectivamente.

8.4 Hidrología isotópica

La toma de muestras para análisis isotópico siguió el protocolo de muestreo definido por el Laboratorio Geochron de Cambridge, Massachussets, E.U.A, que corresponde a su vez con el establecido por la Agencia Internacional de Energía Atómica. Las concentraciones de oxígeno fueron medidas con el espectrómetro de masas del laboratorio citado, de acuerdo con el procedimiento descrito por Craig (1957); la incertidumbre de estos valores es de $S = 0.3$. El análisis de cada muestra fue realizado dos veces y en cuatro muestras hasta tres veces, asegurando una incertidumbre de ± 1 .

La actividad siguió el modelo hidrogeológico y la posible definición de cinco familias isotópicas, sugeridas preliminarmente como facies hidrogeoquímicas por trabajos previos de diversos autores:

- i) Acuífero superior (somero)
- j) Acuífero profundo
- k) Interfase salina (agua dulce con presencia de agua marina)
- l) Agua de mar
- m) Agua salina (salmueras)

Con este criterio se esperaba representar a todas las profundidades, a todas las regiones geográficas del acuífero y a las diferentes salinidades.

8.4.1 Caracterización isotópica del agua.

Isótopos de oxígeno e hidrógeno en el agua. Además de los resultados de oxígeno e hidrógeno obtenidos para este estudio, se integraron a la base de datos otros resultados de referencias nacionales e internacionales publicados por IFUNAM (1976), Payne (1978), la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA) y Rangel (2000). La referencia para ambos isótopos es la relación oxígeno-18/oxígeno-16 y deuterio/hidrógeno del Viena Standard Mean Ocean Water (V-SMOW). La base de datos quedó conformada por 124 análisis de isotopía existentes del área de estudio, y tienen un promedio de valores delta de: $\delta D = 37.53$ y $\delta^{18}O = 5.43$.

Las concentraciones isotópicas están expresadas como la abundancia relativa en partes por mil (‰), según la práctica aceptada. Las unidades para esta relación son los "δ", definidos como:

$$\delta_{x-r} = [(R_x - R_r)/R_r]1000$$

Donde R es la relación atómica entre la concentración de isótopos pesados o raros con respecto a los ligeros o abundantes para la muestra *x* y la referencia *r*. Ésta se refiere a la abundancia relativa, ya que la relación de abundancia absoluta de isótopos usualmente no se mide en las aguas naturales y en otros compuestos naturales. Solamente se determinan las diferencias relativas de la relación entre el isótopo pesado con la mayor abundancia del isótopo ligero de la muestra; esta diferencia es designada con la letra "δ" y representa:

$$\delta = \left(\frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{referencia (SMOW)}}}{R_{\text{referencia (SMOW)}}} \right) \times 1000$$

Obviamente, los valores positivos representan las muestras que se han enriquecido en las especies isotópicas de isótopos pesados con respecto a la referencia; los valores negativos corresponden a muestras abatidas en las especies de isótopos pesados. Dado que las diferencias son generalmente muy pequeñas, es conveniente expresar los valores "δ" en diferencias por mil:

$$\delta = (\text{‰}) = \delta \times 1000$$

La información integrada al estudio corresponde a muestras que caracterizan aguas del acuífero Costa de Hermosillo y del valle del río Sonora, gradiente arriba de la Costa de Hermosillo. Se incluyen igualmente muestras de agua superficial de río Sonora, Hermosillo y los acuíferos de Ures, Santa Rosalía, La Poza, El Sahuaral, San Miguel de Horcasitas, El Zanjón y Aconchi, para fines comparativos de diferencias y coincidencias entre los tipos de aguas.

Los resultados muestran valores negativos comparados con el estándar del agua de los océanos, esto porque son derivados de la precipitación originada del agua previamente evaporada del océano. Esta agua está enriquecida en isótopos ligeros (δ negativo) debido al fraccionamiento isotópico durante la evaporación. La composición isotópica de las muestras de agua coincide muy cercanamente con la relación dada por Craig (1961). Para explicarse la distinción isotópica del agua es necesario discutir la relación de δD contra δ¹⁸O en el agua de la precipitación meteórica. La composición isotópica de virtualmente toda la precipitación moderna (Friedman, 1953; Craig, 1961b; Dansgaard, 1964) cae en la recta de la línea meteórica mundial (LMM), cuya ecuación es:

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

La precipitación ecuatorial tiene valores de δ¹⁸O y δD cercanos a cero; progresivamente, a mayor latitud y/o altitud, la precipitación llega a ser más abatida en

^{18}O y D. Presumiblemente esto ha sido desde regímenes climáticos del pasado (Dansgaard, 1964). El efecto es, en términos simples, una respuesta a la temperatura superficial. La precipitación, por lo tanto, tiene valores menores de sus deltas $\delta^{18}\text{O}$ y δD en climas fríos que en los climas más cálidos. Por consiguiente, antes de que el agua recargue y alcance el acuífero, puede escurrir por la superficie durante largos períodos; esta evaporación quedará isotópicamente registrada como un dato a la derecha de la línea meteórica promedio en el diagrama $\delta^{18}\text{O}$ vs δD .

Bajo este criterio, los datos apoyan el origen meteórico para el agua subterránea en todos los acuíferos, incluido el de la Costa de Hermosillo, así como la presencia de agua muy antigua, almacenada bajo condiciones de confinamiento, en rocas volcánicas.

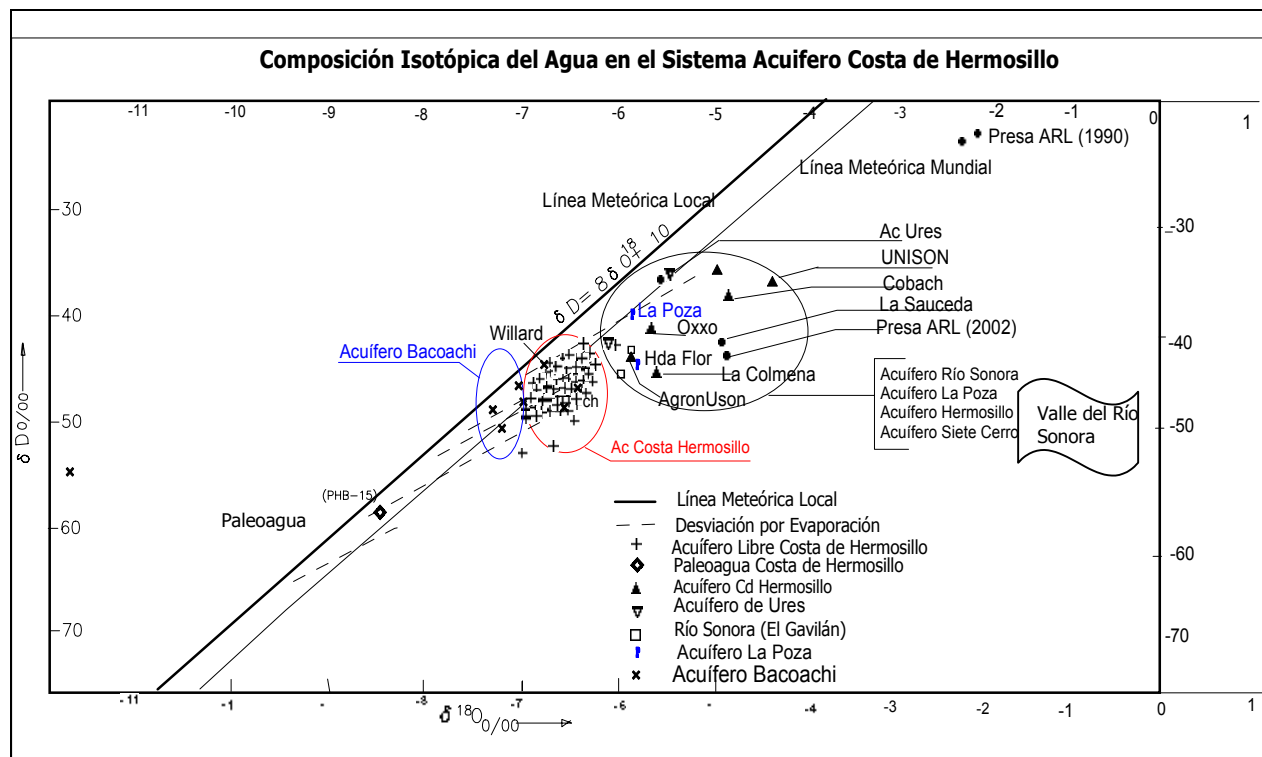


Figura 8.14. Composición isotópica de aguas subterráneas y su relación con LMM.

Apoyándose en esta gráfica (Figura 8.14), con la posición de los valores isotópicos de deuterio y oxígeno del agua subterránea con respecto al V-SMOW y otros factores de análisis, pueden hacerse las siguientes observaciones:

- Los valores que representan las aguas subterráneas de la Costa de Hermosillo pueden describirse satisfactoriamente por una recta cuya ecuación es $\delta\text{D} = 6.3681\delta^{18}\text{O} - 3.9779$, valores acordes con una región de condiciones climáticas áridas (Figura 8.15).

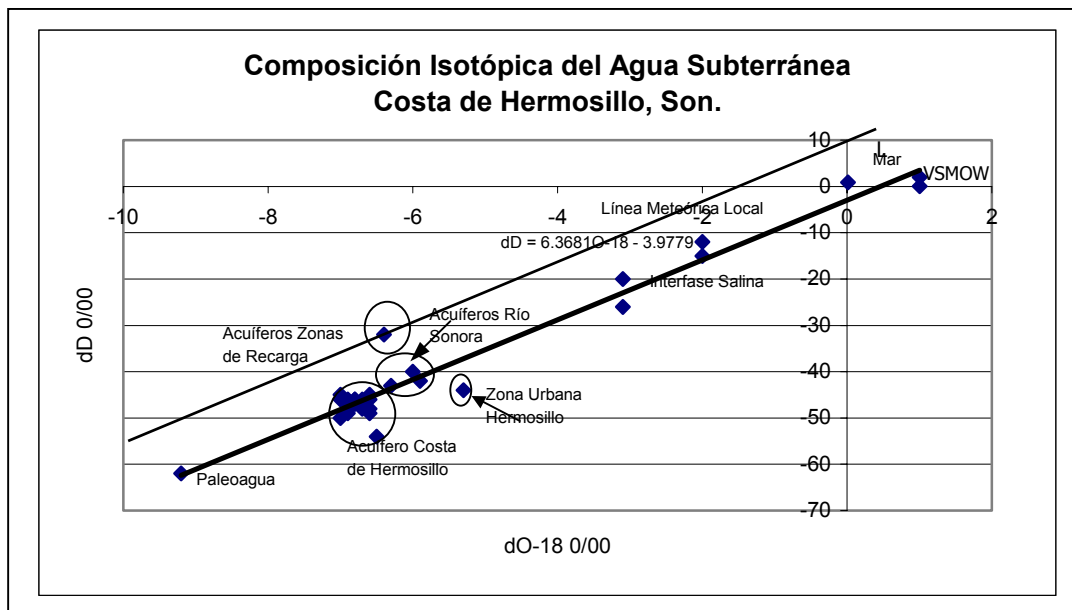


Figura 8.15 Recta de la composición isotópica del agua subterránea de la Costa de Hermosillo.

- b) Las concentraciones isotópicas de las muestras de agua ubicadas en acuíferos próximos al río Sonora muestran que son afectadas por una evaporación rápida, típicamente desértica. Se presentan grados de evaporación de esta agua, los cuales, de acuerdo con lo esperado, tienen al río Sonora por origen. Sus promedios típicos se agrupan en $\delta D = -54.9 \text{ ‰}$ y $\delta^{18}O = -4.9 \text{ ‰}$. Estas aguas son de reciente infiltración y están sujetas a variaciones estacionales.
- c) Las concentraciones isotópicas de las aguas de la Costa de Hermosillo, tomadas en distintos años y coincidentemente en el mes de junio, se agrupan en un intervalo muy estrecho. Por consiguiente, y dado que son distintos muestreos y análisis, sugieren una cierta constancia de los valores isotópicos durante el lapso 1978-2001. Esto permite tipificar el agua por sus promedios isotópicos: $\delta D = -45.17 \text{ ‰}$, $\delta^{18}O = -6.39 \text{ ‰}$, lo que se percibe como estabilidad isotópica.
- d) Siguiendo el modelo propuesto de estratificación acuífera por otros autores, el usuario del campo Nochistongo (58) construyó en el mes de junio del 2000 un pozo que fue perforado a 300 m, ademado con tubería ciega y cementado hasta 160 m de profundidad; así estaba previendo no tomar agua del acuífero superior, que ha sido fuertemente afectado por intrusión salina en su localidad. El diseño de construcción tuvo por objetivo tomar únicamente agua del acuífero inferior. Con esta previsión, se esperaba tener una firma isotópica que correspondiera con la del pozo de observación PHB-15, la cual corresponde a la del acuífero inferior. La concentración isotópica del pozo Nochistongo resultó igual a la típica del acuífero de la Costa ($\delta D = -46 \text{ ‰}$; $\delta^{18}O = -6.8 \text{ ‰}$) y se agrupa con el resto de las muestras del denominado acuífero superior. Todo ello sugiere que no existen dos diferentes acuíferos, sino semiconfinamientos dentro de un solo acuífero, el cual trabaja, como se ha expresado previamente, como una sola unidad hidrogeológica, y por debajo de éste se encuentra agua premoderna almacenada en rocas volcánicas.

- e) Esta caracterización isotópica, correlacionada con la hidrogeofísica y la geología del subsuelo, permite advertir la posibilidad de que no existe un acuífero profundo, tal como se ha descrito en otros modelos hidrogeológicos previos de la Costa de Hermosillo, sino posiblemente agua fósil.
- f) El agrupamiento de valores de las muestras del acuífero Costa de Hermosillo se da en torno a una sola familia isotópica, cuyo origen es meteórico, definiendo una firma isotópica típica del acuífero denominado superior y otra para el agua antigua.
- g) El agua subterránea que recarga al sistema acuífero de la Costa de Hermosillo, que proviene de los acuíferos de La Victoria-Mesa del Seri, Bacoachi, Zanjón, La Poza y zona urbana de Hermosillo, tienen un probable rango de elevación de zonas de recarga entre 650 y 1350 ± 50 msnm, calculados con la ecuación:

$$\delta^{18}\text{O} = - 2.13h - 3.3; \quad \text{Donde } h \text{ es un factor de altitud en km.}$$

- h) Existe suficiente evidencia para afirmar que la intrusión de agua marina ha penetrado gran parte del acuífero de la Costa de Hermosillo, por el noroeste (estero de Kino) y el sur del área de estudio (El Sahuaral). Las muestras que representan el avance de la intrusión salina son la 62, 84 y 88, así como los PCH-6, 7 y 8 que corresponden a muestreo y análisis previos; su valor isotópico promedio es de $\delta\text{D} = - 18.25$ ‰; $\delta^{18}\text{O} = -2$ ‰. Todas ellas se encuentran ubicadas al sur del área de estudio, en la zona de El Sahuaral, frente a Punta Baja, donde se tiene la zona de menor permeabilidad. Hacia el norte del área de estudio, frente a Bahía Kino, las muestras 31 y 83 revelan un exceso de deuterio que sugiere una zona de mezcla de aguas que parece corresponder con otra posible ruta de recarga de agua marina, lo cual es consistente con la geoquímica del agua. En el acuífero de la Costa de Hermosillo, la relación del contenido de cloruros contra $\delta^{18}\text{O}$ es igualmente consistente con esta afirmación; la Figura 8.16 muestra los grupos de agua claramente definidos por estos parámetros, como una función lineal que se ajusta a una recta cuya ecuación es $y = 2313.9x + 16296$. La posición que guardan con respecto a la línea de tendencia se relaciona con desviaciones por evaporación.

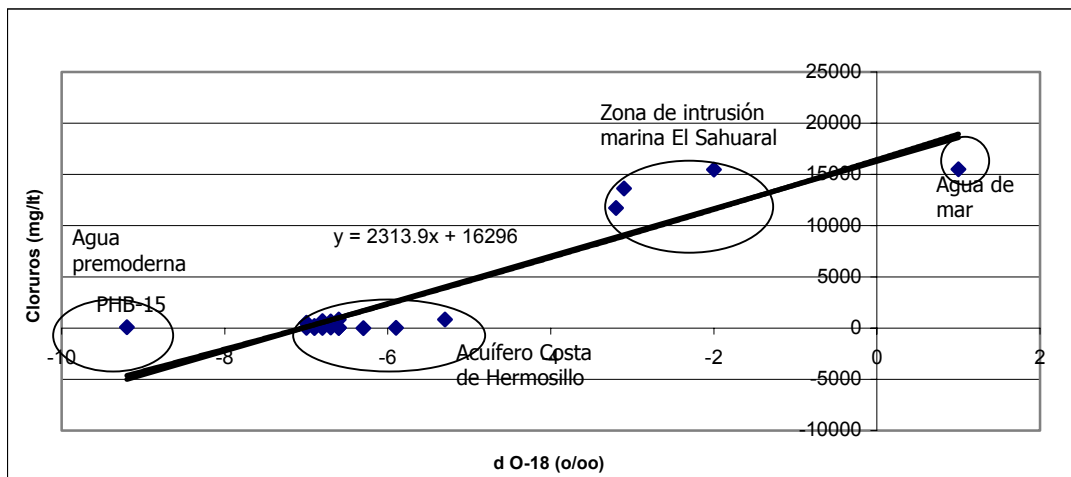


Figura 8.16. Relación de O-18 vs cloruros.

- i) El pozo de observación PHB-15 presenta una concentración isotópica promedio de $\delta D = -62 \text{ ‰}$; $\delta^{18} O = -8.8 \text{ ‰}$. Estos valores del delta están muy abatidos en isótopos pesados y son distintos de los obtenidos para el acuífero de la Costa de Hermosillo. La correlación de interpretaciones geológico-geofísicas con la caracterización isotópica sugiere que se trata de aguas muy antiguas, probablemente entrampadas (aguas fósiles), cuyo origen se dio bajo condiciones climáticas más frías y más húmedas que las actuales. Los datos de $\delta^{18}O$ y deuterio del agua subterránea del acuífero indican una evaporación más alta que la del agua de esta unidad, algo que sugiere una respuesta al promedio anual de la temperatura y a la escasa precipitación en la región, lo cual acentúa más su diferencia de origen con el agua antigua. Las determinaciones de tritio confirman las edades y la interpretación isotópica de las aguas subterráneas; los valores se encuentran en el rango de 0.1 a 0.5 U.T., lo que sugiere que las aguas son de origen meteórico, pero tienen más de 50 años de haberse infiltrado.
- j) El agua subterránea del acuífero de la Costa de Hermosillo, con la base de muestras analizadas por C-14, tiene un rango de edades relativas que varían entre 280 a 4,630 años (Tabla 8.2). Ello implica que las condiciones de aridez de la región tienen al menos 5,000 años, puesto que su concentración de isótopos lo apoya. La localización de la edad más antigua (Santa Rosalía) se encuentra entre la calle 20 y 28, ubicación que coincide con la fosa más profunda que conforma la topografía del basamento, lo que apunta a la posibilidad de un cambio de dirección hacia el NW y menores velocidades del flujo subterráneo.
- k) Aplicando el modelo WATEQF y la subrutina ISOTOPE para la interpretación de la química del carbón, Payne y otros (1978) sugieren que, asumiendo un $\delta^{13}C$ del bióxido de carbono del suelo igual a -18‰ , el cual se considera razonable para zonas áridas (Deines y otros, 1975), y un $\delta^{13}C$ igual a -0.6‰ para las rocas carbonatadas (Hoefs, 1973), el mejor valor entre las mediciones de $\delta^{13}C$ de la muestra analizada del PHB-15 (-10.69‰) y el calculado (-10.10‰) corresponde asumir un pH de la recarga de 7.5 y una presión parcial también supuesta para el bióxido de carbono del suelo igual a $10^{-2.15}$ atm. De acuerdo con el modelo, el agua de recarga tiene un total de carbón biogénico igual a 3.50 mmoles y un $\delta^{13}C$ igual a -10.82‰ . Lo anterior sugiere que el 93% del total del contenido de carbón de la muestra del PHB-15 es biogénico, y esto significa que la concentración de C-14 ha decrecido más por decaimiento radiactivo que por pérdida por disolución del carbonato.
- l) La composición química del agua apoya esta interpretación del PHB-15, pues está casi libre de calcio y magnesio (2.2 y 0.4 mg/lit), y para cumplir con lo antes descrito, el agua tiene que ser pobre en minerales de carbonato. Esto coincide con la naturaleza del medio en rocas volcánicas, en el cual se encuentra almacenada esta agua.

m) El agua subterránea del PHB-15 almacenada y semiconfinada en sedimentos marinos y rocas volcánicas tiene un paleo-origen, presenta edades que varían en el rango de 25,820 a 30,000 ± 190 años, que correspondería con una procedencia de recarga bajo condiciones climáticas pleistocénicas (interglaciares), de acuerdo con los análisis de C-14 actuales y existentes, muy distintas a las condiciones climáticas en las que habría sido recargado el acuífero de la Costa de Hermosillo. En esta misma condición se encuentra el agua del acuífero Willard, próximo a Hermosillo, con edad relativa de 15,480 años. La muestra del pozo centinela PCH-4 sugiere que se trata de agua de mezcla, y se encuentra isotópicamente entre esta agua antigua y la del acuífero, lo cual corresponde con su ubicación geográfica y su disposición litológica. De igual manera, encontrar condiciones de agua de mezcla moderna con antigua (pre-moderna) implicaría que el agua del riego moderno se encuentra aún en tránsito, en un proceso de arribo próximo para alcanzar al nivel freático abatido.

Tabla 8.2. Edades relativas de ¹⁴C del agua subterránea, Costa de Hermosillo.

Pozo	Fecha muestreo	T°C	pH	δ ¹³ C ‰	¹⁴ C pcm*	Localidad	ACUIFERO	Edad en Miles de Años
37-23	21-7-75	32	7.7	-10.43	78.96 ± 2.4	San Francisco	Costa Hillo.	2,751 ± 50
44-17	21-7-75	32	7.6	-9.80	81.0 ± 2.4	SPR del Yaqui	Costa Hillo.	2,848 ± 40
50-04	25-7-75	31	7.7	-9.39	77.9 ± 2.5	El Porvenir	Costa Hillo.	2,751 ± 30
PHB-15	26-7-75	50	8.1	-10.69	2.12 ± 0.76	Pozo PHB-15	Paleoagua	30,000±190
PHB-15	06-06-00	31.9	7.5	-11.4	4.02 ± 0.09	Pozo PHB-15	Paleoagua	25,820 ± 190
20/28-40	07-06-00	31.9	7.5	-10.6	60.83 ± 0.27	Nochistongo	Costa Hillo.	2,890 ± 40
MD-08	03-06-00	30	6.8	-11.4	69.24 ± 0.20	Zapata Vela	Costa Hillo.	2,950 ± 30
20/28-36	06-06-00	33	7.0	-9.7	56.18 ± 0.25	Santa Rosalía	Costa Hillo.	4,630 ± 40
PMB-11 (51-07)	14-11-02	29.8	7.3	-11.9	61.07+/-0.27	Rancho Guadalupe	Bacoachi	3,960+/-40
PMH-11 (50-06)	17-11-02	28	7.0	-10.8	92.36+/-0.41	San Luis	Costa Hillo. Siete Cerros	640+/-40
PMH-33	23-11-02	28.8	7.0	-7.7	14.57+/-0.08	Willard # 2	Willard	15,480+/-50
PMH-35	24-11-02	24.9	7.0	-10.4	96.56+/-0.38	Esc. Agronomía UNISON	Costa Hillo. Calle Cero	280+/-40
PMH-38	26-11-02	27.2	6.8	-13.0	93.75+/-0.41	Campus UNISON	Ciudad de Hermosillo	520+/-40

Dice Mazor (1997) que la vida media del carbono-14 es de 5,730 años. En el presente análisis, el dato de fechamiento se basa sobre la vida media de Libby de 5,570 años para ¹⁴C y las edades están referidas al año 1950 de nuestra era (Cherkinsky, 2002). Dada esta vida media, lo convierte en útil para fechar aguas hasta de 50,000 años (Drever, 1997). El error de los resultados es ± 1's, a juzgar por el dato analítico únicamente. El estándar moderno utilizado por el Laboratorio Geochron Inc. es 95% de la actividad del ácido oxálico. En el análisis isotópico es posible diferenciar las tres composiciones isotópicas del agua subterránea; la pre moderna de los acuíferos de la costa de Hermosillo, de las del agua moderna del valle del río Sonora, la cual es más evaporada que la de las zonas de su recarga (Figuras 8.17, 8.18 y 8.19). Adicionalmente, la concentración de tritio es otro sustento, pues para estas últimas, la composición es prácticamente la misma con 11 UT y 10.5 UT para el valle del río Sonora y para las zonas de recarga respectivamente, lo que que las correlaciona muy bien con un mismo origen, definiendo claramente agua moderna y diferenciando las unidades hidrogeológicas que mantienen sistemas de flujo locales de los regionales (Figura 8.18).

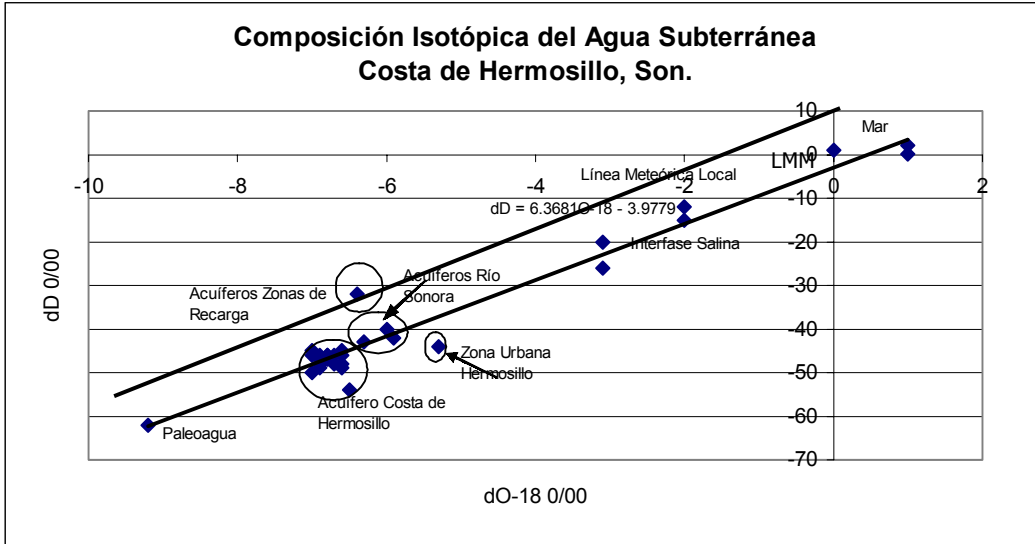


Figura 8.17. Composición isotópica del agua subterránea en la región.

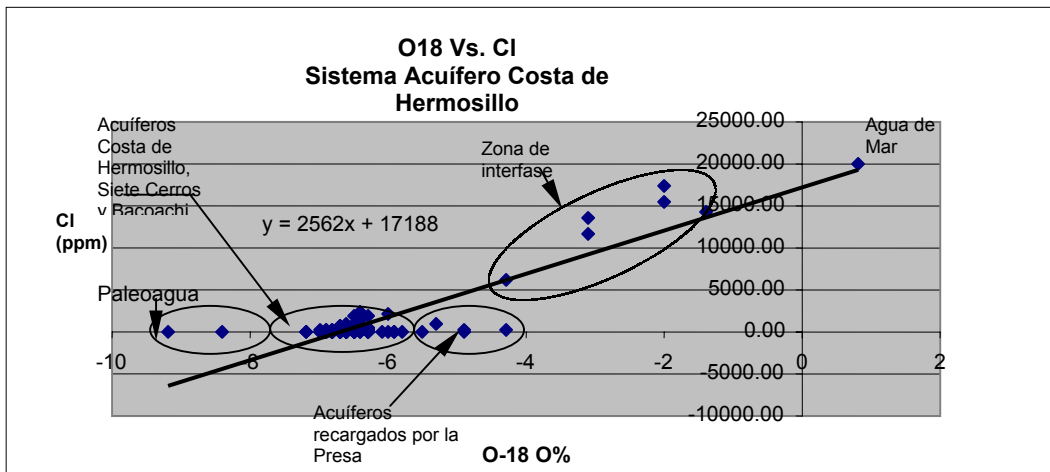


Figura 8.18 Relación Cl y O18 en el sistema acuífero Costa de Hermosillo.

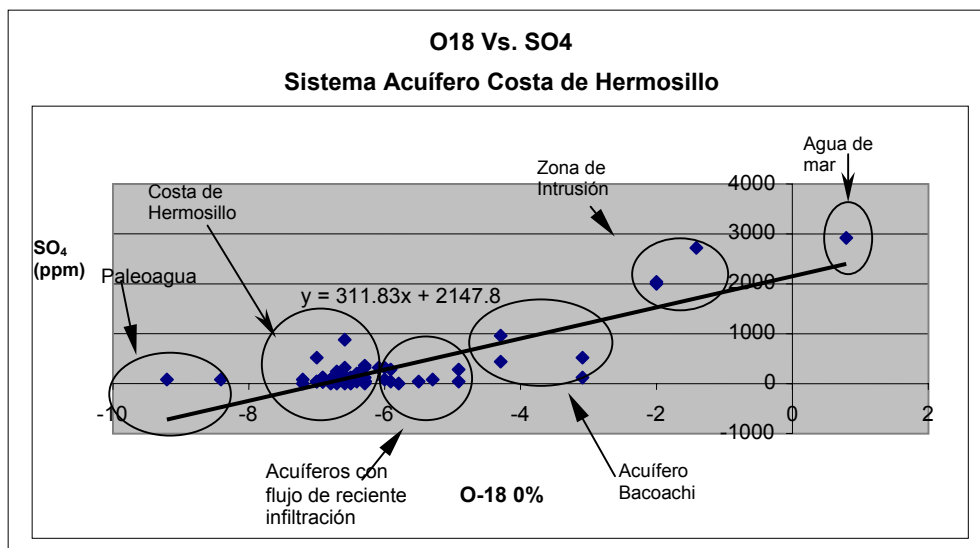


Figura 8.19 Relación $\delta^{18}O$ y SO_4 en el sistema acuífero Costa de Hermosillo.

El resultado de la gráfica de oxígeno-18 contra cloruros (Figura 8.18), es la diferenciación marcada entre los acuíferos que reciben recarga de reciente infiltración (más relacionados con agua de la presa) y aquellos cuya recarga proviene de flujos regionales. Los segundos presentan un agrupamiento de muestras de agua provenientes de las zonas Costa de Hermosillo, Siete Cerros y Bacoachi; la mayoría de esas muestras indican mezcla de agua entre la descarga antigua del Bacoachi y la zona de la Costa de Hermosillo, que se interpreta como una homogeneidad litológica y una procedencia de un mismo origen, pero que no hace distinguibles los diversos procesos de evaporación. Es igualmente bien definido un exceso de cloruros en las muestras que proceden de la zona de interfase salina, mientras que son fuertemente enriquecidos isotópicamente.

Los datos de sulfato contra oxígeno-18 coinciden en general para la zona de mezcla de agua del sistema de recarga superficial (infiltración reciente). Las muestras provenientes de la zona de interfase salina sugieren que a medida que se incrementan en salinidad, principalmente debido a la infiltración de agua de mala calidad, alcanzan un exceso de sulfatos; aquellas que muestran un exceso de sulfatos en la zona de la Costa de Hermosillo, son afectadas por el proceso de lixiviado de depósitos evaporíticos (Figura 8.19).

8.5 Regionalización de acuíferos con base en el oxígeno e hidrógeno.

La variabilidad observada de la abundancia de los isótopos de oxígeno e hidrógeno en los materiales naturales del planeta van en rangos de alrededor de $\pm 50\text{‰}$ como el promedio para ^{18}O y de + 300 a -500‰ para deuterio. La primera pregunta en todo estudio isotópico es para saber si la abundancia es o no resultado de los procesos de fraccionamiento isotópico dentro de un sistema cerrado, o si ganó o perdió isótopos el material terrestre. En otras palabras, es saber si existe una evolución continua de la abundancia isotópica en la superficie de la Tierra. Bajo este criterio, utilizando los datos existentes, se realizó una configuración de la distribución de valores isotópicos de O-18 en el área de estudio (Figura 8.20). De esta distribución se aprecia la homogeneidad isotópica del agua subterránea que coincide principalmente con las zonas del frente de intrusión y ayuda a definir los grupos de las ocho zonas acuíferas originalmente mencionadas, por tanto sugiere que:

- 1) El acuífero río Bacoachi está constituido por dos unidades hidrogeológicas: a) zona norte desde su nacimiento, la cual ocasiona un flujo local que descarga en la zona Siete Cerros y b) zona sur, una unidad hidrogeológica que origina una recarga de flujo regional y semirregional que descarga al acuífero Costa de Hermosillo, con el que mantiene una interrelación estrecha.
- 2) Los ríos Zanjón y Sonora originan, por infiltración directa a lo largo de sus cauces, los acuíferos El Zanjón, Río Sonora y La Victoria-Mesa del Seri. Sus flujos subterráneos dan origen a la saturación de una unidad hidrogeológica en la zona urbana de Hermosillo.
- 3) El sistema acuífero de la Costa de Hermosillo, constituido por tres unidades hidrogeológicas: a) Zona Calle Cero, que recibe flujo de carácter local y semirregional

- desde la zona urbana de Hermosillo y principalmente del paleocauce del río Sonora; además recibe la descarga de flujo local por concepto de aguas negras de la ciudad de Hermosillo. b) Zona Calle Cero-Siete Cerros; esta unidad recibe la descarga de flujos semirregionales, que se originan al sur en La Poza y al norte en el Bacoachi Este y Oeste. c) Zona Costa de Hermosillo; recibe descarga de flujo semirregional y regional del acuífero de La Poza al sureste, y por el norte la descarga del Bacoachi.
- 4) Acuífero de Willard, limitado a las fronteras de la fosa tectónica, que es donde se depositaron los sedimentos que lo constituyen.

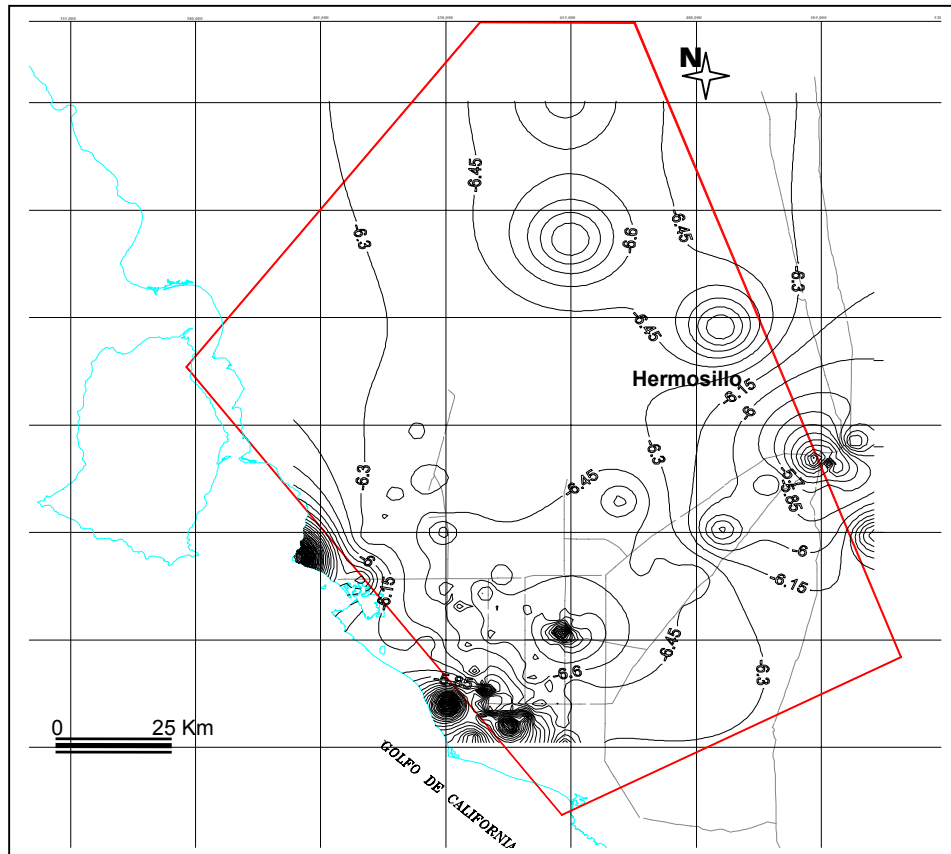


Figura 8.20 Distribución de O-18 en el área de estudio.

8.6 Interpretación de resultados isotópicos.

8.6.1 Velocidad del flujo del agua subterránea.

Existen complicaciones en el comportamiento del ^{14}C durante la recarga, por lo que la edad "absoluta" de un agua subterránea no puede ser determinada en forma confiable. Además de ello, para el área de estudio se cuenta con pocos puntos de control donde se tiene medida la concentración de ^{14}C . Representadas las diferencias en edad en diferentes puntos a lo largo de una línea del flujo general, se puede determinar la velocidad de flujo dentro de un sistema acuífero (Mazor, 1997). Con este criterio sobre una línea de flujo que siga en forma general al paleocauce del río Sonora, se obtuvieron las posibles velocidades de flujo para las zonas acuíferas que componen la entrada de recarga al sistema de la Costa de Hermosillo. Las velocidades podrían variar

de 20.38 hasta 75 m/año en la zona acuífera de Hermosillo a Calle Cero; de 15.4 a 92 m/año de la Calle Cero a Siete Cerros, y de 15.2 a 85 m/año en el acuífero de la Costa de Hermosillo. Con base en estos valores, la velocidad se considera alta pero acorde al tipo de textura del acuífero.

8.6.2 Direcciones de flujo y mecanismos de recarga y descarga.

La composición isotópica y los demás elementos analizados permiten definir la distribución y el origen del flujo subterráneo con los siguientes rasgos preferenciales de los mecanismos de recarga y descarga:

- 1) El flujo del río Sonora circula de la presa Abelardo Rodríguez hacia el norponiente, siguiendo la zona de alta permeabilidad del cauce moderno y el paleocauce del río Sonora. Esta dirección del flujo es consistente con los datos de ensayos de bombeo realizados, en lo que se obtuvieron transmisividades del orden de 10^{-2} m²/seg. Este flujo está enriquecido isotópicamente en O-18 y deuterio, dada la alta evaporación a que es sometida el agua en el embalse antes de infiltrarse. El flujo subterráneo próximo a los cauces es de reciente infiltración con edades menores a 50 años; los valores de tritio pueden variar de 9.2 a 10 UT. Posteriormente este flujo continúa a lo largo del trazo del paleocauce del río Sonora, rumbo al norponiente de la ciudad de Hermosillo, lo que coincide con el obtenido por hidrogeofísica. Los puntos donde se aprecia su influencia son el pozo del Cobach norte y la Escuela de Agronomía de la UNISON. Sus características sugieren que es un flujo de alta velocidad que se refleja en su edad relativa de C-14 de $280 \pm$ años. Los valores de tritio son menores a 2 UT, lo que coincide con la edad, que revelan aguas con más de 50 años de haberse infiltrado.
- 2) En el área de la Hacienda de la Flor, aguas abajo de la presa en Hermosillo, la zona marca una mezcla de dos flujos: uno reciente, proveniente del embalse cuyos valores de tritio son de 10.6 a 12 UT, que se interpreta como flujo de reciente infiltración con menos de 50 años de haberse infiltrado, y otro que recibe de la zona de recarga del sur de la ciudad. Este mismo flujo circula por zonas de baja permeabilidad de la ciudad de Hermosillo, como Palo Verde y campus UNISON, y descarga en el ejido Villa de Seris; el flujo es lento y su edad en el pozo del campus UNISON es de 520 ± 40 .

8.7 Origen del flujo subterráneo.

Apoyándose en la nomenclatura de la Comisión Nacional del Agua, que define la regionalización de acuíferos de la Región Noroeste, las configuraciones piezométricas obtenidas, la hidrodinámica de la región en su conjunto, las interpretaciones de pruebas de bombeo, la hidrogeofísica, los análisis de unidades hidrogeomorfológicas y el análisis hidrogeoquímico, se analizaron ocho regiones acuíferas:

- 1) Sistema acuífero Bacoachi.
 - 1.1) Zona norte (unidad en rocas granitoides)

- 1.2) Zona sur (unidad fluvio-aluvial)
- 2) Acuífero El Zanjón.
- 3) Sistema acuífero La Victoria.
- 4) Acuífero Mesa del Seri.
- 5) Acuífero Río Sonora.
- 6) Acuífero Willard.
- 7) Acuífero La Poza.
- 8) Sistema Acuífero Costa de Hermosillo, subdividido en tres zonas:
 - A) Zona urbana de Hermosillo.
 - B) Zona Hermosillo-Calle Cero (constituido por la franja del cauce moderno del Río Sonora, ubicado entre Hermosillo y el ejido La Manga).
 - C) Zona Calle Cero-Siete Cerros (conformado por la franja de los paleocauces de La Poza y Río Sonora, ubicada entre la Escuela de Agricultura de la UNISON y Siete Cerros).

Todos estos acuíferos fueron considerados en la evaluación como zonas potenciales de entrada de flujo subterráneo hacia el sistema acuífero de la Costa de Hermosillo, y se manejan como fundamento para proponer que se considere a la Costa de Hermosillo como sistema acuífero.

De acuerdo con la composición isotópica existente, las diferentes aguas subterráneas de todos los acuíferos libres, semiconfinados, someros, incluido el de la zona de la Costa de Hermosillo, son de origen meteórico, así como la paleoagua atrapada debajo de este acuífero y el de Willard, considerando que en lugares muy áridos y de notable espesor no saturado, el agua del acuífero puede corresponder a la recarga en épocas pretéritas más húmedas (Custodio, 1997).

Los reservorios que han sido creados bajo la presa y aguas debajo de ella, en la Hacienda de la Flor, son aguas de reciente infiltración provenientes del río Sonora. Las concentraciones isotópicas de las muestras de agua ubicadas en acuíferos próximos al río Sonora evidencian que son afectadas por una evaporación rápida, típicamente desértica. Se presentan grados de evaporación de esta agua; es más notorio en el caso de las muestras de la presa Abelardo Rodríguez ($\delta^{18}\text{O} = -4.9 \text{ ‰}$; $\delta\text{D} = -23 \text{ ‰}$), las cuales, de acuerdo con lo esperado, tienen al río Sonora por origen. Sus promedios típicos se agrupan en $\delta^{18}\text{O} = -5.8 \text{ ‰}$; $\delta\text{D} = -41 \text{ ‰}$.

Las aguas de reciente infiltración están sujetas a variaciones estacionales; con base en el análisis de la temperatura y en su correlación con los modelos hidrogeomorfológicos, hidrogeofísicos e hidrodinámicos, se infiere que tienen un patrón con cuatro principales tipos de mecanismos de recarga-descarga de flujo:

- 1) Agua subterránea con una temperatura cercana al promedio anual de la temperatura superficial ambiental. Su composición sugiere que pertenece a un ciclo muy activo que depende de las condiciones atmosféricas. La composición de tritio igualmente, permite afirmar que la circulación del flujo de esta agua

subterránea está limitada a menos de 100 m y raramente más de 200 m de profundidad. La recarga de flujo tiene carácter local y responde al clima estacional de invierno. Los acuíferos que se encuentran en este caso son La Victoria, Mesa del Seri, Bacoachi norte, Zanjón, La Poza, zona urbana de Hermosillo y Hermosillo-Calle cero. La temperatura del agua en estos acuíferos varía entre 22 y 26 °C.

- 2) Agua subterránea con temperatura de más de 26 °C sobre el promedio local anual de la temperatura superficial, la cual circula a mayores profundidades, obedeciendo a un esquema de recarga con flujo de tipo semirregional y regional cuya temperatura se deduce del gradiente geotérmico. No muestra variaciones estacionales o anuales. Este es el caso del sistema acuífero de la Costa de Hermosillo, acuífero Hermosillo-Siete Cerros y Bacoachi sur.
- 3) Agua subterránea que puede tener temperaturas termales mayores a 40°C, relacionada con terrenos afectados tectónicamente. El agua subterránea puede circular desde profundidades apreciables e integrarse en mezclas a través de sistemas estructurales.
- 4) Agua subterránea que puede provenir de almacenamientos donde se encuentra, atrapada o estancada. Comúnmente están relacionadas con cuencas sedimentarias de origen tectónico pero de sistemas fríos. Este es el caso de la paleoagua del acuífero de Willard, la Costa de Hermosillo y el acuífero profundo de La Victoria-Mesa del Seri. Su temperatura se encuentra entre 22 y 33 °C y no varía por efectos ambientales, estacionales o anuales.

La variación en composición isotópica del agua subterránea es resultado de la mezcla del agua reciente del río Sonora infiltrada desde el cauce principal y por debajo de los filtros de la presa; este proceso de mezcla es sugerido también por los contenidos de tritio que pueden variar de 9.2 a 10 UT, correspondiendo con agua con menos de 50 años de haberse infiltrado. Esta situación coincide con la reportada por Custodio (1997), cuando se trata de isótopos radiactivos como el tritio o el radiocarbono; el agua de niveles colgados o de pozos que justo toman agua freática muestra aproximadamente la concentración de esos isótopos en la recarga, con el decrecimiento que corresponde al tiempo de tránsito vertical por el medio no saturado correspondiente.

Las aguas profundas revelan que tienen una composición isotópica más ligera, con $\delta D = -62\text{‰}$ en el PHB-15 debajo del acuífero de la Costa de Hermosillo y $\delta D = 51\text{‰}$ para el pozo Willard; en este caso el promedio de la composición de isótopos estables está más abatido en concentración isotópica que en las aguas someras. De aquí se interpreta que existe la ocurrencia de agua más ligera a profundidad. Ello implica la viabilidad de que su origen provenga de una antigua recarga distinta a la reciente, lo que sugiere también que esa recarga fue llevada en un régimen climático diferente. Esta incertidumbre se aclaró al confrontar la composición isotópica más ligera de aguas más profundas, contra su concentración de C^{14} . Se observó que esta agua contiene poco de este radioisótopo o que no es medible, y eso indica altas edades y soporta la hipótesis del paleoclima para el origen de su recarga.

Un estimado del gradiente de isótopos estables con la profundidad muestra que en los acuíferos del valle del río Sonora, zona de entrada al sistema acuífero de la Costa de Hermosillo (Zanjón, La Victoria, Mesa del Seri, Hermosillo, Calle Cero), la fuente dominante de recarga es el sistema del río y alcanza una profundidad media de 100 metros por infiltración. Esto se aprecia de igual manera al confrontar los valores de Oxígeno-18 contra la concentración de los aniones de Cl^- y SO_4^{-2} en el agua del sistema acuífero (Figura 8.18 y 8.19).

Los datos graficados de los deltas de isótopos estables tienen una amplia dispersión de valores en todos los casos, a excepción del sistema acuífero de la Costa de Hermosillo. Un análisis de frecuencia de los valores δD del agua superficial y subterránea muestra un alto sesgo con la máxima frecuencia cercana al valor promedio $\delta\text{D} = -45.17 \text{ ‰}$ obtenido para el agua del acuífero de la Costa de Hermosillo. En este caso la separación de aguas someras y profundas es muy clara, entendiéndose por someras aquellas cuya recarga está más directamente relacionada con el cauce moderno del río Sonora, y presentan un enriquecimiento mayor en deuterio con una media del $\delta\text{D} = -34.12 \text{ ‰}$. Su índice de frecuencia incluye aquellas muestras cuyo valor es cercano al promedio para las aguas que tienen origen de recarga por infiltración de la precipitación local y mezcla de ella con regímenes de flujos semirregionales.

Con base en el criterio de Mazor (1997), se elaboró un modelo esquemático que indica el origen de la recarga y las direcciones preferenciales de flujo de agua subterránea para cada acuífero o sistema. Este esquema se elaboró tomando como base el modelo hidrogeológico, la distribución espacial de valores isotópicos de O-18, la composición isotópica relativa del estándar V-SMOW y los fechamientos de edades relativas de C-14. El esquema coincide plenamente con la hidrodinámica del sistema acuífero; como resultado se infirieron los siguientes regímenes de flujo del agua subterránea y sus mecanismos de recarga y descarga con direcciones preferenciales (Figura 8.21):

- 1) Flujo subterráneo de reciente infiltración. Su recuperación es prácticamente instantánea y depende de su proximidad con los cauces modernos. Su origen de recarga principalmente es en decenas de años y hasta menos de 500 años. Lo constituyen los siguientes flujos:
 - 1.1.- Flujo norte sur del acuífero del río Zanjón-La Victoria.
 - 1.2.- Flujo este-oeste río Sonora-La Victoria-Mesa del Seri.
 - 1.3.- Flujo este-oeste de la presa Abelardo Rodríguez-zona urbana de Hermosillo.
 - 1.4.- Flujo sur-norte de los lomeríos de la sierra Agua Lurca hacia la zona urbana de Hermosillo.
 - 1.5.- Flujo norte-sur de Bacoachi norte de las sierras La Cobriza y Batepito hacia Siete Cerros y Costa de Hermosillo.
 - 1.6.- Flujo este-oeste de la zona urbana de Hermosillo hacia Calle Cero.

- 2) Flujo subterráneo local y semirregional. La circulación del flujo de agua subterránea está limitada a menos de 100 y raramente más allá de 200 m de profundidad. Es un agua de mezcla que recibe influencia atmosférica principalmente en decenas de años y hasta menos de 1000 años. Está constituido por los siguientes flujos:
 - 2.1.- Un flujo de este-oeste, cuya aportación proviene del acuífero La Poza hacia la Costa de Hermosillo.
 - 2.2.- Un flujo de norte a sur, proveniente del acuífero Bacoachi-sur hacia la Costa de Hermosillo.

- 3) Flujo regional. Su origen es meteórico, no se percibe la influencia atmosférica estacional o moderna. Su régimen de circulación de flujo varía en edades de 500 a más de mil años. Lo forman los flujos siguientes:
 - 3.1.- Flujo norte-sur, proveniente de la cuenca del río Bacoachi hacia el acuífero de la Costa de Hermosillo.
 - 3.2.- Flujo sur a norte proveniente del acuífero La Poza hacia el acuífero de la Costa de Hermosillo.
 - 3.3.- Flujo sur a norte proveniente del paleocauce del río Sonora hacia las zonas Calle Cero y Siete Cerros.

- 4) Flujo de recarga marina, de oeste a este hacia el acuífero de la Costa de Hermosillo. Agua subterránea de mezcla origen marino y continental, flujo establecido desde hace 37 años.

- 5) Paleoagua atrapada. Agua subterránea estancada, sin movimiento lateral. Tiene origen en los períodos interglaciares de hace 50,000 a 10,000 años, lapso durante el cual quedó atrapada y que se interpreta como la representación del cambio climático global en el área de estudio.

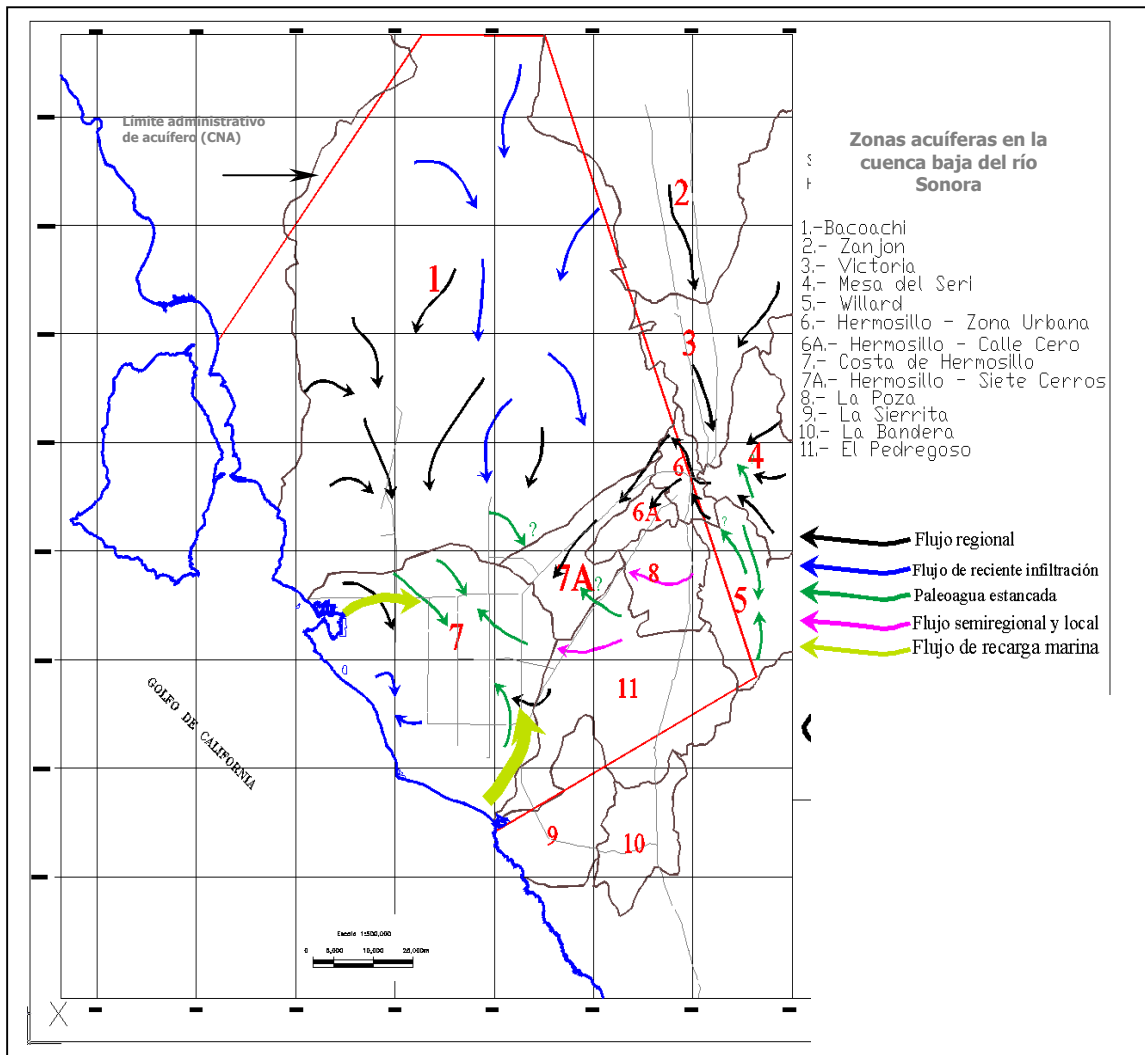


Figura 8.21 Regímenes de flujo encontrados en la cuenca baja del río Sonora. Los flujos se superponen a las zonas acuíferas modificadas de las definidas por la CNA (2004).

9. MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL SISTEMA EN ESTUDIO

9.1 Modelo conceptual hidrogeológico.

El modelo conceptual es una simplificación descriptiva de la naturaleza en el que se intenta representar las condiciones hidrogeológicas reales de una cuenca o acuífero; esta representación hace del modelo conceptual un modelo válido. Para obtenerlo hay que basarse en información hidrogeológica existente o generada. Finalmente, el modelo conceptual es la base del modelo matemático.

Con base en lo anterior, el modelo conceptual de la Costa de Hermosillo se plantea a partir del análisis conjunto de la información geológica, hidrogeológica, geofísica e hidrogeoquímica y la hidráulica de pozos, rasgos indicadores del comportamiento del flujo y fundamentales para que soporte la elaboración de un modelo de simulación cuyo resultado sea congruente con la naturaleza. La descripción de los elementos considerados es la siguiente (Figura 9.1):

9.1.1 Hidromorfoestructura.

El sistema acuífero Costa de Hermosillo obedece al patrón estructural derivado de la neotectónica del "Basin and Range Sonorense" en la distribución, almacenamiento y movimiento del flujo subterráneo, ya que rellena las fosas resultantes tanto al norte como al sur de la cuenca baja, donde se observa la continuidad del sistema estructural orientado NW-SE. En la base de estas cuencas se encuentran rocas volcánicas, volcanosedimentarias y depósitos miocénicos de relleno sedimentario restringidos a sus límites de cuenca. Estos depósitos pueden constituir almacenamientos de agua subterránea aislados en cada cuenca (Figura 10.1). En algunas de ellas, los sedimentos tienen fuerte presencia de interestratos semiconfinantes que restringen su movimiento lateral y vertical. Por eso el agua subterránea de estos almacenamientos puede presentar una o varias de las siguientes condiciones:

- a) No recibe recarga meteórica reciente.
- b) En el acuífero Costa de Hermosillo, el flujo subterráneo circula en forma restringida, su dirección es dominada por la inducción del bombeo que agudizó los gradientes hacia una gran depresión del nivel de agua.
- c) En el caso de los acuíferos someros de la Mesa del Seri-La Victoria y Río Sonora, se presume que reciben recarga profunda, es decir recarga de agua subterránea fría y/o caliente desde zonas tectónicamente activas, por ello presentan asociación geoquímica y temperatura geotérmica en sitios específicos (pozo Granjas 2 y La Colmena).
- d) En el acuífero de Willard, esta agua puede ser alcanzada para su extracción por su condición de acuífero libre. A su vez, se desprende que el acuífero de Willard tiene continuidad hacia el sur, dentro y hasta los

límites de la misma fosa donde se encuentra. En esa dirección es probable que este acuífero se encuentre debajo de los depósitos del arroyo La Poza, a una profundidad no menor a 500 m.

- e) En el caso del acuífero de la Costa de Hermosillo, la hidrología isotópica muestra claramente diferentes orígenes para el agua del acuífero y la paleoagua confinada (PHB-15). Pero no existen suficientes elementos hidrogeológicos e hidráulicos para definir si ésta puede considerarse como acuífero.

Sobre los depósitos descritos actuó la condición hidromorfotectónica de la región, la cual define una edad menor para los sedimentos fluvioaluviales del río Sonora y sus afluentes. En consecuencia, en el extremo Este de la cuenca baja, los acuíferos meteóricos de La Victoria, Río Sonora, El Zanjón y Mesa del Seri cubren a los paleodepósitos, los cuales serían contemporáneos a los del acuífero de Willard. En la cuenca baja los afloramientos están cortados y sepultados por el relleno sedimentario cuaternario de la planicie aluvial del río Sonora, La Poza y Bacoachi; estos sedimentos son producto de la denudación y el arrastre de los diversos ríos y arroyos, que constituyen acuíferos someros multicapa de tipo libre. Los depósitos pueden descansar ya sea sobre las rocas volcánicas miocénicas o mesozoicas o sobre el basamento cristalino.

Con base en lo anterior se concluye que en la zona que actualmente ocupan los elementos fisiográficos descritos, el más importante desde el punto de vista hidrogeológico para captación y almacenamiento de agua subterránea es el de la cuenca baja del río Sonora, que corresponde con la confluencia de accidentes tectónicos de gran importancia (fosas tectónicas) con manifestaciones en la superficie y en el subsuelo.

9.1.2 Hidrogeología.

Las características hidrogeológicas de los acuíferos que constituyen la cuenca baja y que fueron considerados para su evaluación como zonas potenciales de entrada y salida de flujo subterráneo, son la base para proponer que se considere a la Costa de Hermosillo como *Sistema Acuífero Costa de Hermosillo*. Éste quedaría conformado por ocho acuíferos subdivididos, algunos de ellos en unidades hidrogeológicas:

- 1) Sistema Acuífero Bacoachi.
 - 1.1) Zona norte (unidad en rocas granitoides)
 - 1.2) Zona sur (unidad fluvio-aluvial)
- 2) Acuífero El Zanjón.
- 3) Acuífero La Victoria.
- 4) Acuífero Mesa del Seri.
- 5) Acuífero Río Sonora.

- 6) Acuífero Willard.
- 7) Acuífero La Poza.
- 8) Sistema Acuífero Costa de Hermosillo, subdividido en tres zonas:
 - 6.1) Zona urbana de Hermosillo.
 - 6.2) Zona Hermosillo-Calle Cero (constituido por la franja del cauce moderno del río Sonora, ubicado entre Hermosillo y el ejido La Manga).
 - 6.3) Zona Calle Cero-Siete Cerros (constituido por la franja de los paleocauces de La Poza y río Sonora, ubicada entre la Escuela de Agricultura de la UNISON y Siete Cerros).

9.1.3 Condiciones de frontera.

a) Frontera horizontal.

- 1.- Al norte, el basamento regional granítico a profundidades someras.
- 2.- Al sur, la falla que da origen al paleocauce del río Sonora. Como entradas al acuífero, la alimentación por la parte norte de la cuenca del río Bacoachi, al noreste el río Sonora y al Este y sureste el arroyo La Poza, los que se definen como niveles de carga variable.
- 3.- Al oeste y suroeste el Golfo de California, que actúa como un nivel de carga constante, y al este y sureste porciones de frontera con cargas nulas o impermeables.

b) Frontera vertical.

- 1.- Basamento cristalino: composición granítica y rocas volcánicas y volcanosedimentarias, distribuidas irregularmente. Permeabilidad aleatoria, limitada lateralmente.
- 2.- Arcilla miocénica (arcilla azul) espesor promedio 400 m, substratum del acuífero. De baja permeabilidad y litología variable.
- 3.- Acuífero granular, que compone un sistema multicapa, con espesor promedio de 200 m, de tipo libre con semiconfinamientos locales.

9.1.4 Entradas.

Se consideran como entradas horizontales al acuífero, la recarga natural del norte y noreste del río Bacoachi, la recarga natural del arroyo La Poza por el sureste, la recarga del río Sonora, la recarga de la intrusión del agua del mar del oeste y suroeste. La recarga vertical por concepto de lluvia y los retornos del riego agrícola son poco significativos porque los niveles potenciométricos se encuentran muy profundos y esta infiltración es fuertemente afectada por la evapotranspiración.

9.1.5 Salidas.

- 1.- Originalmente al mar.
- 2.- Actualmente, por el bombeo, no existe salida al mar.

9.1.6 Hidrodinámica y piezometría.

1.- El flujo original, anterior a 1947, tenía una dirección del norte y noreste hacia sur y suroeste rumbo al mar, con extracción única por evapotranspiración; el nivel freático era somero, entre 8 y 20 m de profundidad. La posición de la línea equipotencial cero era próxima al mar. Actualmente se encuentra en las inmediaciones de la Calle Cero, unos 65 km tierra adentro.

2.- El bombeo en los años sesenta alcanzó hasta 1,200 hm³/año. La dirección de flujo se invirtió y el acuífero fue penetrado por el mar. En la actualidad se estima que la recarga por este concepto es de 98.4 hm³/año. Como consecuencia, la piezometría original se deformó en círculos concéntricos a partir del año 1967. Actualmente el cono de abatimiento principal alcanza profundidades de más de sesenta metros bajo el nivel del mar. El bombeo se estima en 527 hm³/año y la recarga total de agua dulce se calcula en 159.9 hm³/año, lo que implica un déficit de 387 hm³/año, que es cubierto con el almacenamiento del acuífero.

9.1.7 Parámetros hidráulicos.

La permeabilidad como propiedad física de un medio es su capacidad para permitir el paso de un fluido, o puede ser descrita en términos cualitativos como la facilidad con la cual un fluido se puede mover a través de un medio poroso y es medida por la tasa de flujo en unidades adecuadas (Domenico & Schwartz, 1998). Ésta, obtenida con pruebas de bombeo en el sistema Costa de Hermosillo, define transmisividades variables de muy altas con 10^{-1} , que coinciden con la zona del paleocauce del río Sonora, a bajas en sus zonas adyacentes y hacia las fronteras (zona de laderas), donde la transmisividad presenta valores de 10^{-4} . La transmisividad media del acuífero se define en $4.5 \cdot 10^{-2}$ m²/s, considerando un espesor medio de 200 metros; la permeabilidad media es de $2.25 \cdot 10^{-4}$, que multiplicada por el gradiente medio de 0.0025 da una velocidad de Darcy de $5.625 \cdot 10^{-7}$ m/s. Los mejores valores se obtuvieron al sur de Siete Cerros, al final de la Calle Cero Sur, ambos como reflejo de su ubicación en el cauce moderno del río Sonora.

Los valores de rendimiento específico (Sy), o coeficiente de almacenamiento, obtenidos son típicos de acuífero libre con 0.13, es decir 13%, el cual se encuentra en el rango de los valores conseguidos en estudios anteriores (0.10 de Matlock et al., 1966; 0.08 de Cruinckshak y Chávez, 1969; 0.15 de Domenico, 1974, y 0.15 de Andrews, 1981).

9.1.8 Hidrogeoquímica.

Dentro del área de estudio, en las zonas de entrada de recarga y en los acuíferos adyacentes al de la Costa de Hermosillo, la familia dominante es de tipo Na-HCO₃, seguida de la familia Ca-HCO₃ y en menores proporciones la Na-Cl y la Ca-SO₄. Todos los acuíferos libres, semiconfinados, someros y profundos son de origen meteórico. Con base en las facies hidrogeoquímicas se puede proponer una división de la zona de estudio en las siguientes áreas:

El área de orientación noreste-suroeste, con sus puntos extremos de Hermosillo en el noreste y la línea costera en el suroeste. Esta área comprende partes del antiguo río Sonora, río abajo de la presa Abelardo Rodríguez L. Las aguas de los pozos más cercanas a esta última son exclusivamente de tipo bicarbonatada-cálcica.

En una franja costera de entre 20 y 40 km en el sureste (zona de El Sahuaral), en su porción noroeste (Bahía Kino), prevalecen las aguas del tipo clorurada cálcica y clorurada sódica; este último sobre todo en El Sahuaral. Típicas de la franja costera influenciada por la intrusión salina.

Un área hacia el noreste del límite de la franja costera (línea con orientación sureste-noroeste) se caracteriza por aguas de tipo bicarbonatada sódica. Dicha zona corresponde a la zona de transición dentro del sistema, por lo que se presenta en forma de dos lenguas que se extienden hacia la costa que coinciden con los límites de la zona del antiguo río Sonora

9.1.9 Origen del agua subterránea.

a) El flujo subterráneo de reciente infiltración lo constituye agua que pertenece a un ciclo muy dinámico que depende de las condiciones atmosféricas. En este caso la circulación del flujo de agua subterránea está limitada a menos de 100 m; su recuperación en los acuíferos someros es instantánea y depende de su proximidad con los cauces modernos, principalmente del río Sonora. Su origen de recarga es principalmente local, de años a decenas de años, y semirregional, de hasta menos de 500 años.

b) Existe flujo regional de origen meteórico, en el que no se percibe la influencia atmosférica estacional o moderna. Su régimen de circulación de flujo varía en edades de 500 a poco más de 4 mil años. Lo forman el flujo norte-sur proveniente de la cuenca del río Bacoachi, el flujo sur a norte de La Poza (ambos hacia el acuífero de la Costa de Hermosillo) y el flujo este-sureste procedente del paleocauce del río Sonora hacia las zonas Calle Cero y Siete Cerros.

c) Flujo de agua subterránea considerada paleoagua atrapada en sedimentos y rocas sin movimiento lateral (Willard y Costa de Hermosillo). Tiene

origen en los períodos interglaciares de hace 50,000 a 10,000 años, período durante el cual quedó atrapada.

d) Flujo de recarga marina, de oeste a este hacia el acuífero de la Costa de Hermosillo. Agua subterránea de mezcla origen marino y continental, flujo establecido desde hace 37 años.

9.1.10 Breviario del modelo conceptual hidrogeológico del acuífero Costa de Hermosillo, Son.

Tipo de acuífero: Libre, multicapa en materiales granulares.

Geología: La hidroestratigrafía del área de la Costa de Hermosillo se compone de dos estratos principales: una *Unidad Superior*, acuífero de 200 a 340 metros de profundidad, no consolidada, compuesta de arenas y gravas principalmente; una *Unidad Media* llamada también "arcilla azul", formada por un paquete de sedimentos constituidos por limos, arcillas y arenas, con fósiles marinos y un espesor de 200 a 560 metros, que descansa sobre el basamento ígneo.

Superficie del área de estudio: Área acuífera incluida zona de recarga: 15,108 km². Área acuífera: 3,647 km².

Precipitación media anual: 200 mm.

Volumen estimado original del acuífero: 68,000 hm³

Volumen drenado del acuífero: 42,000 hm³

Volumen estimado almacenado en el acuífero: 14 a 20,000 hm³

Volumen de extracción: 405 hm³ (promedio 1990-2000, Dto. de Riego 051)

Volumen concesionado: 430.45 hm³ (REPDA, diciembre 2000)

Volumen de extracción estimado por CPCH (1998): 527 hm³

Volumen actual estimado de extracción (CNA 2005): 600 hm³

Recarga anual estimada en 1967: 350.0 hm³ (Ariel Construcciones, S.A.)

Recarga anual actual: 159.9 hm³

Evolución de la recarga: Se estima que la recarga anual calculada en el año de 1967 fue mayor a la actual, ya que en la parte alta de la cuenca del río Sonora el volumen de explotación se ha incrementado con la apertura de nuevas áreas de cultivo en los últimos 20 años y con el aumento en la demanda para uso público-urbano; la recarga al acuífero por retorno agrícola es menor, debido a que la superficie de riego se ha reducido de 120 mil has. en 1965 (máximo histórico) a 45 mil has. (promedio últimos 5 años), con solamente 34% utilizando sistemas presurizados.

Pozos agrícolas: 520 aprovechamientos.

Total de aprovechamientos: 1,221

Abatimiento histórico medio anual: 1.01 metros.

Transmisividad media del acuífero: $4.5 \cdot 10^{-2}$ m²/s

Rendimiento específico (Sy): 0.13

Abatimiento medio anual actual: 0.29 m

Condición geohidrológica: sobreexplotado.

Niveles de bombeo: 80-130 m de profundidad.

Caudal específico: 5-10 Lps/m.

Caudal promedio: 80 Lps.

Calidad del agua: 240 a 10,000 ppm.

Familia hidroquímica dominante del agua dulce: Tipo Na-HCO₃, seguida de Ca-HCO₃.

Familia hidroquímica dominante en la zona de interfase: Na-Cl, seguida de Ca-Cl.

Edad relativa de C-14 para la recarga hasta Siete Cerros: 500 años.

Edad relativa de C-14 para la recarga entre Siete Cerros y el Mar: 2751 a 4,260 años.

Edad relativa de C-14 para el agua fósil en rocas extrusivas: 26,000 a 30,000 años.

Edad estimada para la intrusión: 37 años.

Avance promedio por año del frente de intrusión: 600 m.

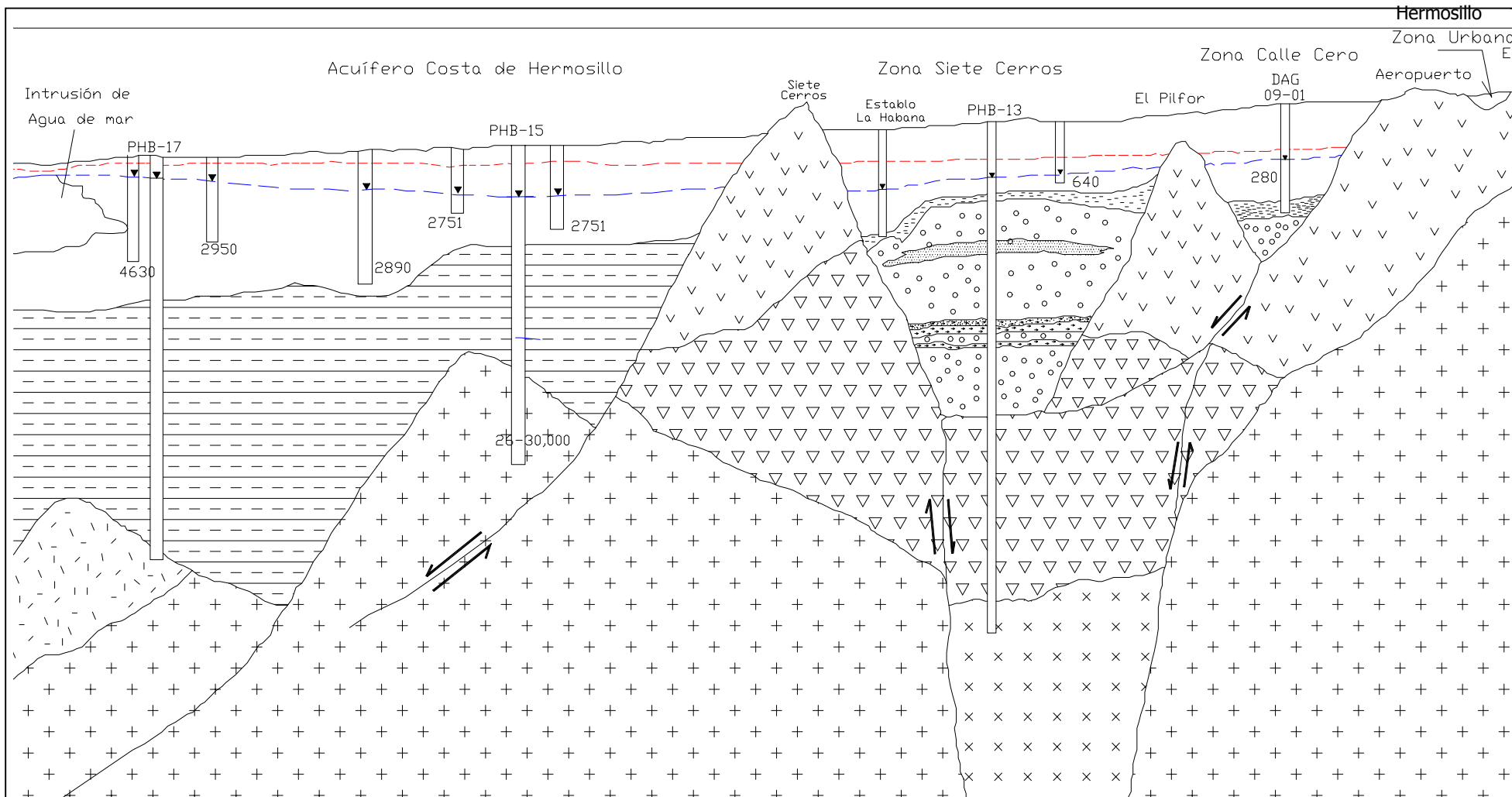


Figura 9.1.- Modelo conceptual hidrogeológico para el Sistema Acuífero Costa de Hermosillo

- | | | | |
|--|---------------------------|--|----------------------|
| | Gravas, Arenas y Arcillas | | Conglomerado Basal |
| | Arcilla Azul | | Basamento Andesítico |
| | Volcanico Indiferenciado | | Basamento Granítico |
| | Conglomerado | | Granodiorita |

- Cortes litológicos de Pozos
- | | | | | |
|-------------------------|---|--------|---|---------|
| C Zapata Vela | → | PHB-17 | → | 903 m |
| C. San Francisco | → | PHB-15 | → | 732 m |
| C. San Miguel | → | PHB-13 | → | 1156 m |
| C. Agricultura (Unison) | → | PMH-35 | → | 213.5 m |

- 2751 Edad relativa del C-1 para el agua subterránea
- Escala Horizontal 1: 125,000
 Escala Vertical 1: 5,000
 N. E 1949
 N. E 2001

9.2 Modelo de simulación.

Tomando como base el modelo conceptual descrito, se integró el modelo de simulación, considerando que la meta es definir un plan de sustentabilidad que opere con las condiciones limitadas de su almacenamiento actual y que sigue siendo sometido a uso intensivo, con los siguientes objetivos:

- 1) Implementar un modelo de simulación hidrodinámica del acuífero.
- 2) Elaborar escenarios de extracción del acuífero con base en una proyección lineal de las tasas de bombeo históricas.
- 3) Sobre la base de los resultados, generar propuestas que permitan la recuperación del acuífero.

9.2.1 Métodos.

El modelado se realizó utilizando la información obtenida con el modelo conceptual hidrogeológico (capítulo 9), para articular los archivos de entrada al modelo matemático Visual MODFLOW 3.1, que es el programa de modelación de flujo de agua subterránea 3D más conocido en el mundo, por su versatilidad y por resultar "amigable", para llevar paralelamente simulación acoplada a sistemas de información geográfica y poder generar sistemas de apoyo a tomas de decisiones. Así, se ajustaron y estandarizaron parámetros y unidades para obtener estrategias de manejo para la conservación del agua subterránea. Las diferentes actividades ejecutadas para el armado del modelo se describen a continuación.

1) EL ÁREA.

Se modeló una región, de sección transversal rectangular, de 108 por 100 kilómetros. El área queda comprendida entre los 110° 50' y 112° 00' de longitud oeste y entre los paralelos 28° 20' y 29° 15' de latitud norte.

2) INTEGRACIÓN DE ARCHIVOS DE ENTRADA.

Visual MODFLOW. La información existente se integró para ser convertida a versiones compatibles (*filename.BAS, BCF, WEL, etc.*). Incluye geología del área (definición de área acuífera y condiciones de frontera), caracterización geométrica del acuífero (basamento e hidroestratigrafía), piezometría, bombeo, parámetros hidráulicos (Figura 10.3), etc., para alimentar el modelo (ver capítulo 9). La Tabla 10.2 muestra los volúmenes de extracción oficialmente aceptados y por lo tanto fueron los considerados para alimentar al modelo. Si bien la extracción podría ser de hasta 600 hm³ (CNA, 2004a).

USO	No. DE POZOS	VOL. CONCESIONADO (m3)
AGRÍCOLA*	509	409'700,000.00
AGRÍCOLA	16	6'685,893.00
DOMÉSTICO	14	15,794.00
INDUSTRIAL	10	806,776.00
MÚLTIPLE	163	5'980,844.00
PECUARIO	119	1'405,297.00
PÚBLICO-URBANO	81	7'285,640.00
SERVICIOS	12	88'667.00
TOTAL	924	431'966,911

* Volumen global concesionado a usuarios del DR-051.

Tabla 9.1 Volúmenes oficialmente concesionados en el acuífero Costa de Hermosillo (CNA, 2004).

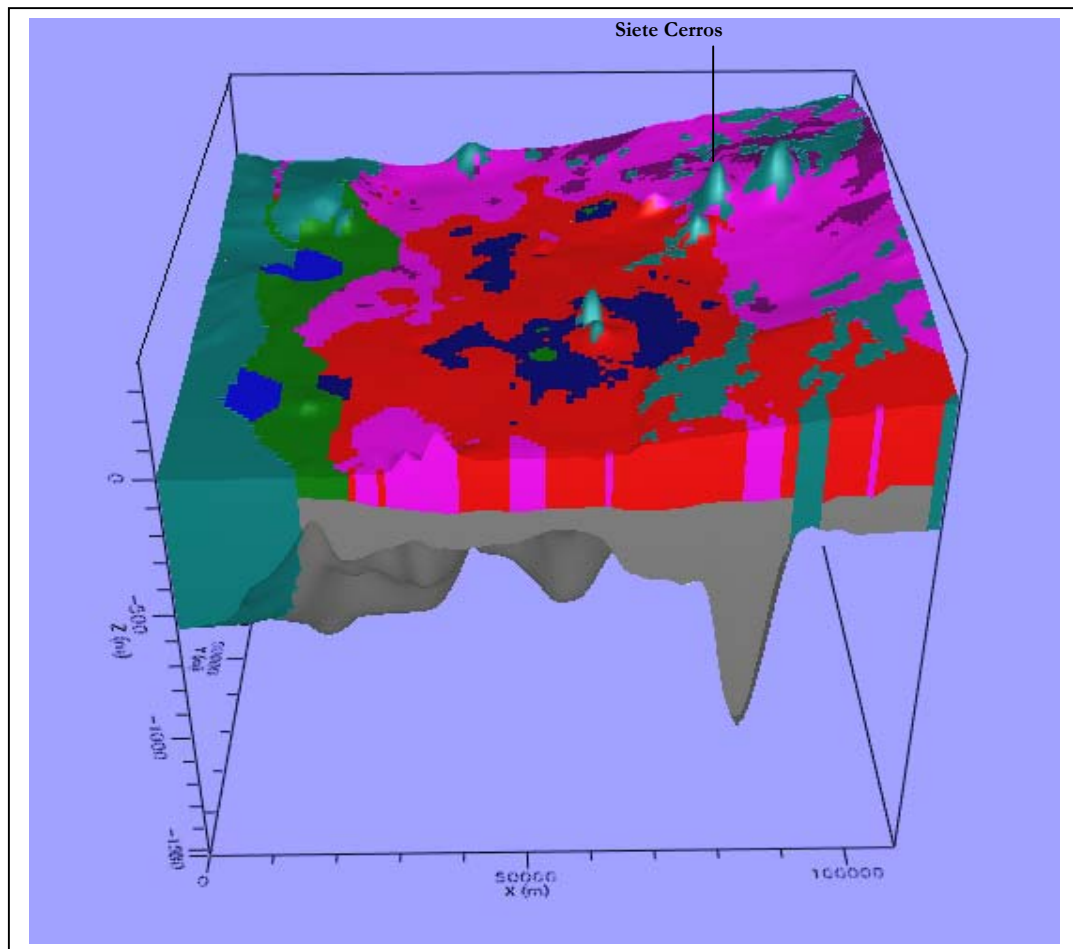


Figura 9.2 Detalle de la distribución de la transmisividad en el acuífero (Nótese los más altos valores al centro del área).

3) DEFINICIÓN DE LA MALLA MODFLOW.

El mallado del área de modelación consiste en determinar el número conveniente de celdas y sus dimensiones apropiadas al problema, de las cuales se diferenciarán celdas activas e inactivas, de acuerdo con el modelo hidrogeológico conceptual. La malla que cubre la región tiene una rotación de $37^{\circ} 36' 36.4''$, respecto a la dirección este-oeste. El área está dividida en 10,800 celdas rectangulares y uniformes, de 1000 por 1000 m (Figura 9.3).

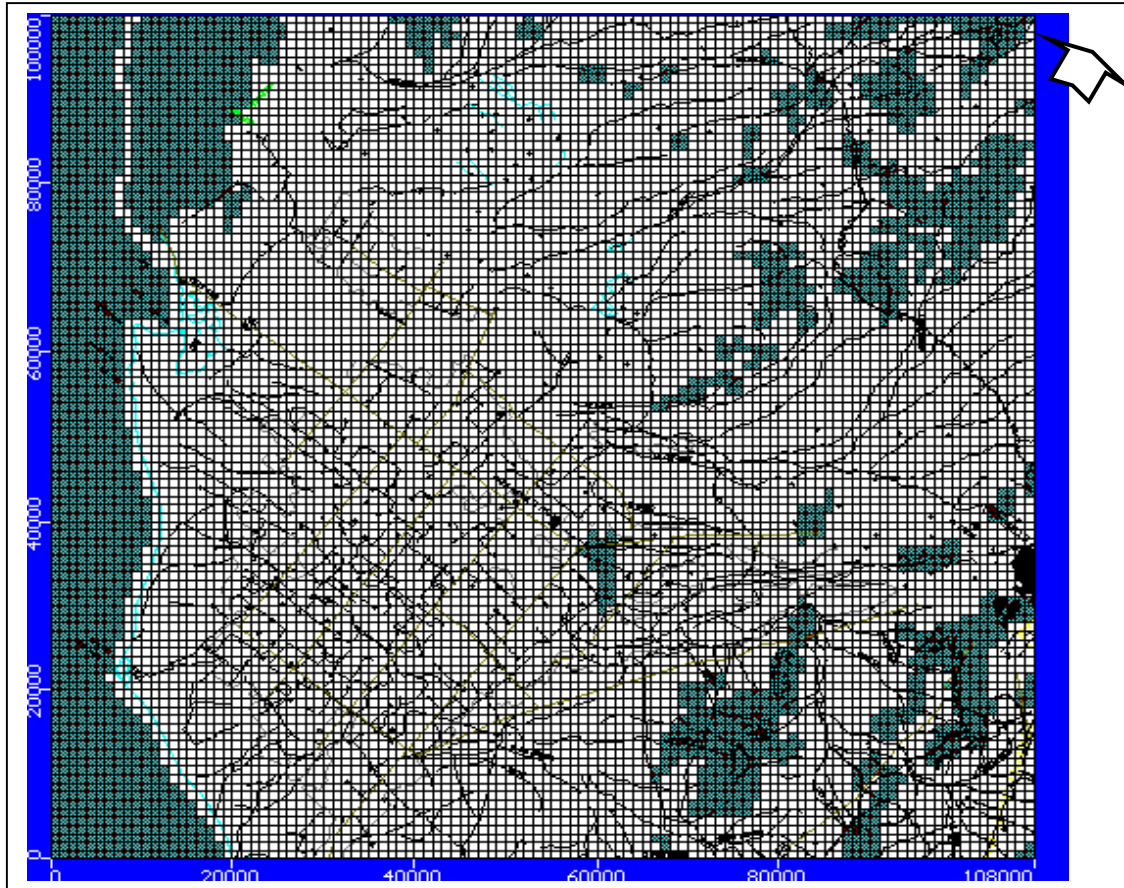


Figura 9.3 Malla del modelado de la Costa de Hermosillo.

4) DISCRETIZACIÓN VERTICAL.

El modelo conceptual permitió, con la geometría del acuífero, las unidades hidroestratigráficas (capas del subsuelo), los componentes del sistema del balance hidrológico, los parámetros hidráulicos, las zonas de recarga, etc., discretizar espacial y temporalmente las capas (layers) MODFLOW. En el sentido vertical del acuífero se definieron las capas a considerar en la modelación, utilizando las elevaciones del suelo y la topografía importadas de archivos Surfer GRD versión 8; a cada una se le asignaron las condiciones de borde en MODFLOW, de carga general (GHB-General Head Bound) en la traza del río, evapotranspiración, influencia de pozos y relleno de celdas secas en MODFLOW y las características de

espesor según la interpretación geológico-geofísica de la geometría del acuífero. Por la estratigrafía del acuífero, el modelo trabaja con dos capas (Figura 9.4. 9.5)).

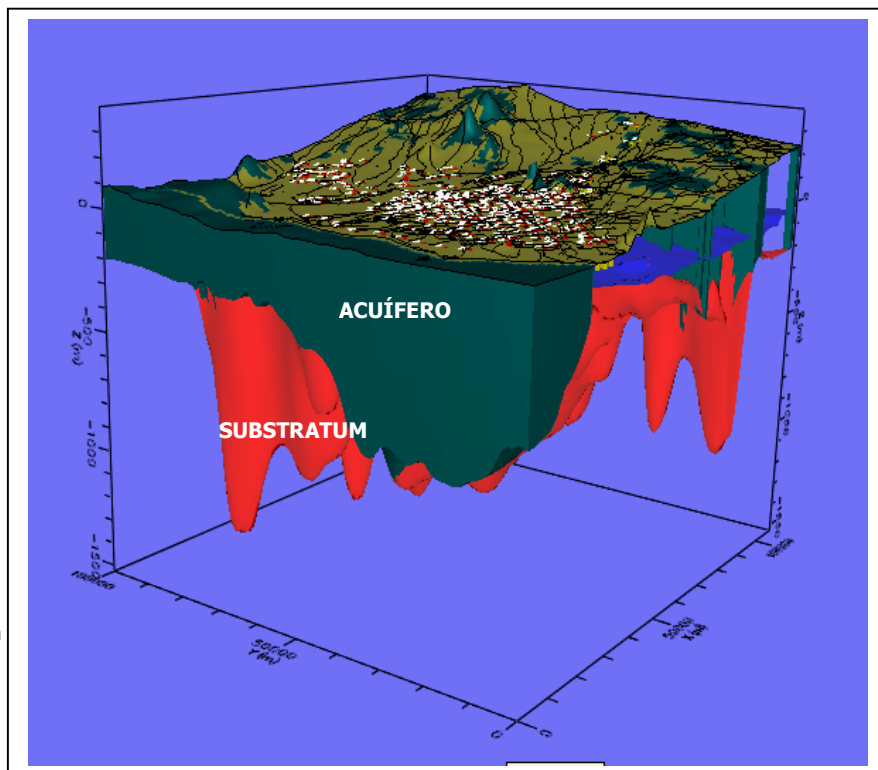


Figura 9.4 Vista del área hacia el noroeste mostrando la planicie costera.

CAPA 1 (Acuífero en verde)	Arenas, gravas y arcillas; arenas y gravas empacadas en arcilla (terrazas): espesor de 0 a 200m.
CAPA 2 (Substratum en naranja)	Arcilla azul y arcilla con fósiles: espesor de 0 a 800m.

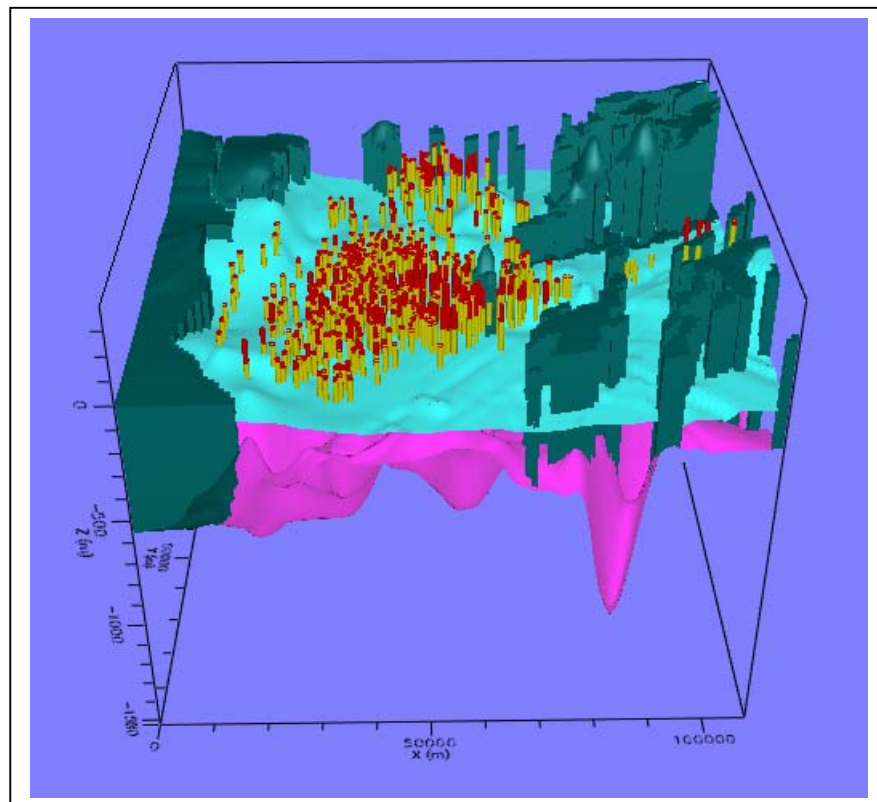


Figura 9.5 Ubicación de pozos de bombeo utilizados en la modelación.

Finalmente se efectuó la calibración estática y dinámica del modelo, comparando y ajustando los parámetros con la piezometría histórica real y simulada (Figuras 9.6, 9.7 y 9.8).

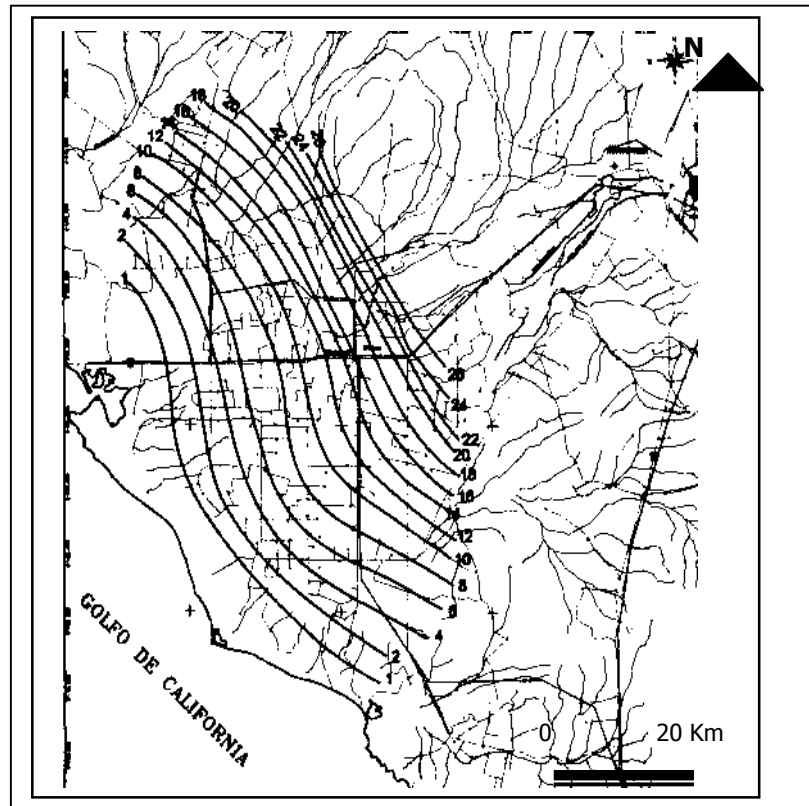
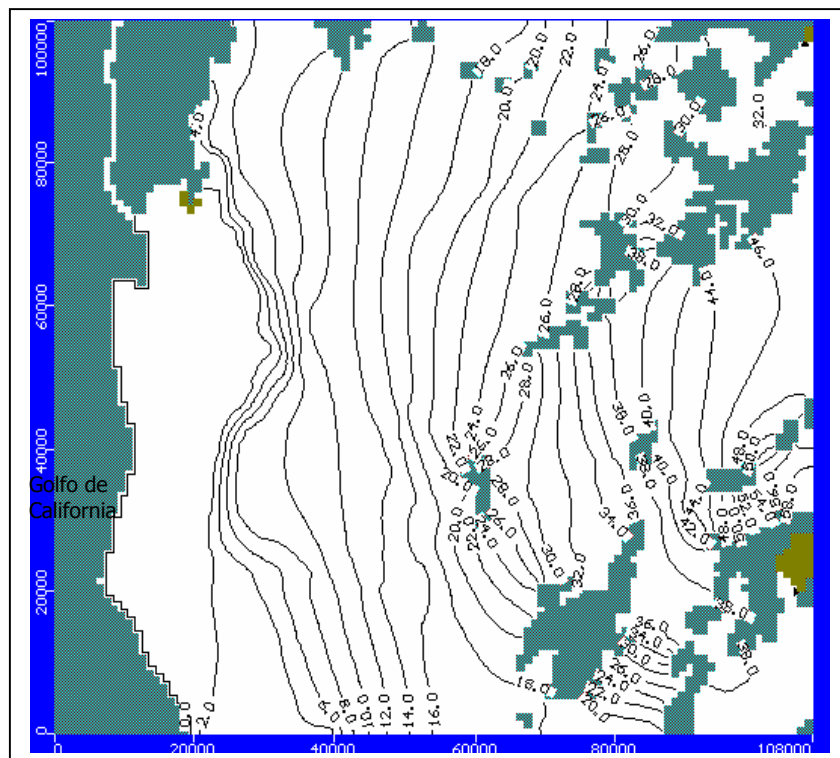


Figura 9.6 Comparación de condiciones iniciales reales (arriba) y simuladas (abajo) para 1945.



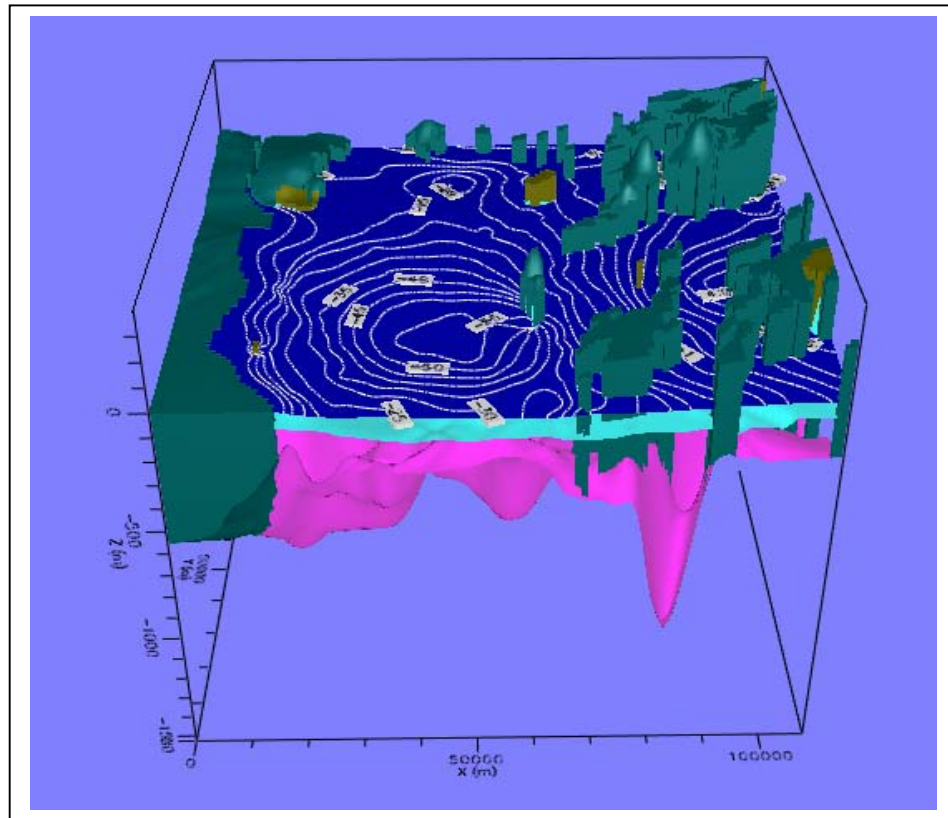
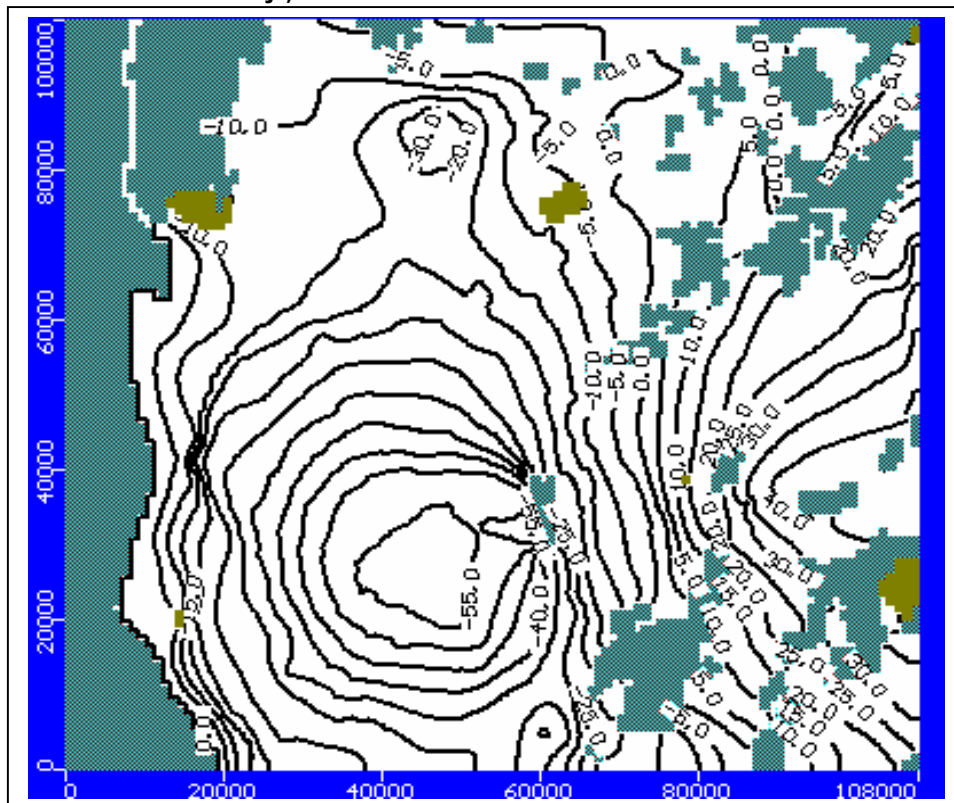


Figura 9.7 Escenarios piezométricos intermedios. Arriba, 1991 (3D);
 abajo, 1995. Elevación mínima -55 mbnm.



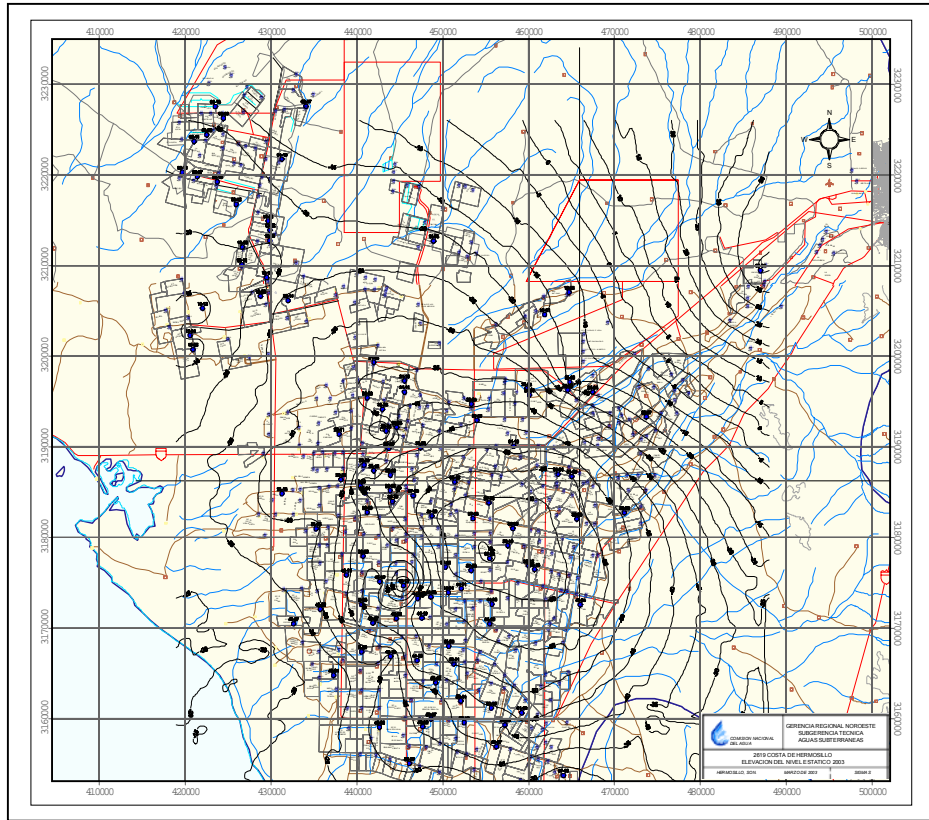
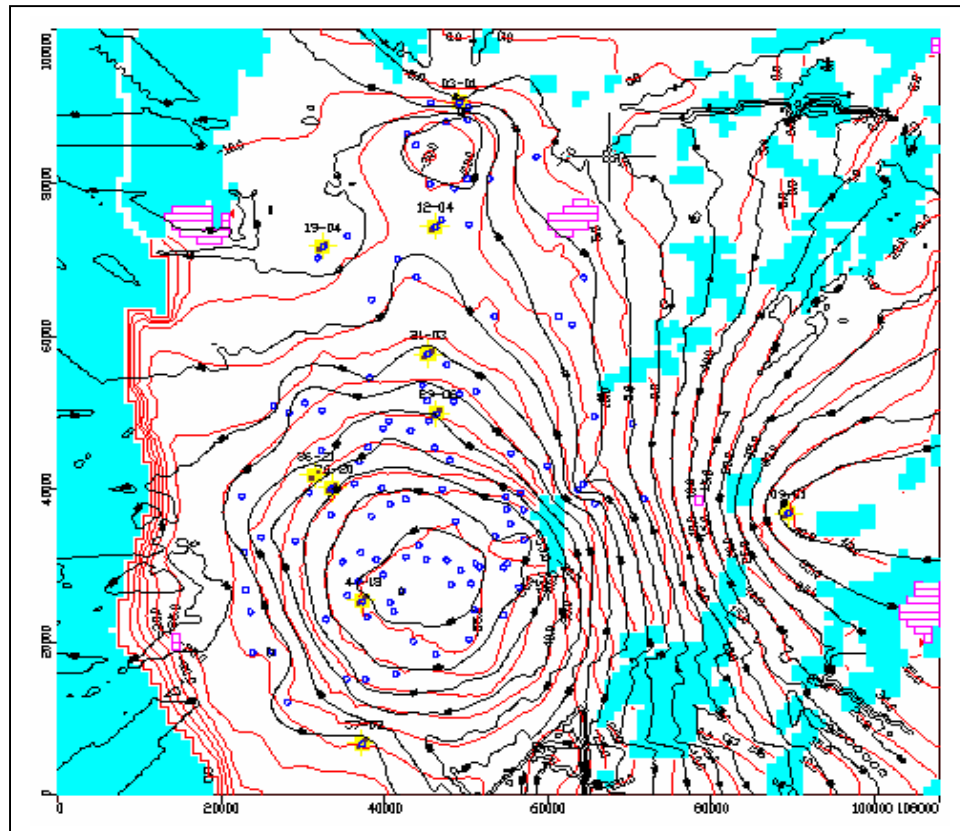


Figura 9.8 Comparación de las piezométrías real (arriba) y simulada (abajo) para el año 2003 con condiciones actuales (configuraciones sobrepuestas calculada y observada). Elevación mínima con -65 mbnm (CNA-2004a).



Para evaluar la incertidumbre en el modelo, ya calibrado se realizó un análisis de sensibilidad modificando sistemáticamente las variables, ajustando a un error medio absoluto de 2.5 (Figura 9.9).

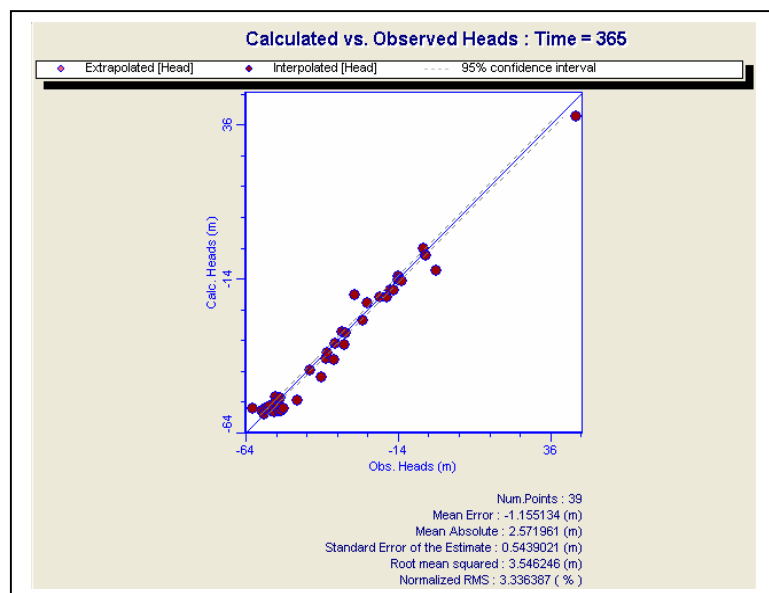


Figura 9.9 Resultado de calibración, cargas calculadas contra observadas (1991).

4). Construcción de escenarios de manejo.

Se retoma el planteamiento de utilizar escenarios básicos para observar el comportamiento del acuífero. Dado el grado de incertidumbre que existe al no obtenerse medición de los volúmenes de extracción del acuífero, las condiciones reales de operación podrían tener una diferencia entre los volúmenes concesionados oficialmente (432 hm^3 , DOF, 1980) contra los reales (600 hm^3), variación que podría representar hasta un 28%. Por lo tanto, se consideró que manejar un escenario a muy largo plazo en la proyección sería poco apegado a la realidad. Por eso el único escenario proyectado se generó a 5 años de operación futura, bajo las condiciones actuales de extracción concesionada (Figuras 9.10, 9.11, 9.12 y 9.13).

Figura 9.10 Simulación de escenario a cinco años (Piezometría año 2010).

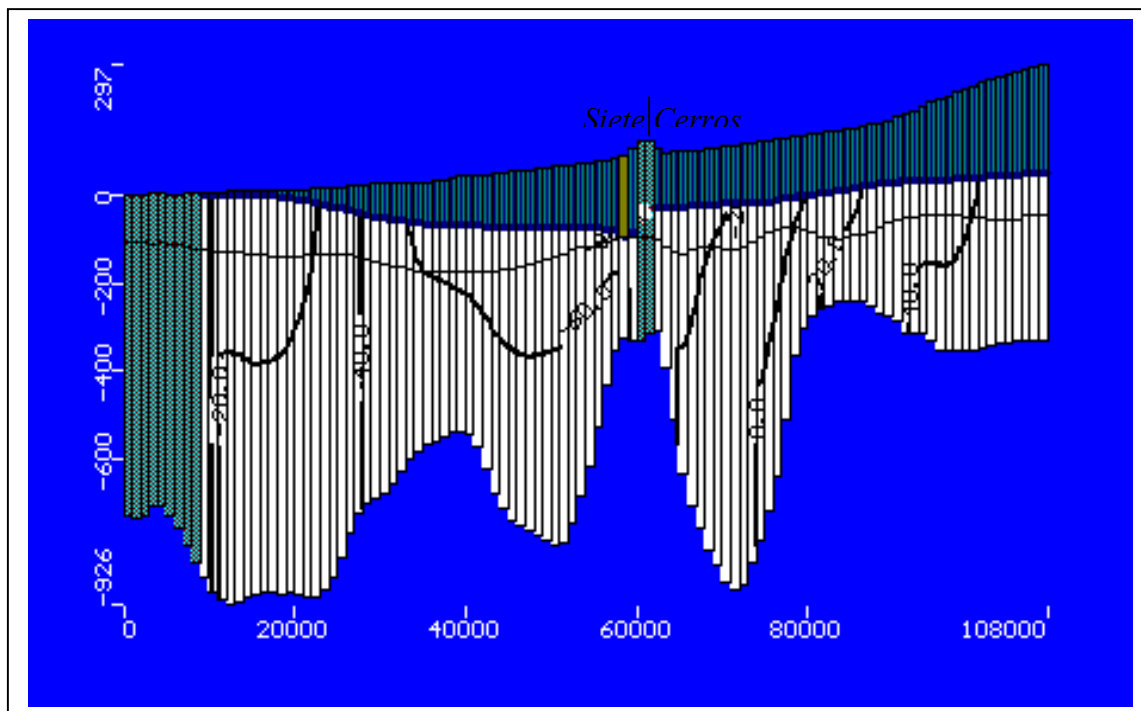
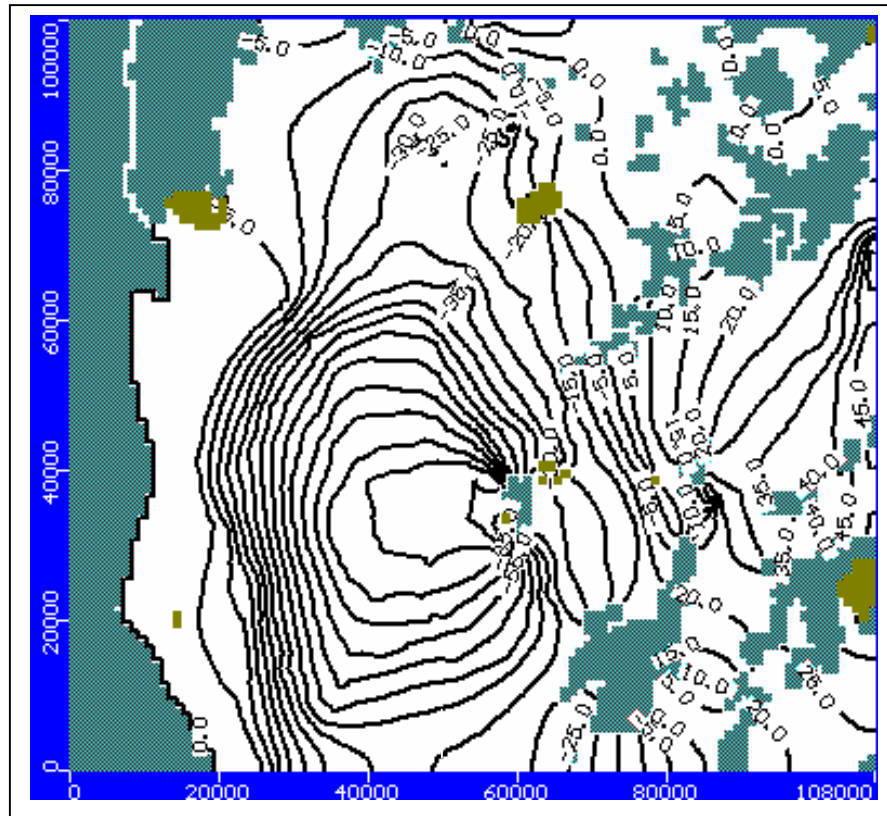


Figura 9.11 Perfil hidrodinámico suponiendo la operación del acuífero bajo las condiciones actuales de extracción. Nótese que la condición hidrodinámica es crítica en la zona, al oeste de Siete Cerros, donde el nivel potenciométrico alcanza el substratum.

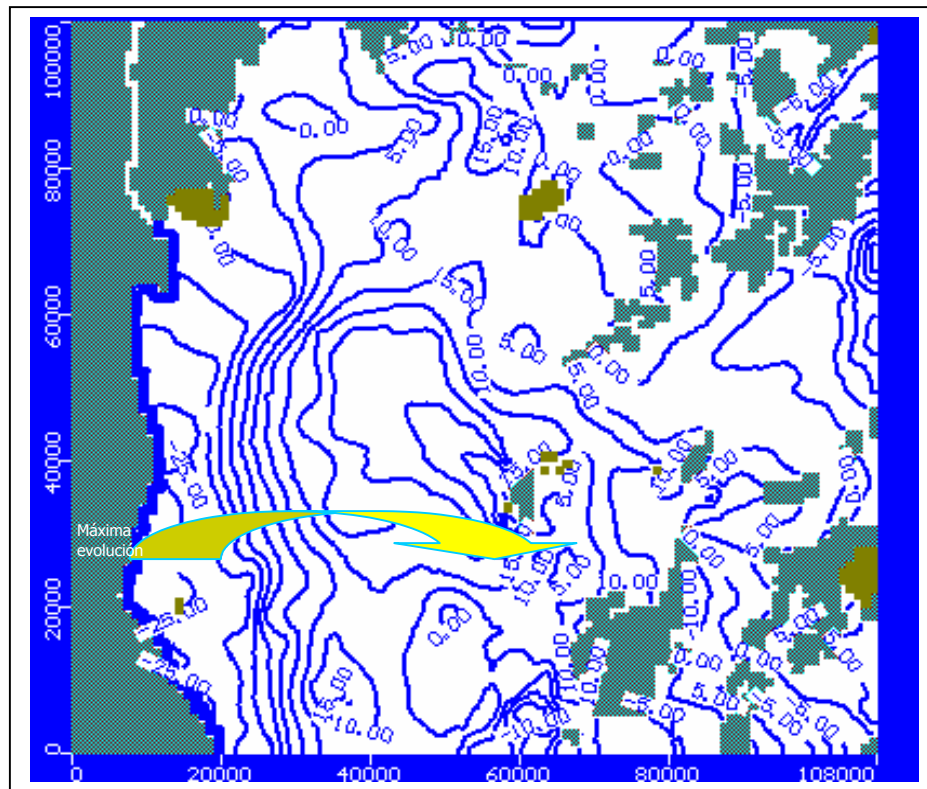


Figura 9.12 Evolución piezométrica 1990-2010. En la porción más profunda del cono ésta es = 15 m.

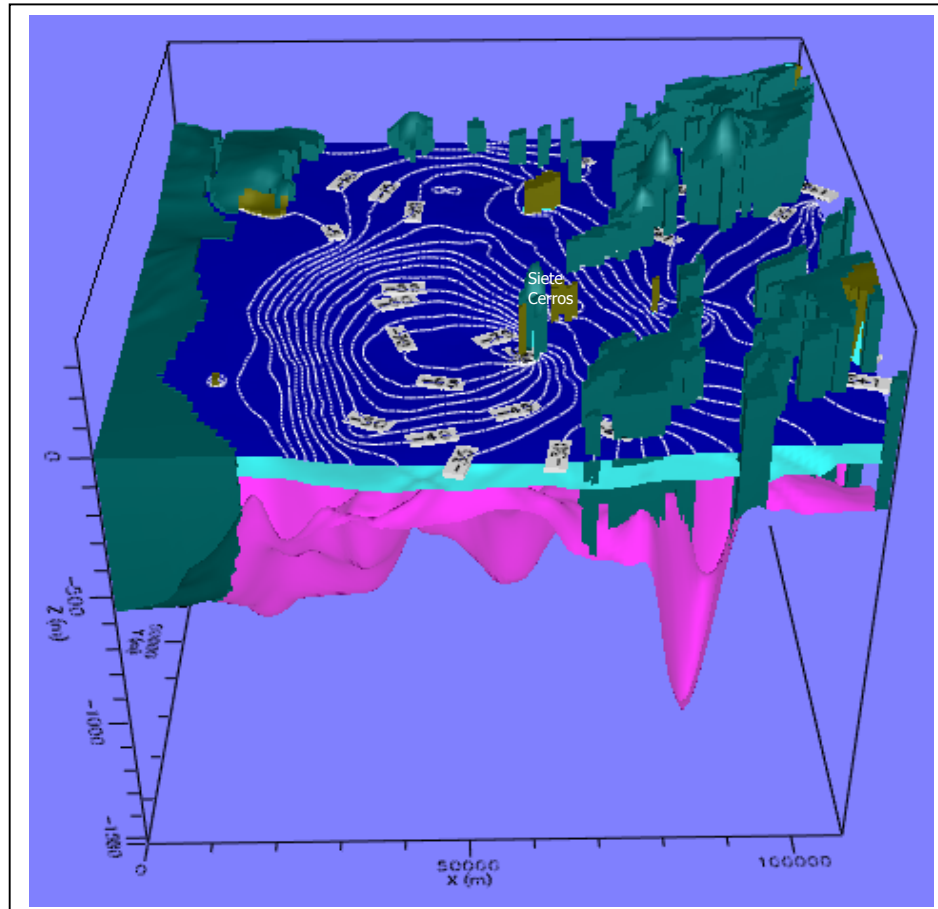


Figura 9.13 Piezometría al año 2010. Nótese en Siete Cerros la concentración de equipotenciales.

9.3 Resultados.

Si bien el software del Visual Modflow no considera las condiciones para diferenciar densidades entre el agua dulce y el agua salada, su aplicación se realizó asumiendo al mar bajo condiciones de frontera de carga constante, equilibrio hidrostático. En los casos donde se requiere el comportamiento del frente de intrusión, la realidad del sistema acuífero podría desviarse considerablemente de esa situación y se necesitarían modelos más sofisticados que apliquen la ecuación de advección-dispersión para convertir la concentración de solutos (sólidos totales disueltos) a densidad, a través de la ecuación del estado (Bear, 1999; Oliveira, 2003). En este caso específico, el objetivo fue simular las condiciones hidrodinámicas del flujo subterráneo considerando como una constante de carga al mar, sin buscar representar la posición de la zona de interfase ni modelar su migración. Bajo estas consideraciones, se obtuvo un resultado satisfactorio para las condiciones estacionarias y transitorias. Se asume que los resultados aplican en sentido operativo, como respuesta de la deformación equipotencial de la sobre extracción.

Lo anterior, sin menoscabo de la necesidad de utilizar en el futuro un modelo con propósitos de modelación de la interfase de intrusión salina, que considere además de la diferencia de densidades, la dispersión hidrodinámica y el transporte de solutos, modelos específicamente referidos como de transporte de solutos o modelos de intrusión de agua salina (Oliveira, op cit). Modelos de este tipo son SUTRA, FEFLOW, SHARP, SWICHA, Metropol, SWIFT, D3F, SEWAT, MOCDENS3D, FAST-C, HST3D. No obstante, cabe mencionar que se avanzó en el conocimiento del sistema acuífero, pero aún existe un fuerte problema de disponibilidad de datos en la zona de interfase, puesto que se carece de pozos de observación adecuados y en forma específica de información sistemática hasta el presente.

Se resume que la información es satisfactoria en términos de caracterización hidrogeológica e hidroquímica, pero realmente escasa en observación bidimensional de niveles (influencia de mareas), parámetros hidráulicos de la zona salobre y mayor número de concentraciones químicas. Lo anterior induce a que tampoco se cuente con series de tiempo de constituyentes hidroquímicos confiables; sería conveniente contar con algunas decenas de años de evolución de salinización, dado que, como cita Oliveira (2003), el proceso de transporte hidroquímico de constituyentes es lento. Se asume que para la falta o escasez de este tipo de datos se puede interpolar o extrapolar; en consecuencia, la calibración en estado transitorio sería de menor calidad; sin embargo, en cualquier caso, esos trabajos rebasan los objetivos del presente estudio.

10. PROPUESTA DE MANEJO HIDROGEOLÓGICO

10.1 Bases de la propuesta de manejo operacional.

Tomando en cuenta el objetivo de este trabajo, se elaboró un esquema de operación con diferentes escenarios de manejo, el cual se construyó basado en un modelo generalizado de funcionamiento hidrogeológico, que puede representar a cualquier acuífero costero (Figura 10.1). El esquema considera la presencia de un almacenamiento artificial, como una presa, que puede proporcionar con su reserva agua por infiltración local con su sistema hidroagrícola de canales, drenajes y retornos de riego. Aun cuando los dos primeros no operan para la Costa de Hermosillo. Siguiendo este esquema se tomaron los factores que intervienen en la ecuación de balance que, simplificada, serían las entradas y salidas como límites y los cambios de almacenamiento como respuesta. Adicionalmente, en oposición a la operación de un sistema costero con el bombeo, se obtiene la respuesta aplicando diferentes escenarios con el incremento de extracción y recarga, lo que modifica finalmente la entrada de agua marina por intrusión al acuífero. En la elaboración del programa se buscó que fuera tan simple como para que pueda ser manejado por personal no especializado, usuarios que son realmente los que deben entender cómo reaccionan los parámetros citados cuando operan los sistemas con tasas reales. Para generar los diferentes escenarios de operación se utilizó el software de Microsoft Excell solver de Office XP.

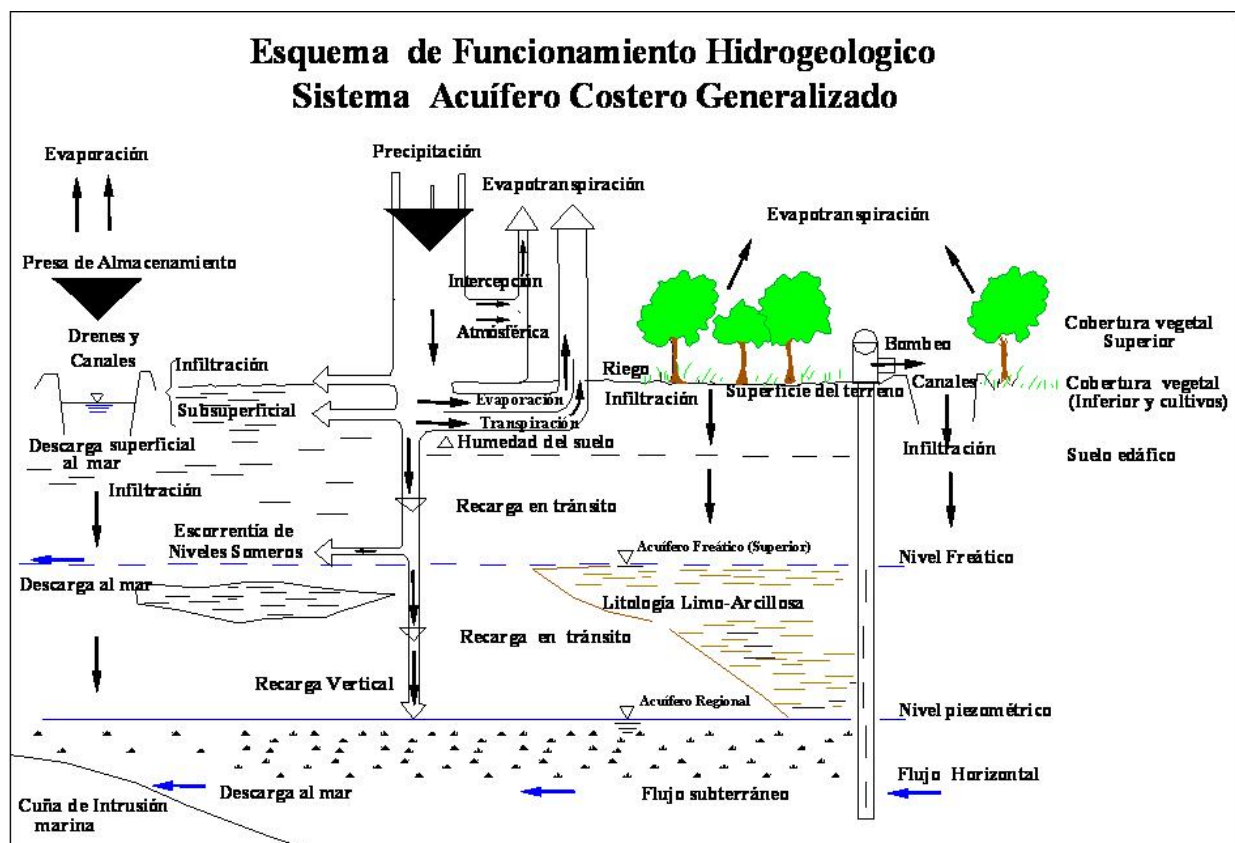


Figura 10.1 Modelo de funcionamiento hidrogeológico generalizado para un acuífero costero (Elaborado a partir del esquema de infiltración de recarga a los acuíferos, Custodio, 1997).

El sustento del esquema es, por lo tanto, el modelo de funcionamiento hidrogeológico conceptual, con los principales elementos que actúan en un modelo de balance de agua en cualquier cuenca, generándose así un **índice de equilibrio** y un **Índice de Disponibilidad y Uso Sustentable (IDUS)**.

El primer índice consiste en la exposición de cómo operar en forma estabilizada un acuífero minado, intrusionado y sometido a uso intensivo, para ello se toma como caso de estudio el acuífero Costa de Hermosillo. Este esquema se considera de uso universal para cualquier tipo de acuífero costero. La premisa parte del balance hidrometeorológico, la precipitación efectiva genera un volumen potencial de recarga de agua subterránea y un escurrimiento de agua superficial. Para ambos flujos existe una demanda en diferentes puntos de la cuenca (Figura 10.2).

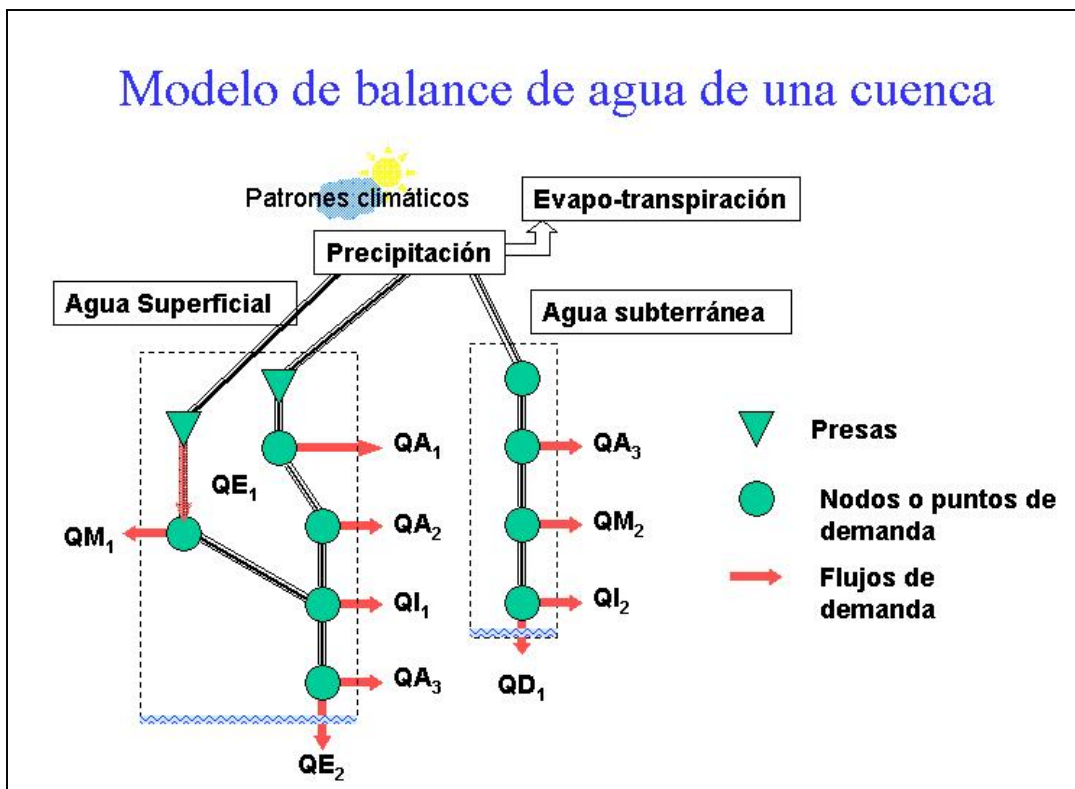


Figura 10.2 Esquema del modelo de balance en una cuenca para la generación del Índice de Equilibrio.

Las demandas pueden ser de diferentes usuarios. Considerando como parte importante que existen, las demandas ecológicas asignadas a seres vivos y humedales, y una demanda de agua para evitar la intrusión salina.

- QA_i = Demandas agrícolas
- QI_i = Demandas industriales
- QM = Demandas municipales
- QE_i = Demandas ecológicas
- QD_i = Demanda de agua para evitar la infiltración salina

Entonces, en un balance de agua para acuíferos costeros debe existir siempre una salida; si ésta es anulada, una vez que se cubre la demanda, existirá la penetración de la intrusión marina. Ésta será la diferencia elemental con los acuíferos continentales,

ya que en estos, el cambio de almacenamiento define el volumen con el cual puede operarse la demanda o consumo.

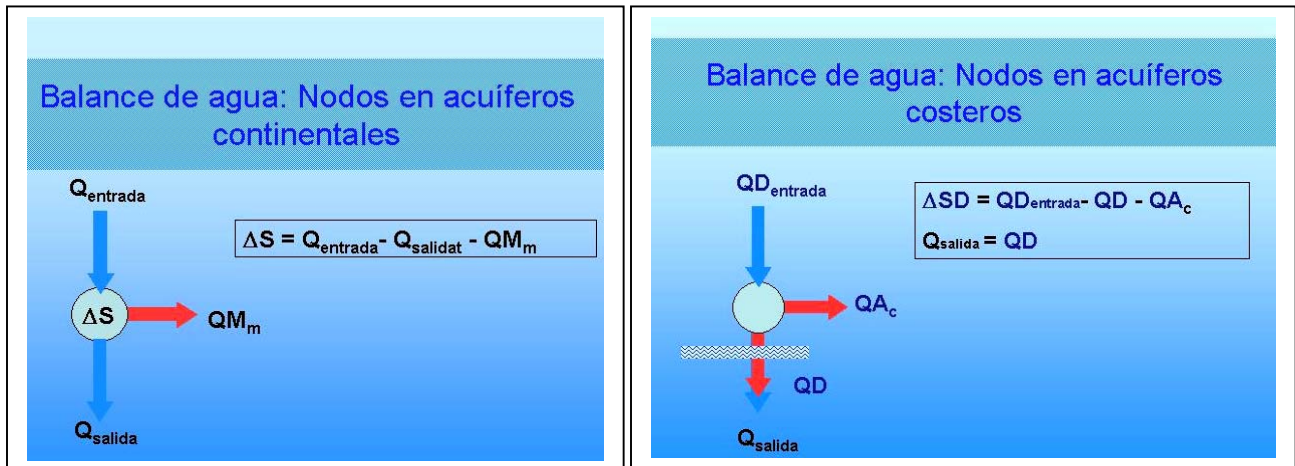


Figura 10.3 Condiciones de balances de agua en una cuenca. Izquierda, acuíferos continentales; Derecha, acuíferos costeros.

De presentarse el desequilibrio, se inducirán las condiciones para que se presente la intrusión marina, donde el caudal de demanda es mayor que el caudal de entrada; no existe salida, entonces el caudal de salida desaparece y el balance de masas en este cambio es cubierto por el agua de mar. Figura 10.4.

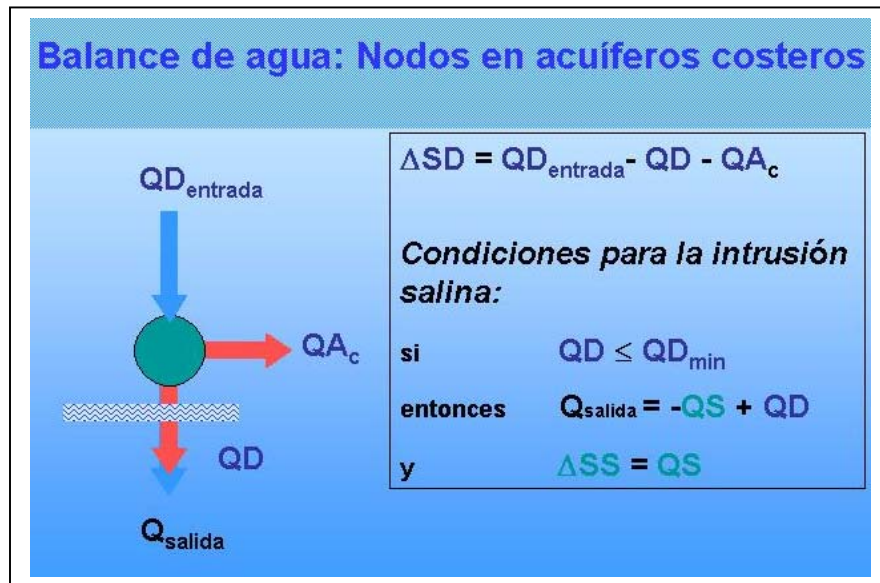


Figura10.4 Balance de agua para acuíferos costeros, condición de penetración de la intrusión marina.

Bajo este esquema se elaboró una proyección, cuyo índice de equilibrio define los volúmenes de operación con que se puede trabajar un acuífero para mantenerlo en equidad, la expresión es dada por un índice cuyo valor tiende cero con el equilibrio y crece con el desequilibrio. El modelo puede ser operado con nodos y tener una salida a través de un Sistema de Información Geográfica para un problema específico.

El segundo caso es el aspecto operativo con la utilización del Índice de Disponibilidad y Uso Sustentable (IDUS), el cual relaciona la operación del acuífero minado con el uso intensivo y su recuperación. Este esquema no cierra la extracción, que se considera necesaria para mantener el desarrollo socio-económico de la región, pero permite construir un futuro con una nueva operación hacia un estado de equilibrio, sometiendo al bombeo en un marco sustentabilidad del recurso disponible.

Si consideramos que la sustentabilidad es una herramienta útil que nos permite (Mayer, 2004):

- a) Desarrollar estrategias para el correcto manejo del agua.
- b) Determinar la sensibilidad de estrategias en el manejo del agua de acuerdo a determinados parámetros.
- c) Que ayude en la dirección de esfuerzos y en la recolección de datos
- d) Resolver conflictos.

De aquí que la sustentabilidad sea y tenga por propósito:

- a) Una combinación de modelos hidrológicos con modelos sociales, económicos y de desarrollo.
- b) Una solución a los problemas de optimización.
- c) Modelos de calidad de agua y balance de agua: simulan el flujo de agua a lo largo de la cuenca, así como la calidad de agua de ésta.
- d) Optimizar los resultados deseados.

En estas premisas se sustentó la elaboración del IDUS, ya que se requiere el uso de indicadores del análisis sustentable (Mayer, 2004, op cit.):

- a) Miden los impactos positivos y negativos en el manejo del agua.
- b) Los modelos agro-económicos e industriales-económicos simulan la conexión entre el agua y su desarrollo, la calidad de la misma y el beneficio económico.

Para su obtención, el IDUS considera los elementos descritos en el modelo conceptual, la edad obtenida para la intrusión, su tasa de avance anual y la evolución que muestra el deterioro del acuífero con el modelo de simulación en el drenado. Con este marco busca mejorar la operación futura de un almacenamiento disminuido, sometido a bombeo intensivo, utilizando como herramientas: a) el comportamiento histórico, b) la condición actual, c) la simulación proyectada a 5 años (2010). Con ello genera una proyección lineal a 20 años (2020), utilizando diferentes escenarios de extracción y recarga futura.

Para las condiciones del acuífero Costa de Hermosillo, surge la necesidad de implementar programas de restauración del medio con interpretación estrictamente técnica, pero que deben contar con la aceptación unánime de los grupos involucrados, demostrando que ningún grupo saldrá más beneficiado por la nueva hidrodinámica que los propios usuarios, ya que todo ello está expresado en términos ingenieriles del beneficio-costos. El objetivo del uso sustentable del agua es maximizar el beneficio total, tal como se expresa en la figura 10.5.

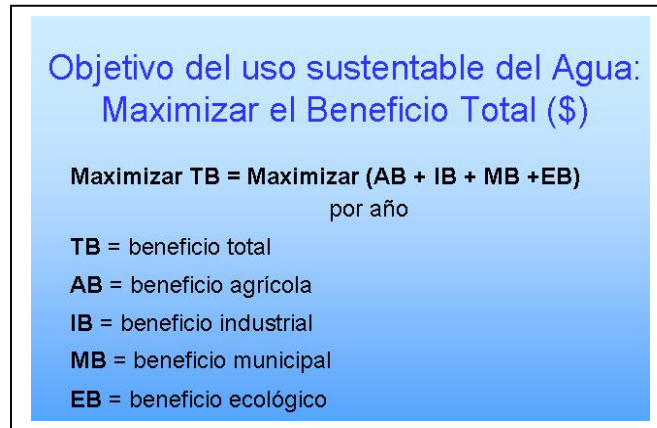
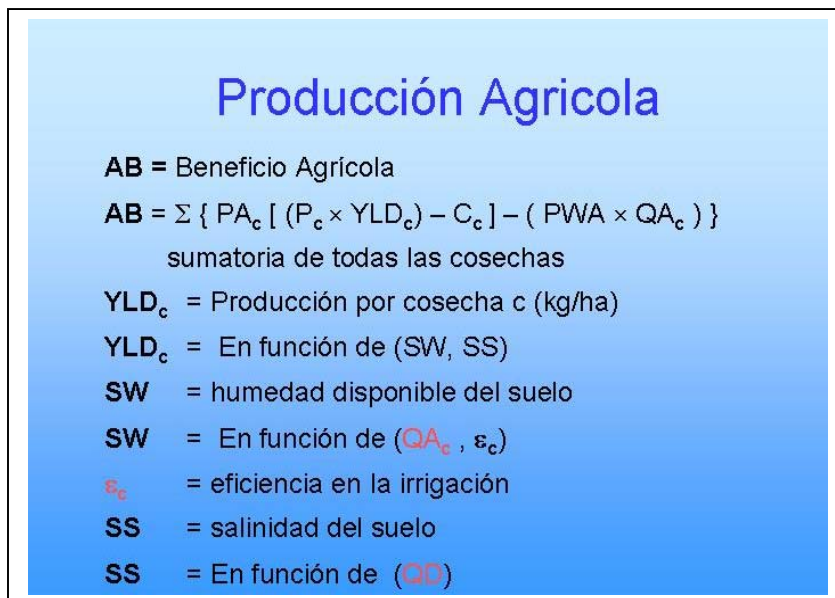


Figura 10.5 Elementos del uso sustentable del agua en la agricultura.

El deterioro de la calidad del agua y la disminución de la disponibilidad del recurso, aunado al descenso de los niveles potenciométricos, encarecen y crean una mayor pérdida en la agricultura en términos reales, ya que se hace insostenible el aprovechamiento al máximo del recurso y su competitividad en precios de los productos se verá disminuida (Figura 10.6).



En la ecuación:

- AB** = Beneficio Agrícola
- PA_c** = área utilizada por cosecha c (hectáreas)
- P_c** = precio por cosecha c (\$/kg)
- YLD_c** = producción por cosecha c (kg/ha)
- C_c** = costo por cosecha (\$/ha)
- PWA** = costo de agua de irrigación (\$/litro)
- QA_c** = demanda de agua de irrigación (litro)

Figura 10.6 Elementos de la producción agrícola que intervienen en el beneficio sustentable, en función del bombeo disponible (QD) (Modificado de Mayer, 2004).

En resumen, los criterios de uso sustentable del agua ayudan a conocer y a atenuar o eliminar los impactos a largo plazo en:

- Recursos naturales**
- Recursos sociales**
- Recursos económicos**

En este caso el indicador IDUS establece que de mantenerse las condiciones actuales de extracción sin modificación, el acuífero llegará a una condición crítica de manejo. También deja ver que para iniciar su recuperación, será necesario no solamente disminuir las tasas de bombeo, sino además realizar acciones costosas, como aplicar recarga inducida en la zona de interfase salina con el objeto de que a mediano plazo (año 2020) inicie la recuperación y ésta sea notoria a largo plazo (año 2060); solamente de esta manera se provocaría la recuperación del acuífero hasta alcanzar condiciones sostenibles (Figura 10.7).

Dado que los modelos de beneficio son obtenidos bajo las condiciones descritas por los modelos hidrológicos, ello permitirá que en la escala del tiempo pueda ser medible la recuperación del acuífero y éste pueda reportar a mediano plazo (año 20) los beneficios con una mejor respuesta de producción y efectividad observable en un año agrícola.

Una circunstancia contraria probablemente se presentaría al no alcanzarse acuerdos entre usuarios. Sin embargo, se debe sensibilizarlos respecto a que existe un "daño ambiental al sistema hidrológico", el cual, dada su gravedad, debería ser penalizado y forzarse a una toma de decisiones de restauración por parte de la autoridad correspondiente.

Para este marco existen dos escenarios de crisis:

- (1) Daño irreversible del acuífero
- (2) Insustentabilidad del sistema.

En el primer caso no se considera económicamente viable la recuperación piezométrica de los acuíferos sobreexplotados a corto y mediano plazo. En el segundo, hay que entender que bajo las condiciones hidrogeológicas en las que se encuentra el sistema acuífero, se debe establecer un "nuevo balance", considerando los volúmenes de almacenamiento, la recarga y descarga actuales, como condición inicial, y efectuar la modelación hidráulica de calidad y cantidad con las nuevas referencias.

Finalmente, en la etapa de análisis, bajo este marco de conservación, entendiendo por conservación las acciones para preservar los recursos para las futuras generaciones (Rangel 2002), es posible alcanzar la recuperación de un acuífero minado e intrusionado (Figura 10.7).

El objetivo final de la sustentabilidad es la conservación de los recursos al mayor alcance posible del futuro, reduciendo pérdidas de almacenamiento, en este caso irrecuperables, y buscar minimizar la intrusión salina (Figura 10.8).

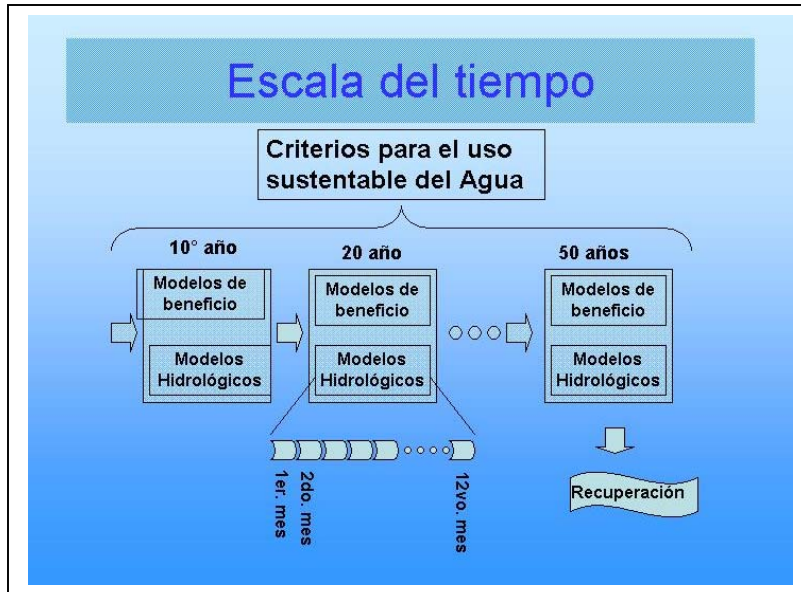


Figura 10.7 Esquema de recuperación de un acuífero costero en la escala del tiempo dentro de un marco de uso sustentable.

Criterio para los Recursos Naturales

- Minimizar pérdidas en el almacenamiento de agua subterránea (agua dulce).
Minimizar ΔS
Sobre todos los nodos de agua subterránea
- Minimizar la intrusión salina
Minimizar ΔSS
Sobre todos los nodos de agua subterránea costeros

Figura 10.8 Objetivo de la sustentabilidad como criterio para los recursos naturales.

10.2 Desarrollo del modelo de sustentabilidad.

Para generar el modelo de funcionamiento descrito se colocaron en cada celda citada (Figura 10.2) las diferentes tasas de entradas y salidas del sistema, aplicadas con base en la conceptualización de la ecuación general de balance: *Entradas-Salidas*, con una relación inversa para un acuífero afectado por la intrusión. A partir de esta definición, se realiza un manejo de escenarios con tres diferentes tasas de bombeo. De esta manera la operación guía toma un número típico para una extracción que no afectaría al acuífero, al cual se le denominó índice de equilibrio; por lo tanto, éste refleja una tendencia al cero cuando el bombeo se reduce. La ecuación está dada por:

$$IE = \frac{\text{Total de Agua Subterránea Utilizada} - \text{Volumen Total de Recarga Anual}}{\text{Intrusión Anual}} * 100$$

$$\text{Índice de Equilibrio} = \text{TASU} - \text{VTRA} / \text{IA} * 100$$

Donde:

- Entradas:**
- * **Presa Abelardo Rodríguez= 0**
 - * **Volumen Total de Recarga Anual (VTRA); incluye retorno de riego para las zonas Acuífero Siete Cerros (ASC), Acuífero Costa de Hermosillo (ACH) y Bacoachi (B); genera la recarga que se asume en tránsito.**
 - * **Flujo horizontal para ambos acuíferos, de los cuales el 86% se integra al acuífero; ambos resultado de la Recarga Hidrometeorológica (RHM) o Recarga Por Precipitación en drenes naturales (RPP).**
 - * **Drenado de Agua del acuífero (DAA).**
- Salidas:**
- * **Bombeo**, definido como Total de Agua Subterránea Utilizada (TASU) = 567 hm³, que incluye la extracción de Costa de Hermosillo (según CPCH, 1998), Bacoachi y otros usuarios (OU).
 - * **Horizontal = cero.**
 - * **Vertical a la atmósfera**, incluida en el balance de recarga hidrometeorológica (RHM).

El **escenario "A"** (Figura 10.9), para las condiciones actuales, opera con los datos de entrada y salida obtenidos a partir de este trabajo: presa Abelardo Rodríguez= 0; bombeo (TASU) = 567 hm³, que incluye la extracción de la Costa de Hermosillo, Bacoachi y otros usuarios (OU); la Recarga Total (VTRA) es = 238.7 hm³, e incluye retorno de riego para las zonas Siete Cerros (ASC), Costa de Hermosillo (ACH) y Bacoachi (B), recarga vertical que se asume en tránsito. Esta recarga total la constituye la tasa de retorno de riego, para el cual se consideró que el 64% es por inundación y 34% presurizado, resultando 79.1 hm³ y una entrada por flujo horizontal de 80.8 hm³. Con un drenado del acuífero (DAA) de -269 hm³ y cero en salidas por flujo horizontal (Figura 10.9).

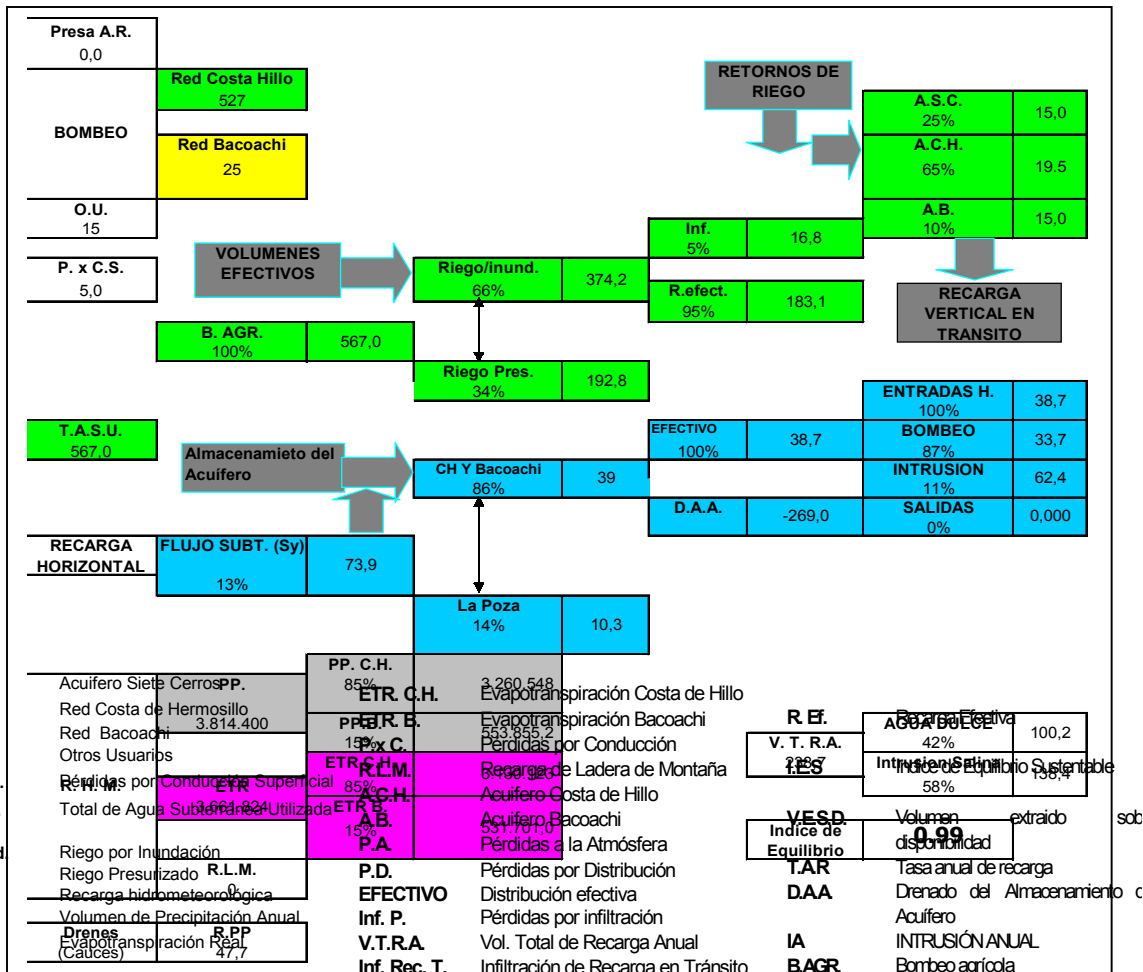
Como resultado, el modelo resuelve que bajo las condiciones actuales de bombeo (TASU), el volumen total de recarga anual (VTRA) sería de 238.6 hm³, repartido en la entrada efectiva de recarga por agua dulce, con 100.4 hm³, y el volumen de intrusión con 138.4 hm³, los cuales varían en orden del 15% de los reales. Ello se debe a la reducción de la tasa real de recarga en esa misma proporción. Con este escenario se obtiene un índice de equilibrio de 337.8 adimensional. Este escenario representa prácticamente la calibración de la ecuación (Tabla 10.1 y Figura 10.9).

ENTRADAS (hm ³)		REALES	SALIDAS (hm ³)		REALES	RESULTADOS DEL MODELO	
PRESA A.R.L.		CERO	Total de Agua Subterránea Utilizada Bombeo (TASU)		567	(hm³/año)	
Volumen Total de Recarga Anual (VTRA)	Agua Dulce	238.7	Flujo Horizontal			Agua Dulce	100.2
	Intrusión	98.4				Intrusión	138.4
Recarga vertical		79.1	Drenado de acuífero (bombeo)		- 269		
Flujo horizontal		80.8					
Índice de Equilibrio						337.8	

Tabla 10.1 Resumen de resultados del escenario "A", para condiciones actuales.

Figura 10.9
Escenario "A" de modelo operativo del acuífero de la Costa de Hermosillo.

EXPLICACIÓN DE ABBREVIACIONES



El **escenario "B"** (Figura 10.10) propone una disminución en el bombeo a 350 hm³/año y demuestra que éste es, sin lugar a dudas, el parámetro más sensible en la afectación de cualquier acuífero, ya que en el modelo, como en todo acuífero costero, refleja que su descontrol es la causa de la intrusión marina. El resultado muestra disminución en la infiltración por los retornos de riego a 10.4 hm³/año; el flujo horizontal se reduce en un 9%, por lo tanto el VTRA queda en 168.5 hm³, compuesto por recarga de agua dulce con 102.2 hm³ y por intrusión marina en 60.0 hm³, con un índice de equilibrio situado en 245.9 (Tabla 10.2).

ENTRADAS (hm ³)		REALES	SALIDAS (hm ³)		REALES	RESULTADOS DEL MODELO	
PRESA A.R.L.		CERO	Total de Agua Subterránea Utilizada Bombeo (TASU)		350		
Volumen Total de Recarga Anual (VTRA)	Agua Dulce	168.5	Flujo Horizontal			Agua Dulce	102.2
	Intrusión	98.4				Intrusión	60.0
Recarga vertical		10.4	Drenado de acuífero (bombeo)		- 269	Total	162.2
Flujo horizontal		158.1					
Índice de Equilibrio							245.9

Tabla 10.2 Resumen de resultados del escenario "B", para condiciones actuales.

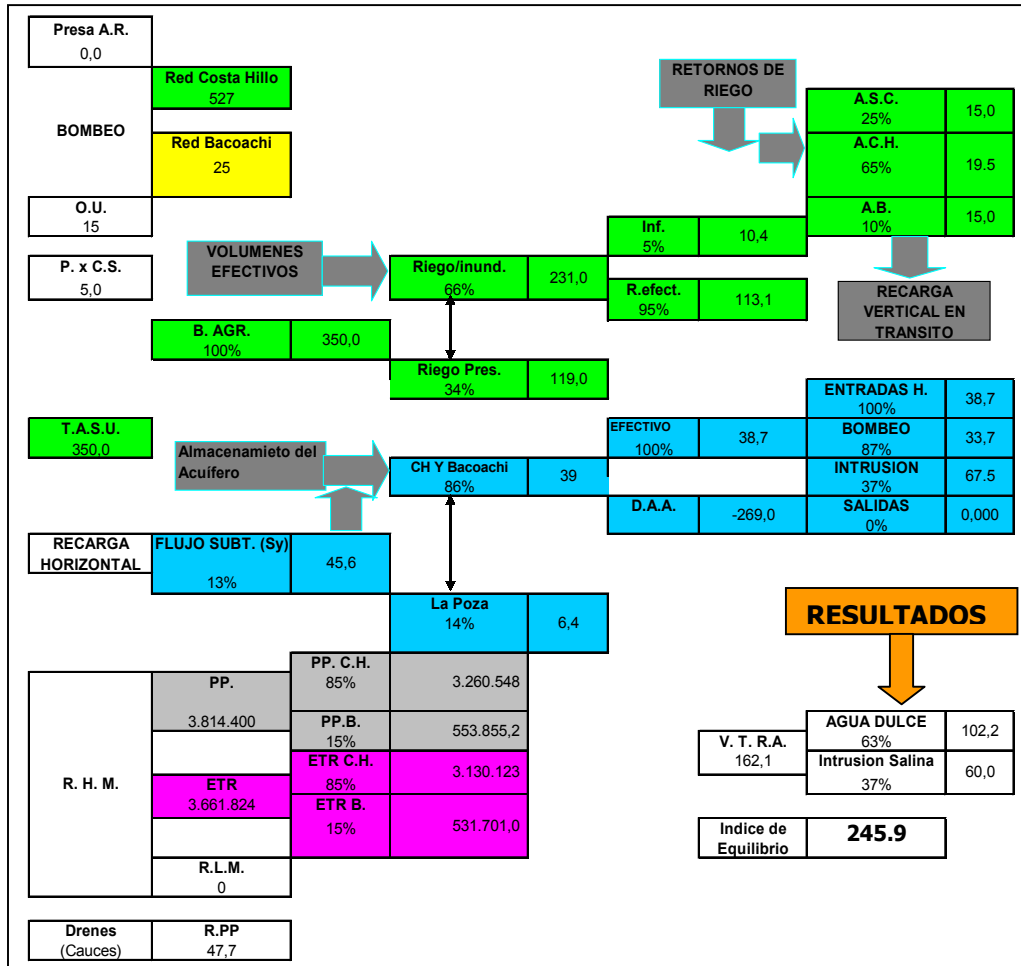


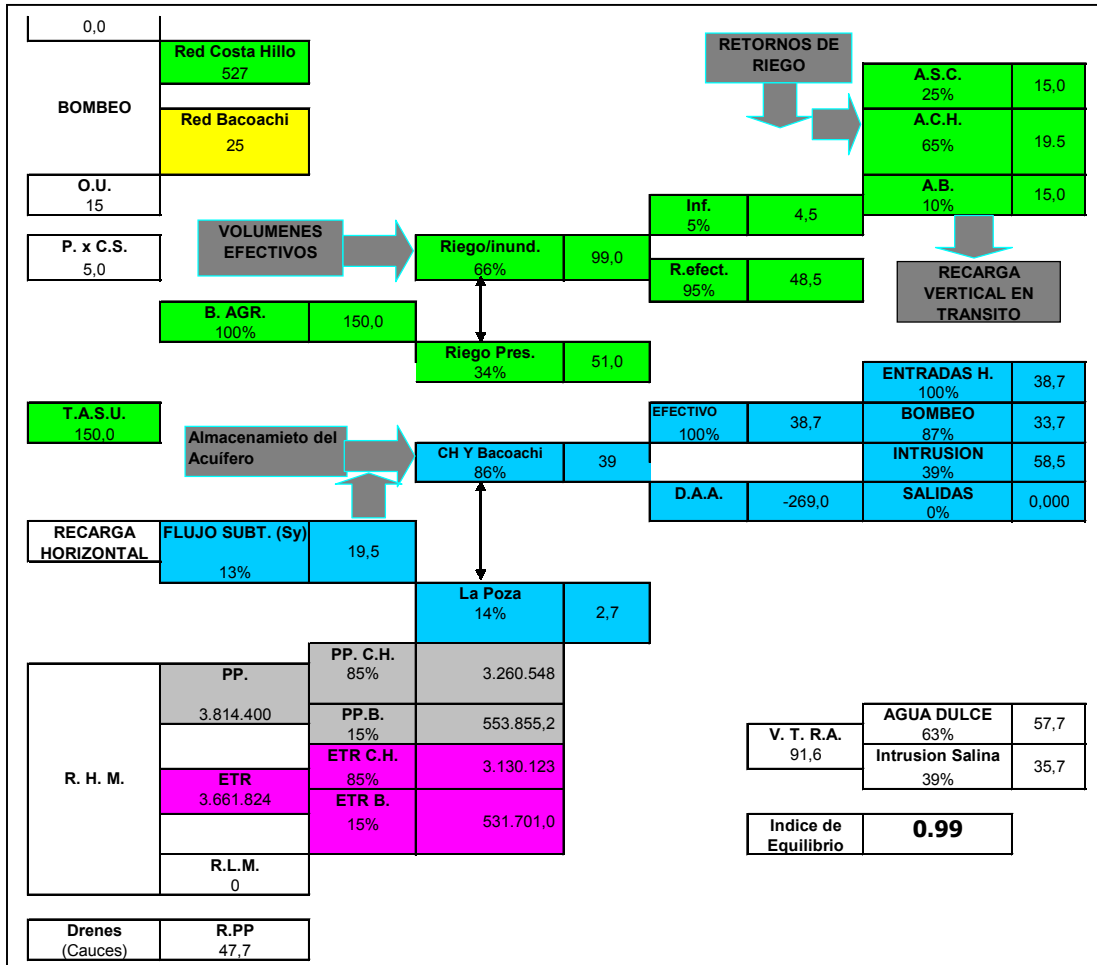
Figura 10.10 Escenario "B" de modelo operativo del acuífero de la Costa de Hermosillo

El **escenario "C"** (Figura 10.11) plantea una disminución del bombeo a 150 hm³/año, volumen que prácticamente iguala a la recarga de agua dulce actual. El modelo supone que la operación llevaría al acuífero a un índice de equilibrio = cero. En este caso el índice de equilibrio obtenido requiere igualar el bombeo a la tasa de recarga de agua dulce actualmente conseguida. Con este índice se alcanzaría la menor tasa de afectación por intrusión marina, pues se aprecia un descenso en la recarga por intrusión con 60.5 hm³/año. Llevar a cero el índice de equilibrio, precisaría no solamente de un gran esfuerzo de los usuarios en el manejo de volúmenes de

extracción, sino que además sería necesario inyectar una recarga adicional para poder revertirlo y, asimismo, detener el descenso de niveles. Este proceso requerirá de varias generaciones, las actuales deberán trabajar sin que noten que se retrae el frente de intrusión durante varias decenas de años. (Tabla 10.3).

ENTRADAS (hm ³)		REALES	SALIDAS (hm ³)		REALES	RESULTADOS DEL MODELO	
PRESA A.R.L.		CERO	Total de Agua Subterránea Utilizada Bombeo (TASU)		150		
Volumen Total de Recarga Anual (VTRA)	Agua Dulce	91.6	Flujo Horizontal		0	Agua Dulce	57.7
	Intrusión	98.4				Intrusión	35.7
Recarga vertical		4.5	Drenado de acuífero (bombeo)		- 269	Total	93.4
Flujo horizontal		87.2					
Índice de Equilibrio							0.9

Tabla 10.3 Resumen de resultados del Escenario "C", para condiciones con 163 hm³/año.



10.3 Análisis de escenarios de bombeo para restituir el manejo sustentable: Índice de Disponibilidad y Uso Sustentable (IDUS).

Para generar el IDUS se tomaron en cuenta los elementos descritos en el modelo conceptual. Los resultados muestran que la implementación de un plan de recuperación resulta urgente, sobre todo cuando el organismo operador del agua potable en Hermosillo (AGUAHH) ha concluido la construcción de pozos para extraer entre 21 hm³/año a partir del verano de 2006, luego de arduas negociaciones con agricultores de la Costa de Hermosillo para adquirir esos derechos. Sin embargo, el bombeo concentrado en la zona de Los Bagotes, sugiere que se interceptará el flujo de recarga y se acelerará el desequilibrio del acuífero Siete Cerros. Por ello se aprecia que esta no es una solución definitiva en términos de la restauración del acuífero, por lo que no deberá ser mantenida por más de cinco años a ese ritmo, sino que solamente se tome como un paliativo que permita el encuentro de soluciones sustentables de largo plazo para la ciudad. Como base se puede citar que el almacenamiento original del acuífero se estimó en 68,000 hm³, del que se han drenado alrededor de 43,820 hm³ (CNA, 2002), equivalentes al 65%; actualmente su almacenamiento es de unos 24,180 hm³, con un abatimiento acumulado promedio de 58.5 m (CNA, 2002).

Con este marco se creó y se propone un Índice de Disponibilidad y Uso Sustentable (IDUS), el cual utiliza como herramientas: el comportamiento histórico, la condición actual, el resultado del modelo de simulación de flujo proyectada a 5 años para generar con sus resultados una proyección lineal a 10 años, más los diferentes escenarios de extracción y recarga futura.

Como punto de partida, el índice está dado por una ecuación, cuyo principio es el de continuidad (Ley de Conservación de Masas), que establece que no puede haber un cambio neto en la masa o el fluido contenido en un volumen pequeño de un acuífero, que no sea balanceado por un cambio correspondiente en el flujo de masa o un cambio en la masa almacenada del volumen o ambos (Fetter, 2001). Por lo tanto, las salidas deben mantenerse proporcionales a las entradas, mismas que al ser rebasadas afectan el almacenamiento, y en consecuencia la intrusión marina se expresa como entrada al sistema para reponer el desequilibrio. El IDUS es adimensional y por conveniencia es multiplicado por 100 negativo, para que represente condición de subexplotado por debajo del cero, y por encima de éste un resultado que al crecer refleje una mayor inestabilidad del sistema, quedando entonces como:

$$\text{IDUS} = -100((\text{recarga} - (\text{bombeo} + \text{intrusión}))/\text{almacenamiento})$$

ESCENARIO IDUS-1 CON DESCENSO DEL BOMBEO.

La aplicación de la fórmula para obtener el IDUS define los escenarios para períodos desde 1945 (condición inicial) y se maneja con la evolución subsiguiente para cada 10 años de bombeo hasta el 2005. Esta aplicación toma en cuenta los mismos

años del modelo de simulación de flujo en estado estacionario entre 1945 y 1995, y transitorio para los años 2000, 2003 y 2010. Para cada escenario se muestran las bases de datos siguientes:

- a) Datos reales de los abatimientos total y por año, para cada período considerado, y que fueron utilizados en el modelo de simulación.
- b) Se utiliza la recarga diferenciada en cuatro etapas, considerada para cada año del período.
- c) Se estimó el volumen de intrusión anual, y la forma en que ha repercutido cada escenario de extracción en el volumen de almacenamiento drenado. Éste se realizó con apoyo en los resultados del modelo de simulación de flujo. Por lo tanto, el factor de pérdida del recurso converge con los resultados de la simulación para el año 2010. Las proyecciones subsiguientes son lineales, considerando validez de 5 años para el modelo de simulación, a partir del año 2010. Posteriormente se hace la proyección de la pérdida del almacenamiento del acuífero al año 2020 para calcular el IDUS, asumiendo los resultados obtenidos con el modelado hidrodinámico.

Los resultados de la aplicación del IDUS se observan en la Tabla 10.4.

AÑO	BOMBEO	ABATIMIEN TO TOTAL (m)	ABATIMIEN TO / PERIODO (m/año)	RECARGA	INTRUSION	VOLUMEN DRENADO	ALMACENA MIENTO	INDICE
1945	0	0	0	350	0	25	68,000	-0.51
1955	630	6	0.6	350	0	3065	64,935	0.43
1965	1200	12.5	1.25	350	300	9420	55,515	2.07
1975	850	11	1.1	300	200	10,070	45,445	1.65
1985	600	9.5	0.95	250	100	7815	37,630	1.20
1995	450	5.5	0.55	250	100	5115	32,515	0.92
2000	450	10	1	150	100	2310	30,205	1.32
2005	450	4	0.8	150	100	2250	27,955	1.43
2010	350	2.9	0.29	150	100	1750	26,205	1.14
2015	250	2.9	0.29	150	100	1250	24,955	0.80
2020	150	2.9	0.29	150	100	750	24,205	0.41

Tabla 10.4 Aplicación del IDUS-1 con los diferentes escenarios. Disminución paulatina del bombeo de 450 hm³/año (cifra actual) a 150 hm³/año en los próximos 15 años.

El IDUS-1 para cada período es cero para la condición inicial, el cual crece conforme se incremento el bombeo; el mayor valor se alcanza con un fuerte crecimiento en el año 1965, como respuesta al máximo histórico de extracción con 1200 hm³/año. Existe un punto crítico que se ubica entre el período 2000 al 2005, como consecuencia de la actualización de la evaluación de la recarga, la cual resultó menor a la existente. Esta disminución somete al acuífero a una fuerte tensión, que obliga a actuar en el cambio de políticas de manejo para su recuperación. Se propone entonces llevar a cabo una disminución paulatina del bombeo a una tasa de 12.0 hm³/año, para llevarlo de 450 hm³/año (cifra redondeada de la oficial actual) a 150 en los próximos 15 años (Figura 10.12).

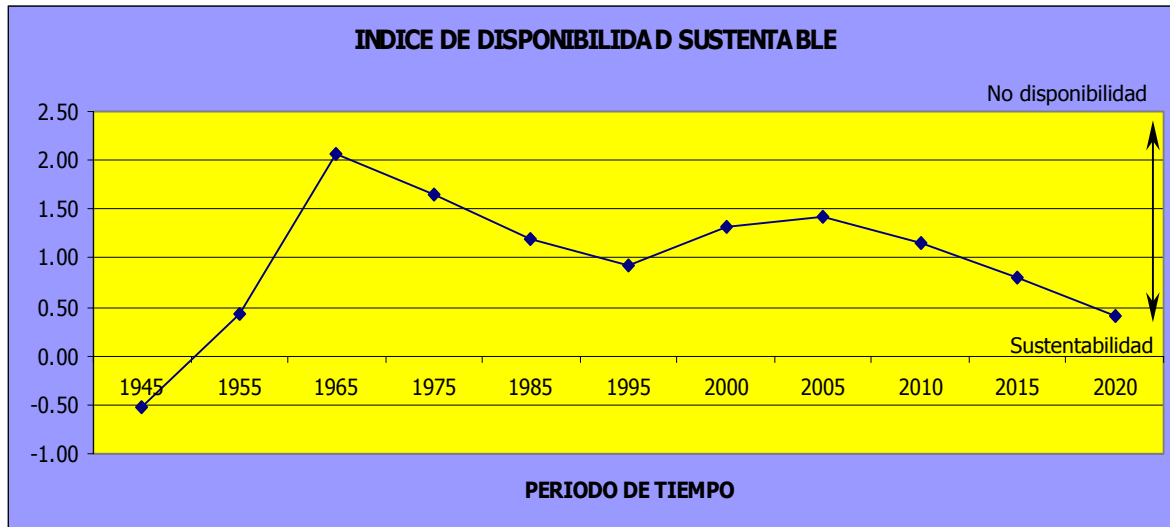


Figura 10.12 Evolución del IDUS histórico y su proyección al 2020 con escenario de descenso del bombeo.

La Figura 10.12 muestra la relación entre el IDUS y la evolución del acuífero en el tiempo. El modelo ubica el inicio de recuperación a partir del año 2020, cuando el IDUS se aproxima a cero, semejante a la condición del año 1955, lo cual apoya en la calibración de la proyección. Este escenario de operación significa únicamente disminución del bombeo. La Figura 10.13 muestra la aplicación del escenario IDUS-1; en ella se observa la tendencia de los dos parámetros del balance del acuífero: recarga y descarga (bombeo) con su resultante; la intrusión. Esta última reacciona deteniéndose al descender el bombeo.

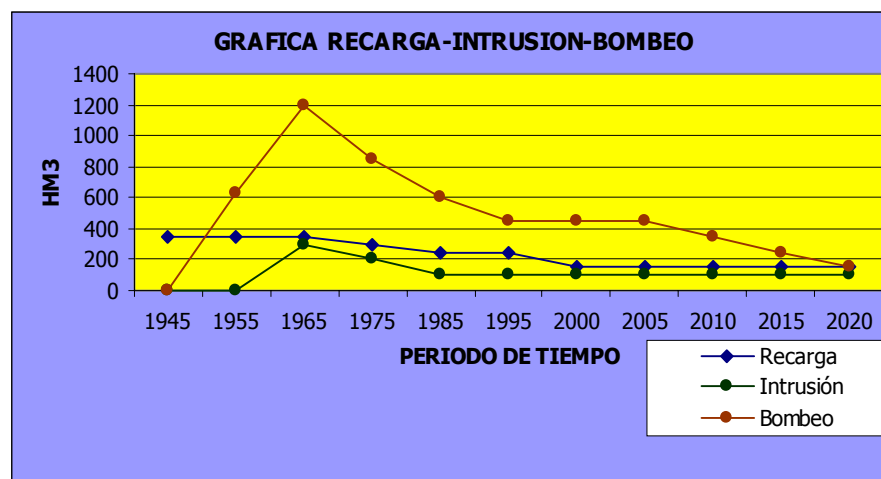


Figura 10.13 Comparación del comportamiento de bombeo, recarga e intrusión, con IDUS-1.

Este escenario opera una mejoría si la extracción se reduce, aún conservándola intensiva. No tiene efecto en el descenso del almacenamiento y abatimiento; el abatimiento se mantiene en 0.29 m/año, que posicionaría al abatimiento total promedio en 67.2 m al año 2020, considerando que la intrusión se conserve a un ritmo de 100 hm³/año. Proyectando a 50 años este mismo escenario, con únicamente reducción de bombeo equilibrado con la recarga actual de 150 hm³/año, el IDUS-1 muestra que para

el año 2060 la modificación de la operación, sin aplicar restauración con recarga inducida, llevaría al acuífero a una situación de estabilidad crítica entre intrusión y recarga, conservando delicado el minado del almacenamiento (Tabla 10.5).

AÑO	BOMBEO	ABATIMIENTO TOTAL (m)	ABATIMIENTO / PERIODO (m/año)	RECARGA	INTRUSION	ALMACENAMIENTO	INDICE
1945	0	0	0	350	0	68,000	-0.51
1955	630	15	1.5	350	0	64,935	0.43
1965	1200	70	7	350	300	55,515	2.07
1975	850	20	2	300	200	45,445	1.65
1985	600	15	1.5	250	100	37,630	1.20
1995	450	10	1	250	100	32,515	0.92
2000	450	10	1	150	100	30,205	1.32
2005	450	4	0.8	150	100	27,955	1.43
2010	350	2.9	0.29	150	100	26,205	1.14
2015	250	2.9	0.29	150	100	24,955	0.80
2020	150	2.9	0.29	150	100	24,205	0.41
2025	150	2.9	0.29	150	100	23,455	0.43
2030	150	2.9	0.29	150	100	22,705	0.44
2040	150	2.9	0.29	150	100	21,955	0.46
2050	150	2.9	0.29	150	100	21,205	0.47
2060	150	2.9	0.29	150	100	20,455	0.49

Tabla 10.5 Aplicación del IDUS-1 con los diferentes escenarios. Disminución paulatina del bombeo a una tasa de 12.0 hm³/año por año, de 450 hm³/año (cifra actual) a 150 hm³/año en los próximos 15 años.

Los resultados de esta proyección se consideran soportables de acuerdo con las experiencias que se han observado en otros acuíferos costeros intrusionados y sometidos a bombeo intensivo.

ESCENARIO IDUS-2 CON DESCENSO DEL BOMBEO Y RECARGA ARTIFICIAL.

El escenario IDUS-2 aplica una tasa de recarga artificial a partir del año 2010; se considera que los cinco años próximos (2006-2010) sería un período en el que se podrían obtener recursos financieros y acuerdos de manejo con usuarios para implementar las políticas de recuperación del acuífero. La recarga inducida tendría que ser de 50 hm³/año durante el primer período de 5 años (10 hm³/año), adicionales a la recarga natural, si bien ésta deberá revisarse nuevamente (Tabla 10.6; Figura 10.14).

AÑO	BOMBEO	ABATIMIENTO TOTAL (m)	ABATIMIENTO / PERIODO (m/año)	RECARGA	INTRUSION	VOLUMEN DRENADO	ALMACENAMIENTO	INDICE
1945	0	0	0	350	0	25	68,000	-0.51
1955	630	6	0.6	350	0	3065	64,935	0.43
1965	1200	12.5	1.25	350	300	9420	55,515	2.07
1975	850	11	1.1	300	200	10,070	45,445	1.65
1985	600	9.5	0.95	250	100	7815	37,630	1.20
1995	450	5.5	0.55	250	100	5115	32,515	0.92
2000	450	10	1	150	100	2310	30,205	1.32
2005	450	4	0.8	150	100	2250	27,955	1.43
2010	350	2.9	0.29	200	100	1750	26,205	0.95
2015	250	2.9	0.29	250	100	1250	24,955	0.40
2020	150	2.9	0.29	300	100	750	24,205	-0.21

Tabla 10.6 Aplicación del IDUS-2 con los diferentes escenarios; a) disminución paulatina del bombeo y aplicación de recarga artificial que alcance 300 hm³/año de agua dulce dentro de los próximos 15 años.

La recarga total debería alcanzar a duplicarse para el año 2020, para llegar a 300 hm³, de manera que si una evaluación futura del medio natural aprecia su disminución, habría que generar recarga adicional para mantenerla en los 300 hm³. Como se observa en la Figura 10.14, la proyección obtiene una respuesta muy optimista al año 2020, ya que el IDUS-2 sugiere que la recuperación sería franca en ese año, pero además se

alcanza un índice de cero, semejante al año de 1945, de -0.51 , con las condiciones iniciales de extracción, luego de la inyección de $1,750 \text{ hm}^3$ en la zona de interfase.

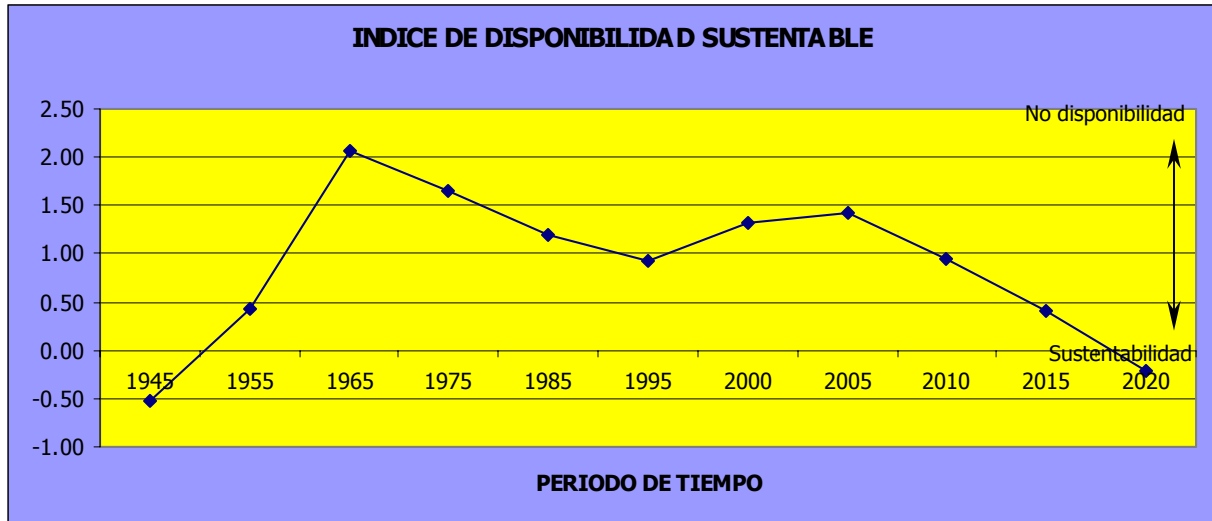


Figura 10.14 Evolución del IDUS histórico y su proyección al 2020 con escenario de descenso del bombeo y aplicación de recarga artificial al acuífero Costa de Hermosillo.

La Figura 10.15 presenta la tendencia de los tres parámetros de respuesta de la operación del acuífero: recarga, bombeo e intrusión, con la aplicación del escenario IDUS-2 con recarga artificial y descenso del bombeo. La intrusión se mantiene estable, si desciende el bombeo y aumenta la recarga.

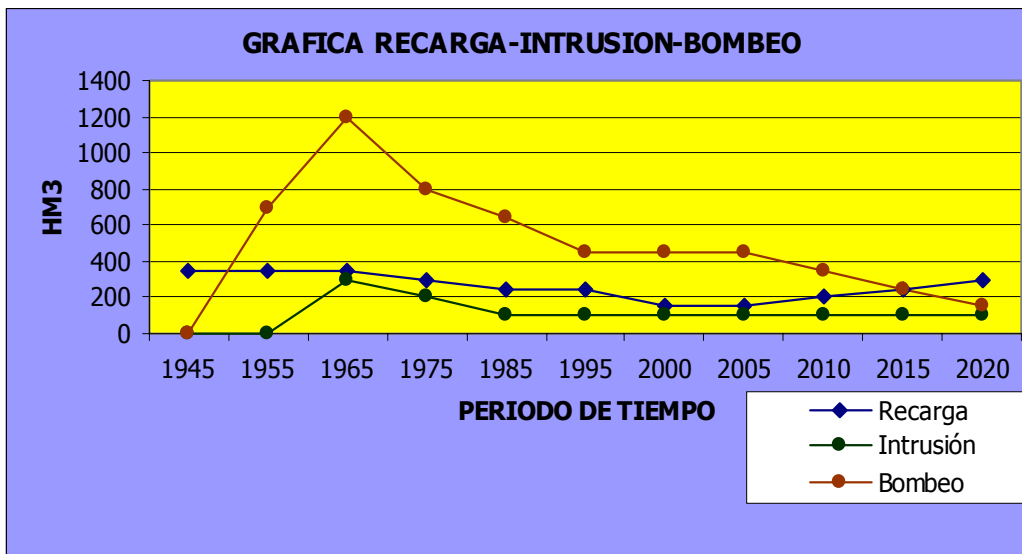


Figura 10.15 Comparación del comportamiento de bombeo, recarga e intrusión, con IDUS-2.

ESCENARIO IDUS-3, BOMBEO ACTUAL A 15 AÑOS.

El caso crítico, contrario a la lógica de sustentabilidad y la negación de la recuperación de un acuífero, significa "hacer nada", es decir, mantener la operación actual con 600 hm³/año (CNA, 2005) obtenido con base en el consumo de energía eléctrica, y seguir sin efectuar mediciones exactas en pozos. Esto, considerando que la intrusión continuará penetrado a una tasa de 2 hm³/año y que la recarga disminuye a un ritmo de 4 hm³/año. El IDUS sufre un incremento que clausura cualquier posibilidad de sustentabilidad actual y, desde luego, futura (Tabla 10.7 y Figura 10.16).

AÑO	BOMBEO	ABATIMIEN TO TOTAL (m)	ABATIMIEN TO / PERIODO (m/año)	RECARGA	INTRUSION	VOLUMEN DRENADO	ALMACENA MIENTO	INDICE
1945	0	0	0	350	0	25	68,000	-0.51
1955	630	6	0.6	350	0	3065	64,935	0.43
1965	1200	12.5	1.25	350	300	9420	55,515	2.07
1975	850	11	1.1	300	200	10,070	45,445	1.65
1985	600	9.5	0.95	250	100	7815	37,630	1.20
1995	450	5.5	0.55	250	100	5115	32,515	0.92
2000	450	10	1	150	100	2310	30,205	1.32
2005	600	4	0.8	150	102	2250	27,955	1.97
2010	600	2.9	0.29	146	104	3000	24,955	2.24
2015	600	2.9	0.29	144	106	3000	21,955	2.56
2020	600	2.9	0.29	140	108	3000	18,955	3.00

Tabla 10.7 Aplicación del IDUS con los diferentes escenarios de extracción e hidrodinámica del acuífero Costa de Hermosillo.



Figura 10.16 Evolución del IDUS histórico y su proyección al 2020 con escenario de sostenimiento del bombeo a una tasa de extracción actual estimada en 600 hm³. La línea de tendencia muestra un claro comportamiento hacia la pérdida total del recurso.

10.4 Acciones a realizar para una recuperación del sistema

Con base en los resultados del modelo de simulación de flujo y de la proyección lineal que proporciona el IDUS, se aprecia la necesidad de llevar a cabo una acción integral para recuperar los acuíferos de la cuenca baja. En éstos existen dos

posibilidades de recuperación: *natural y artificial* para los acuíferos del valle del río Sonora, y *artificial* para los que comprenden el sistema acuífero Costa de Hermosillo.

Sin embargo, para llevar a cabo cualquier programa de recuperación integral es necesario que se comprenda que en los acuíferos del valle del río Sonora:

- a) Pueden ser aún sustentables con el manejo y gestión integral del volumen disponible de agua en la cuenca del río Sonora y no solamente en la cuenca baja. Se requiere orden y cumplimiento de la normatividad. En la producción primaria resulta urgente la modernización de mecanismos y métodos en la extracción y eficiencia en el uso del agua, así como mejorar el aprovechamiento y la administración del recurso en los organismos operadores.
- b) El primer paso ya se dio, al quedar identificados los regímenes del flujo subterráneo; ahora es necesario operar a éstos que se relacionan con el ciclo corto del agua como los viables de sustentabilidad, tomando a la cuenca como la unidad fisiográfica donde tiene lugar el ciclo hidrológico completo.
- c) Buscar su equilibrio y sustentabilidad con base en el análisis de la alternancia de los ciclos cortos, medios y largos de precipitación y sequía que se han observado en la cuenca del río Sonora al menos en los últimos 50 años (Figura 10.17). Comprender que el fenómeno natural de la sequía para la cuenca es temporal y localizado, contra la condición de desierto que en la escala del hombre es permanente, por ello el reuso es inaplazable.

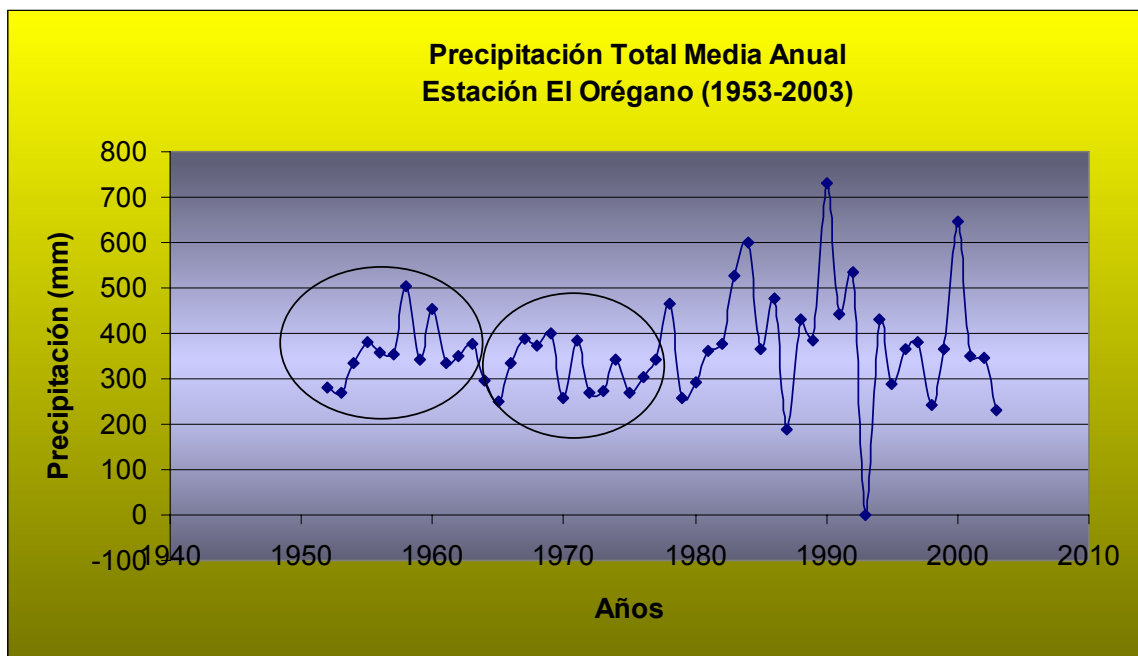


Figura 10.17. Comportamiento de la precipitación pluvial en la estación El Orégano I y II, en la cuenca baja del río Sonora, en los últimos 50 años.

- d) En este ámbito de manejo, es posible la recuperación con acciones que permitan operar a la naturaleza su reposición y apoyarla realizando prácticas de infiltración inducida. Estos trabajos comprenden dos actividades: recarga y almacenamiento. Para el primer caso resulta indispensable efectuar estudios de identificación de las mejores zonas de infiltración de escurrimiento en cauces y embalses de recarga de acuíferos con agua moderna y cosecha de lluvia rural y urbana. En el primer caso, incluye evitar perder por evaporación el volumen que se logre almacenar en un buen período de lluvia; baste recordar que en 1995, cuando el almacenamiento de la presa Abelardo Rodríguez alcanzó más de 250 hm³, se perdieron 98 hm³ por evaporación (CNA, 2002).
- e) Existe una segunda postura de entendimiento para la gestión y manejo; en ella se deben incluir las zonas de régimen y tránsito de flujo regional, las cuales componen al sistema Costa de Hermosillo. En estos acuíferos el almacenamiento ha sido minado a tal grado, que la pérdida junto con la intrusión marina pueden considerarse como un proceso irreversible. Por lo tanto, para su recuperación se requiere de acciones estrictamente artificiales para la zona, dada la inexistencia de escurrimientos en la planicie costera, lo que limita las posibilidades de embalsar y recargar con flujo superficial natural. Existen dos posibles acciones inducidas de recarga al subsuelo:
- 1) Utilizar las aguas residuales de la ciudad de Hermosillo, llevando al cabo un tratamiento estricto de la calidad antes de infiltrarse en embalses pequeños y pozos de absorción pluvial, para evitar la alta exposición atmosférica; esto puede dar oportunidad de incrementar la tasa de recarga, induciendo agua de lluvias en temporada a esos embalses.
 - 2) Este proceso induciría recarga al acuífero de Hermosillo, a la entrada a la costa de Hermosillo. La zona es de alta permeabilidad pues se encuentra ubicada en el cauce antiguo del río Sonora. Actualmente el canal Villa de Seris, que descarga sus aguas para el área de los Ejidos La Yesca, Villa de Seris y La Manga, se ha convertido en un pequeño distrito de riego con aguas negras, que al regar por inundación es un foco de infección en al menos 2,000 has. En esta zona se estima que la recarga por este concepto es de aproximadamente 10 hm³/año y ha mantenido los niveles freáticos someros entre 8 y 25 m. En esta opción se requiere: tratar el agua antes de entregarla a los usuarios y hacer eficiente el manejo del riego para maximizar el uso del agua.

Nuevamente las limitaciones aparecen, pues existen varios factores a considerar para los sitios de recarga (Otero, 1990):

- Sitio adecuado en capacidad, geomorfología y estratigrafía
- Apropiado en características texturales en el acuífero, controlando la porosidad y la permeabilidad
- Una precipitación adecuada
- Volumen de inundación por escurrimiento y frecuencia
- Calidad del agua
- Los sedimentos transportados en el escurrimiento

Una experiencia de infiltración artificial para condiciones similares en Laguna Seca, Coahuila, en 1986, tuvo un costo de 2.5 millones de dólares y obtuvo un almacenamiento para recarga para infiltración de 20 hm³/año (Otero, 1990, op cit.).

- 3) En la zona de interfase salina, la posible recuperación es tal vez una de las más complicadas en el planeta. Se requiere retraer el frente de agua marina, y ello implica regresar al equilibrio en calidad y cantidad al agua subterránea almacenada en el acuífero. En la mayoría de las zonas costeras observadas: Los Ángeles, Estados Unidos (Foreman 2003); delta del Ebro, Mallorca, Pego-Oliva, Santa Pola, Torre Vieja y mar menor Salinas del Cabo, en España (Gómez, 2003); delta del Rhin (Aunay, et al., 2004); Costa de Siracusa, Italia (Barrocu, 2003), se cuenta con posibilidades técnicas y financieras, además de que los frentes de intrusión son más pequeños y en ninguno de los casos rebasan 10 km de penetración. Con base en los estudios y acciones de prevención y restauración, así como las características y condiciones de la Costa de Hermosillo, se puede resumir que para este acuífero sería posible llevar a cabo un programa de recuperación aprovechando dos métodos combinados en uno:
- a) Utilizando una barrera de pozos de inyección de agua marina o salobre, tratada con calidad máxima de 500 µS/cm de conductividad eléctrica del agua en la zona de interfase.
 - b) Utilizando pozos de extracción de agua salobre para usarse en una planta desalinizadora, cuyo producto puede ser intercambiado a los usuarios de riego o comercializarse para fines de consumo humano hacia la ciudad de Hermosillo.

Esta opción es únicamente posible utilizando agua marina o salobre, pues no se dispone de escurrimiento, como ya se esgrimió. De igual manera, la posibilidad de utilizar aguas residuales es práctica técnica y económicamente, a la entrada del acuífero, pues dada la distancia de 115 km desde la ciudad de Hermosillo al litoral, la opción queda como solución de recarga al acuífero de Hermosillo, cuya zona de descarga se encuentra entre 10 y 15 km de la ciudad.

En otro ejemplo de restauración, el acuífero de Los Ángeles, California, a finales de los años 60 inició un proyecto de recuperación utilizando barreras de pozos de inyección de agua importada; actualmente la recuperación ha sido parcialmente

alcanzada, casi 50 años después (Foreman, 2003). Sin embargo, existe una gran diferencia entre la costa de Hermosillo y el sistema hidrológico de Los Ángeles, éste recibe una importación de agua superficial de 5,400 hm³/año de la presa Hoover e inyecta en pozos desde 1991 un volumen de 98 hm³/año de agua reciclada rigurosamente tratada (Foreman, op cit.). Su programa de recuperación, ha consumido años y es altamente costoso. Recibe subsidios locales, estatales y federales para su ejecución. El proyecto incluye pozos de extracción, plantas de desalinización e instalaciones para disponer de los residuos de salmuera; sus objetivos son extraer el agua de la pluma de intrusión, recuperar la capacidad de almacenamiento de la cuenca, proteger a los usuarios de la penetración y proveer de agua potable a la ciudad.

10.5 Propuesta de administración hidrogeológica

Con base en el análisis hidrogeológico mostrado y los resultados de los índices de equilibrio (IE) de este trabajo, se propone una nueva condición hidrogeológica en el acuífero Costa de Hermosillo. Este modelo es una base para modificar la definición existente de una sola unidad administrativa del acuífero Costa de Hermosillo (Figura 10.18) y convertirlo en un **Sistema Acuífero**, subdividido en tres acuíferos: (1) Costa de Hermosillo, (2) Siete Cerros y (3) Hermosillo-Calle Cero (Figura 10.19). Esta subdivisión está acorde con la actualización de su hidrodinámica, la evaluación de la recarga y el nuevo modelo de funcionamiento del flujo subterráneo, donde a partir del descenso piezométrico las zonas acuíferas se han desligado a tal grado, que cada una trabaja como una unidad hidrogeológica independiente, suficiente como para considerarse unidad acuífera por sí sola.

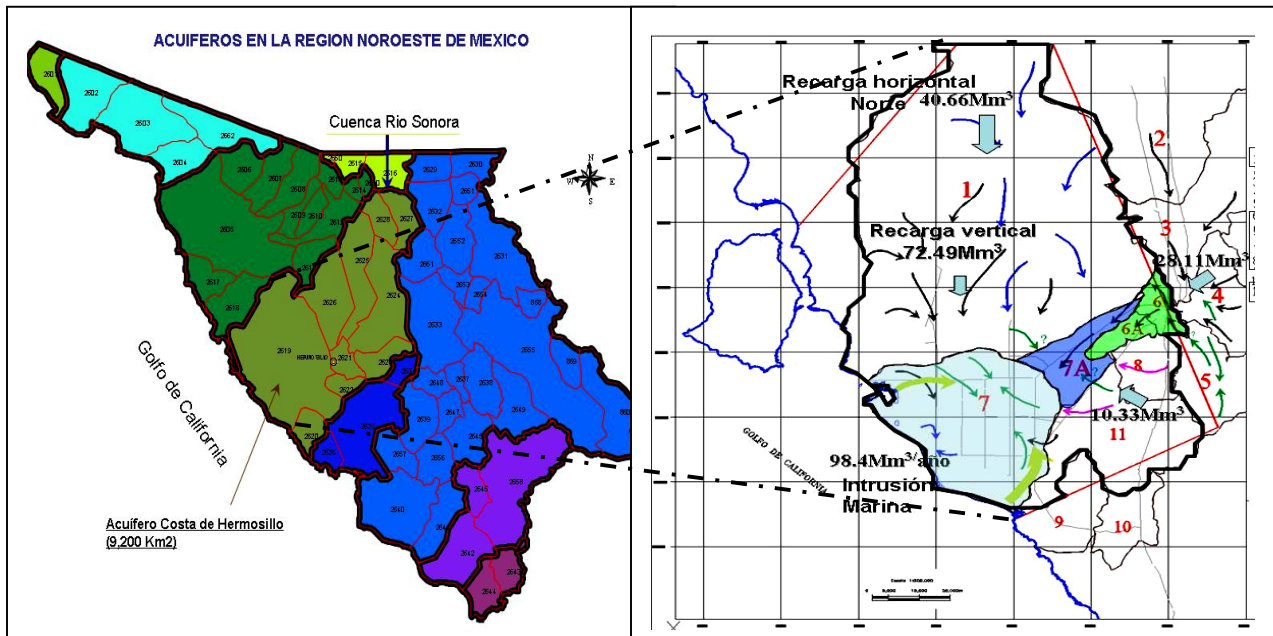


Figura 10.18 Actual distribución administrativa de acuíferos en la Región Noroeste (CNA-2004a).

Figura 10.19 Propuesta administrativa con tres acuíferos.

Por lo tanto, la regulación administrativa y legal deberá ser modificada en respuesta a esta nueva condición hidrogeológica. Actualmente, la Ley General de Aguas

y su Reglamento (CNA, 2004) aún consideran que una relocalización se puede realizar siempre que sea dentro del mismo acuífero. En este caso específico sería dentro del acuífero Costa de Hermosillo. La importancia de separarlo de las otras unidades se deriva de su estatus de sobreexplotado, su intrusión por agua marina y a que aún es y seguirá siendo sometido a bombeo intensivo.

Las características asumidas para cada nueva unidad acuífera son las siguientes:

10.5.1 Acuífero Costa de Hermosillo.

Cubre alrededor de 3,000 km² y es la real unidad hidrogeológica costera. El acuífero varía en espesor de un mínimo de 200 m y hasta 340 m; está constituido por sedimentos típicos de ambientes fluvio-aluviales cuaternarios, depositados en antiguas laderas. Los sedimentos fluviales fueron depositados por medio de canales y se originaron ocasionales depósitos lacustres, mostrando un empaquetamiento arcilloso con espesor de 50-100 m. Está sujeto a un bombeo concesionado de 409 hm³/año (CNA, 2004a), estimado por el Colegio de Posgraduados (1999) en 527 hm³/año y por CNA (2005) en 600 hm³/año. Con base en los datos publicados por el DOF (2002) para la disponibilidad del acuífero, se obtiene que se han extraído al menos 43,800 hm³ de agua subterránea en los últimos 55 años. Actualmente está saturado un espesor de 60 a 100 m, lo que significa que la extracción ha drenado entre el 60-70% de su almacenamiento original. El volumen almacenado entonces se estima que sea de alrededor de 14 a 19,000 hm³ (OMM, 2005). En este estudio se estimó en 20,000 hm³. La salinidad del agua en términos de la conductividad eléctrica varía de 400 a 40,000 µS/cm. Las edades relativas de C-14 del agua subterránea van de 2750 a 4500 años en sentido del gradiente respectivamente (Rangel, 2000, 2000a, 2000b, 2003, 2003^a, 2004^a, 2004^b).

10.5.2 Acuífero Siete Cerros.

El acuífero Siete Cerros está formado por una serie de paleocanales de La Poza, Los Bagotes y Sonora. De esta forma, su anchura está limitada y su extensión es del orden de 10 a 25 km. El área es de alrededor de 1500 km². Actualmente este acuífero está localizado en la parte central del sistema. El nivel freático varía entre 90 y 120 m de profundidad. Su espesor saturado tiene un promedio de 120 m, con un bombeo estimado de 63 hm³; su recarga es de aproximadamente 28 x 10⁶ m³. La calidad del agua es menor a 1000 µS/cm. Sus líneas equipotenciales son todavía paralelas, con algunos crecimientos de conos de abatimiento locales. Las edades relativas del agua subterránea con C-14 varían de 280 a 420 años.

10.5.3 Acuífero Hermosillo-Calle Cero (La Manga).

Este acuífero es la entrada al sistema y está restringido a sedimentos del paleocanal del río Sonora. Cubre un área de aproximadamente 1000 km². El nivel

freático es aún somero entre 8 y 20 m de profundidad. Este acuífero tiene una recarga de agua residual de la ciudad de Hermosillo. La extracción estimada es de $10 \text{ hm}^3/\text{año}$, y no registra abatimientos importantes. Las edades relativas de C-14 varían entre 50 y 500 años.

10.6 Condición hidrodinámica.

Las condiciones hidrodinámicas trabajaban originalmente como un ensamble de cuencas comunicadas, pero con el decremento en los niveles bajó de los límites topográficos de los pilares, la piezometría se independizó y se definió como un acuífero en cada fosa. La recarga horizontal actualmente se ha dividido de igual forma; el acuífero de la Costa de Hermosillo es el más afectado por bombeo intenso e intrusionado hasta 32 km tierra adentro, con el punto más bajo de su nivel potenciométrico en -65 m bajo el nivel del mar.

10.7 Recarga al sistema acuífero Costa de Hermosillo.

Con la salinización de pozos en la franja costera, inició desde los años 80 la relocalización de pozos gradiente arriba, pero disminuyó la recarga de agua dulce e intensificó el mecanismo de intrusión salina; el balance actualizado es:

- a) Entrada total horizontal de agua subterránea = $79 \times 10^6 \text{ m}^3$
- b) Entrada horizontal de agua marina = $98.4 \times 10^6 \text{ m}^3$
- c) Recarga por la sección Este = $10.3 \times 10^6 \text{ m}^3$
- d) Recarga por la sección Norte = $40.6 \times 10^6 \text{ m}^3$
- e) Recarga sección Siete Cerros = $28 \times 10^6 \text{ m}^3$
- f) Bombeo Total = $527 \times 10^6 \text{ m}^3$
- g) Cambio de almacenamiento = $-289.402 \times 10^6 \text{ m}^3$ (2001-2002)
- h) Recarga vertical = $72.4 \times 10^6 \text{ m}^3$

Esta acción interceptó la recarga a la Costa de Hermosillo; además, la intensidad del bombeo llegó a ser tan grande en los siguientes 30 años que se estableció un sobrebombeo en los acuíferos que se encuentran a la entrada del sistema, cortando prácticamente la recarga (Tabla 10.8).

ACUIFERO	Area km ²	No. de Pozos	Recarga hm ³ /año	Extracción hm ³ /año	Diferencia hm ³ /año	Condición Hidrogeológica	Tipo de acuífero	Ubicación Hidrogeológica
COSTA DE HILLO.	5	532	250	527	-277	Sobreexplotado	Costero	Zona de descarga
SAHUARAL	1.1	73	70	100	-30	Sobreexplotado	Costero	Ídem
M.DEL SERI-L. VIC	215	150	62	120	-58	Sobrebombeado	Continental	Recarga
LA POZA	967	62	5	5	0	Equilibrio	Continental	Recarga
SANTA ROSALÍA	480	80	15	12.5	12	Subexplotado	Continental	Recarga
RÍO SONORA	11.64	80	157	207	-50	Sobrebombeado	Continental	Recarga
RÍO SAN MIGUEL	4.225	408	63	54	9	Equilibrio	Continental	Recarga
RÍO ZANJÓN	4340	377	82	146	-84	Sobrebombeado	Continental	Recarga
RÍO BACOACHI	450	52	11	8	3	Subexplotado	Costero	Recarga

Tabla 10.8 Características hidrogeológicas y administrativas de los acuíferos de la Costa de Hermosillo y valle del río Sonora. Nótese el número de acuíferos en desequilibrio gradiente arriba (CNA, 2004a).

La Tabla 10.8 describe las condiciones hidrogeológicas de los acuíferos gradiente arriba del acuífero Costa de Hermosillo y los define como sobrebombados y sobreexplotados. La diferencia se refiere a que los primeros se encuentran en regímenes de recarga de locales a intermedios, siendo su recuperación más dependiente de la influencia estacional de la lluvia y por supuesto de su cercanía con el régimen de escurrimiento, que se relaciona con el gasto base del río Sonora; el agua infiltrada es moderna y de reciente infiltración. La designación de sobreexplotado se refiere a los acuíferos cuyo almacenamiento ha sido minado en los términos de la definición citada de Tulipano (2003, op cit.). Su recarga es de agua premoderna, no depende de las variaciones estacionales y por lo tanto su grado de sensibilidad al sobrebombeo es más alto, quedando su condición de explotación bajo una tasa irreversible de recuperación natural y bajo condiciones de intrusión salina.

11. DISCUSIÓN

11.1. Sustentabilidad de los recursos.

La generación de cualquier política de manejo de un reservorio subterráneo requiere de un esquema integral de funcionamiento y, con ello, de un mejor y mayor número de datos para su interpretación. Pero la preservación del recurso no solamente depende en muchos casos de la calidad de la interpretación del medio natural, sino también de la responsabilidad comprometida de los usuarios. Solamente así se logrará la conservación de los sistemas hidrológicos a largo plazo.

Un medio acuífero como el de la Costa de Hermosillo, que durante los primeros 20 años de extracción inició sin conocimiento técnico, bajo una política nacional de colonización, con un marco jurídico de apoyo a la perforación de pozos y que permaneció los siguientes 32 años operando bajo un modelo hidrogeológico erróneo, sometido a bombeo intensivo, no podía tener otro resultado que el que muestra el presente trabajo. Una dualidad entre el desorden y la irresponsabilidad de los involucrados. En estos términos, la recuperación puede ser lenta, costosa y difícil, probablemente en gran parte irreversible. Se entiende que el abastecimiento de agua no puede simplemente detenerse y dejar sin suministro a los usuarios. Actualmente, en la cuenca baja del río Sonora, Hermosillo crece en necesidades con la expansión de la población y la cobertura de servicios significa un aumento del uso del agua, bajo una fuerte competencia entre el uso histórico de la agricultura con el 90%, el uso público 7.5%, el doméstico 1.5% y 1% el industrial. Por ello, en palabras de Dourejeani y Jouravlev (2003), la solución de los problemas debe buscarse en forma integral, sin desvincularse de mejorar la gestión de los recursos hídricos y de las cuencas donde se capta el agua.

El nivel de gobernabilidad de una sociedad con relación al agua se ve determinado, , por las siguientes consideraciones (Dourejeani y Jouravlev, 2003):

- i) El grado de acuerdo social (implícito y explícito) respecto de la naturaleza de la relación agua-sociedad;
- ii) La existencia de consensos sobre las bases de las políticas públicas que expresan dicha relación;
- iii) La disponibilidad de sistemas de gestión que posibiliten efectivamente, en un marco de sustentabilidad, la implementación de las políticas.

Tales consideraciones quedaron rebasadas en el caso de la Costa de Hermosillo y muy lejos de suponer una sustentabilidad. Tampoco existió el acuerdo social ni el respeto a la naturaleza, conceptos que eran muy vagos en esos años. La existencia de consensos se realizó sobre la base de una política pública de colonización y aceptación de que el medio tenía disponibilidad. El minado del acuífero demuestra que la naturaleza fue el usuario que resultó más afectado. En este caso, el desconocimiento evitó observar que solamente 5 años después de haberse iniciado la extracción

intensiva de agua subterránea, el acuífero acusó que la disponibilidad quedaba corta con la extracción; las curvas equipotenciales así lo demostraron; el volumen de recarga recuperable con el ciclo corto fue rápidamente rebasado y desde 1950, así lo indican los resultados, se inició la toma del agua del almacenamiento para cubrir la sobredemanda. Cuando se alcanza la mayor cifra histórica de extracción, la Asociación de Organismos Agrícolas del Norte de Sonora contrató un estudio hidrogeológico con consultores de Tucson, Arizona, en 1965 (Matlock, Fogel y Bush, 1966). El despacho americano concluyó:

- a) La cantidad de agua dulce que entra subterráneamente, es menos de la mitad del agua que se bombea.
- b) La mayor parte del agua disponible está bajo el nivel del mar.
- c) Una tercera parte del agua proviene del mar.
- d) Los niveles están bajando en un promedio de un metro y medio por año.
- e) El rendimiento específico parece estar entre 6 y 10 por ciento. La transmisividad es del orden de 200,000 a 500,000 galones diarios por pie de anchura del acuífero ($2.78 \cdot 10^{-2}$ a $7.18 \cdot 10^{-2}$ m³/seg/m).

Si bien las conclusiones son más cualitativas que cuantitativas, resultaron reales; el estudio fue guardado, dadas las recomendaciones de reducir inmediatamente el bombeo. En nuestros días vemos la omisión como un delito; aquel año, el estudio fue un gran esfuerzo de colaboración y preocupación de los agricultores de la costa, de los titanes del desierto. Es hasta 1968 cuando, habiendo hecho los usuarios caso omiso del estudio citado, la SRH contrata la elaboración de un estudio a Ariel Construcciones (1968), sobre el cual se fundamentó la extracción y reglamentación de los siguientes años.

De acuerdo con Tulipano (2002, 2003), el criterio de manejo de un acuífero en un sentido general es la combinación de acciones técnicas, administrativas, legales y políticas que se deben llevar a cabo para asegurar el uso correcto del territorio y de los recursos de agua subterránea. Esto significa que el objetivo final es proteger el agua subterránea de la contaminación o de la intrusión como fenómeno de empobrecimiento de su calidad.

Un criterio a seguir por administradores para el manejo de un acuífero costero tendría que estar sujeto a tres factores principales: control, prevención y remediación. Los dos primeros fueron rebasados por la realidad en el caso de estudio. Sobre el tercer elemento, las acciones más importantes se resumen en: a) Reorganización de la explotación, b) Uso integrado del recurso agua y c) Trabajo de ingeniería de restauración (presas, cortinas de concreto, recarga artificial, etc.) (Tulipano, op cit.).

Los incisos (a) y (b) implican que para iniciar la explotación de un acuífero debe existir orden y autoridad. La participación de las instituciones normativas y de los usuarios bajo un criterio de sostenimiento de la extracción. En el área de estudio, los aforos de usuarios, cuando hubo, se hicieron para conocer el caudal máximo posible de

bombeo, no para conocer el caudal óptimo de acuerdo con las características de la hidráulica del medio. No obstante, una realidad del acuífero Costa de Hermosillo es su excelente calidad litológica y textural, por lo que constituye un acuífero de alto rendimiento; el error estuvo en rebasar el límite de su recarga.

El tercer elemento del manejo (inciso c), obliga a que un plan de restauración dependa de la capacidad de entendimiento y responsabilidad de parte de quienes gozan de la concesión del recurso. Solamente de esta forma será posible generar la reorganización de la explotación y, en consecuencia, el uso integrado. De no hacerlo así, cualquier política de manejo resultará inútil y el deterioro del medio natural continuará sin tener responsables, sin existir recursos y sin aprecio de los protagonistas por una recuperación del medio, como ha sido hasta ahora.

11.2 Experiencias en el manejo integrado.

¿Cómo operar un acuífero sobreexplotado y sometido a uso intensivo? Existen ejemplos de acuíferos que fueron intrusionados y que tras un cambio urgente en la política de operación han logrado restaurar el medio; generalmente la explotación ha estado relacionada en mayor medida con la irrigación (Bear et al., 1998; Panteleit et al, 2002; Tulipano, 2003; Foreman, 2003). Pero también hay otros que utilizados por la agricultura y, en competencia con usuarios urbanos, no han logrado recuperarse pese a programas de manejo y elaboración de estrategias (Gómez et al, 2003; Biondic & Biondic, 2003; Gresta, 2004; Reynolds, 2004; Bocanegra, 2004).

Por otro lado, las técnicas más comunes a que se refieren la mayoría de los autores citados para la restauración de estos medios (Van Dam, 1998; Tulipano, 2003; Foreman, 2003) podrían resumirse en acciones técnicas, jurídicas y administrativas que se deben cubrir para lograr la restauración:

- 1) Utilización de presas de infiltración de agua superficial encauzada a zonas de recarga.
- 2) Construcción de fronteras impermeables de concreto.
- 3) Infiltración de agua residual en zonas de recarga o pozos de inyección.
- 4) Sustitución de agua residual con alto grado de tratamiento por agua superficial importada.
- 5) Sistemas de barreras de pozos de inyección con agua importada.
- 6) Desalinización de agua salobre e inyección en pozos en zona de transición.
- 7) Desarrollo de redes de monitoreo subterráneo.
- 8) Automatización de sistemas de control.
- 9) Desarrollo e implementación de modelos matemáticos para control de la restauración.
- 10) Implementación de esquemas alternativos de gestión.
- 11) Generación de planes integrales de operación.
- 12) Modificaciones a las legislaciones vigentes.

Custodio (1994) define que la gestión atañe al presente con visión de futuro y que la planificación se dirige al futuro con visión del presente, y expone los diversos aspectos que éstas abarcan. Si la planificación implica un diseño, la gestión es la puesta en práctica (Bocanegra, 2004).

En este sentido, la gestión de acuíferos incluye: inventario de usos, conocimiento de la demanda, conocimientos técnicos y científicos, personal suficiente y formado, medios de observación de la cantidad y calidad del agua y de los impactos ambientales, sociales y territoriales de la explotación, marco administrativo legal, medios económicos y realización de campañas de información pública y de formación (Bocanegra, 2004). No existe aún aplicación de las políticas de acción con el criterio de que quien contamina, paga y, además, quien contamina, repara.

Un diagnóstico de los factores que intervinieron en la implementación de políticas de manejo para el acuífero Costa de Hermosillo y por qué su restauración ha sido inaplicable, asume que se debió principalmente a las siguientes causas:

- a) Generalmente en la implementación de medidas no ha existido una cobertura amplia de las acciones; se ha respondido a crisis coyunturales, emergencias o intereses políticos, y en consecuencia el volumen de recarga ha sido rebasado con mucho por el bombeo, y se puede decir que el recurso de agua subterránea en la cuenca del río Sonora hoy ya no es sustentable.
- b) Los costos de abastecimiento son subsidiados y por ello no existe interés por la recuperación del acuífero.
- c) Es insuficiente o está ausente la participación de todos los sectores involucrados.
- d) Existe una Legislación inadecuada (concesión global del acuífero).
- e) Falta de datos sistemáticos e interrupción de estudios del acuífero.
- f) El desarrollo sectorial agrícola está fragmentado, existe alta y baja eficiencia en el uso del agua, predominando dos a uno el segundo.
- g) No existe un enfoque integrado, incluyendo la conservación del ambiente.
- h) La extracción del agua se dio con criterio de "minería del agua".
- i) No hay financiamiento para desarrollar medidas de recuperación; hasta ahora, los ofrecimientos han sido rechazados por contravenir intereses, principalmente del sector agrícola de menor eficiencia (Banco Mundial, 2005).

11.3 Condición histórica de la extracción.

Con el objeto de sustentar la proyección lineal de la extracción, se revisó el escenario histórico y la situación actual de la zona de estudio, que comprende la aquí denominada Cuenca Baja del Río Sonora (CBRS), desde la presa Abelardo Rodríguez

hasta el Mar de Cortés; esta tiene una situación de balance histórico y actual que muestra el desequilibrio entre la extracción y las recargas netas (Tabla 11.1).

Situación Histórica (anual)				Situación Actual (2004)		
Uso	Salidas totales	Retorno	Balance Extracción - Entradas netas	Salidas totales	Retorno	Balance Extracción - Entradas netas
Agrícola Subterránea	797	118	680	797	118	680
Público urbano	78	7	71	78	7	71
Otros usos*	29	3	26	29	3	26
Total de salidas	904	128	777	904	128	777
Recarga natural			410			281
Recarga inducida en cauces			28			28
Total de entradas			438			309
Minado			339			468

*Usos registrados como doméstico, pecuario, múltiple, industrial, agroindustrial.

Tabla 11.1 Situación histórica y actual del balance hidráulico en la zona de estudio.

El significado de los dos escenarios mostrados en la Tabla 11.1 es el siguiente:

a) Escenario histórico. Se apoya en los estudios que fundamentan la publicación de la disponibilidad de agua en los acuíferos de la cuenca baja y consideran su comportamiento promedio en los últimos 30 años.

b) Situación actual. Considera el estado en que se encuentran los acuíferos en la actualidad, con el impacto de la sequía y la reducción de la recarga. Los estudios y modelos del comportamiento geohidrológico realizados por la CNA, con apoyo de la Universidad de Sonora (UNISON, 2000, 2001; CNA, 2002, 2004; OMM, 2005), permiten contar con cifras actualizadas de este comportamiento. En consecuencia, el MINADO refleja un fuerte incremento.

Para el acuífero Costa de Hermosillo, la situación actual aplica en ambos escenarios, teniendo en cuenta que una parte de los flujos de recarga han sido interceptados por aprovechamientos en los acuíferos aguas arriba del sistema valle del río Sonora. Así mismo, algunos aprovechamientos operan con carácter intensivo y permanente, como es el caso del abastecimiento a la ciudad de Hermosillo. Este seguirá creciendo a partir de 2006 con el bombeo de los campos de pozos en Las Malvinas (acuífero río San Miguel) y Los Bagotes (acuífero Costa de Hermosillo). Por ello, debido al abatimiento registrado y a los conos formados con niveles potenciométricos por

debajo del nivel del mar, la OMM (2005) consideró a la intrusión marina desarrollada, como un proceso irreversible.

Estos balances confirman que el proceso de abatimiento de los niveles de bombeo, durante 25 años (1975-2000), de entre uno y dos metros en promedio anual, en los acuíferos de la cuenca, es producto de una explotación en un orden de magnitud que excede, actualmente, casi 3 veces su ritmo de recuperación. Es decir que de cada 3 metros cúbicos que se extrajeron, 2 procedían de la reserva de agua dulce y sólo uno se renovó, en la zona de los acuíferos del valle del río Sonora. Este desequilibrio en la cuenca es más severo que el que caracteriza, en promedio, a los acuíferos sobreexplotados en México, con el agravante de la contaminación con agua de mar (OMM, op cit., 2005).

11.4 Síntesis del diagnóstico actual

El diagnóstico final se resume en afirmar que actualmente las extracciones exceden el volumen de recarga natural promedio; este bombeo fue confirmado a partir del consumo eléctrico en los pozos, superficies de cultivos verificados con imágenes de satélite y láminas de riego medidas (Colegio de Posgraduados, 1999).

Como efecto de lo anterior, existe un incremento creciente de costos de extracción por abatimientos promedio de niveles freáticos (1.01 m anual en Costa de Hermosillo, 0.57 m en Zanjón y 1.97 m en Mesa del Seri-La Victoria). La batería de pozos de la ciudad de Hermosillo, ubicada aproximadamente a 25 km al noreste del acuífero de la Costa de Hermosillo, inicia sus bombeos con niveles estáticos promedio de 120 m en el área de Los Bagotes.

En la franja costera el avance de la intrusión salina representa que de cada 10 litros de agua que entran al acuífero de la Costa de Hermosillo, 4 litros son de agua salada. Esto significa, igualmente, un agotamiento acelerado del volumen económicamente aprovechable en los acuíferos bajo las condiciones prevalecientes de la tecnología y los mercados, es decir que algunos tipos de cultivos dejarían de ser rentables sin subsidio de energía eléctrica.

11.4.1 Principales factores.

Entre los principales factores que no permiten retraer la tendencia de no sustentabilidad actual están (OMM, 2005) (Tabla 11.2):

- a) Rezago tecnológico en la agricultura: sólo el 17% de la superficie cuenta con riego por goteo.
- b) Uso deficiente de la tecnología: las láminas de riego exceden hasta 30% en la vid regada por goteo.

- c) Peso decisivo de cultivos con alta demanda (básicos, alfalfa y otros y forrajes) regados por gravedad:
 Constituyen 54% de la superficie regada.
 Utilizan el 49% del agua de riego agrícola.
 Representan únicamente 9% del valor de la producción.

Tabla 11.2 Rentabilidad negativa de diversos cultivos en el Distrito de Riego 051 Costa de Hermosillo (Fuente: OMM, 2005).

Cultivos	Superficie (ha)	Porcentaje Del total	Volumen (hm ³)	Porcentaje Del total	Ingresos netos (Sin Subsidios)	
					Pesos por hectárea	Total (Miles de \$)
Trigo	16,046	24%	158.25	20%	-6,984	-112,066
Forrajes perennes	419	1%	7.43	1%	-11,272	-4,723
Alfalfa	5,337	8%	111.28	14%	-9,561	-51,027
Garbanzo	7,463	11%	59.48	7%	-4,496	-33,557
Maíz	1,549	2%	22.04	3%	-7,631	-11,820
Otros básicos	4,434	7%	37.16	5%	-1,213	-5,379
SUMAS	35,248	54%	395.65	49%	-7,431	-218,571

El valor de las cosechas obtenidas es inferior a los costos reales de producción en \$218.6 millones (pérdidas reales)

Los programas de subsidios estimulan un padrón de cultivos inadecuado al valor estratégico del agua, dando como resultado cultivos con rentabilidad negativa por m³. La Tabla 11.2 muestra los cultivos que ejemplifican esta rentabilidad negativa, la cual fue obtenida utilizando el ciclo agrícola 2001-2002, cuando este grupo de cultivos ocupó 35 mil hectáreas (75 % del área) y empleó 396 hm³, lo que equivale a 2.5 veces la recarga natural calculada de agua dulce del acuífero de la Costa de Hermosillo.

Además de la rentabilidad negativa de los cultivos por m³, este grupo utilizó un total de 243 millones de kwh, que recibió un subsidio de \$231 millones de pesos. Otros apoyos fueron de PROCAMPO y a la comercialización, que sumaron \$77 millones. En total, \$307 millones.

Tabla 11.3 Subsidios recibidos por agricultores de la Costa de Hermosillo (OMM, 2005).

Cultivos	PROCAMPO	Apoyos a Comercialización	CFE Tarifa 09	Totales
Trigo	13,414	48,282	93,300	154,996
Alfalfa			65,608	65,608
Forrajes			12,057	12,057
Garbanzo	6,187		35,069	41,255
Maíz	1,627	3,408	12,999	18,034
Otros básicos	3,676		11,752	15,427
SUMAS	24,904	51,690	230,784	307,378

Los apoyos otorgados a este grupo de cultivos arroja \$1,431 por cada uno de los 197 mil jornales generados, sin embargo el trabajador sólo percibe \$100/jornal. Queda de relieve la asignación ineficiente de los recursos naturales y financieros. No es extraño, ni malo, que la agricultura reciba subvenciones; en la mayoría de los países con políticas occidentales se otorgan. Una política agrícola se vuelve ineficiente no solamente por su mala asignación o reparto final, sino por su escasa consideración a la sustentabilidad del recurso natural, sobre todo en un ambiente de desierto, donde el agua es un recurso limitado y cuyo carácter climatológico es marcadamente aleatorio en la cuenca del río Sonora.

Por lo anterior, un análisis de los permisos de siembra concedidos en el distrito de desarrollo rural (DDR-144), donde está incluida la costa de Hermosillo, para el ciclo 2003/2004, permite conocer quiénes y cuántos son los usuarios que producen básicos y forrajes: únicamente 46 personas físicas y/o morales concentraron en 26 mil de las 40 mil hectáreas el cultivo de básicos y extrajeron un volumen superior a 200 hm³.

Otra forma de ver esta concentración de actividad y cultivos muestra que en la Costa de Hermosillo, 212 productores acaparan la producción en 30 mil has., y de éstos, 40 operaron 24 mil has. Es decir, existen 470 pozos, pero no cuatrocientos setenta concesionarios.

En el acuífero del río Zanjón, la estructura no dista mucho del panorama anterior. Seis productores concentraron en el mismo período 2,100 has. de las 2,900 has. con permisos.

Los esfuerzos por lograr la sustentabilidad de los acuíferos y terminar con el exceso de extracciones se han centrado en el programa PADUA. Este acuerdo de voluntades implica que se otorgarían apoyos a quienes renuncien a sus derechos de uso de agua; esta es una de las más recientes propuestas de diferentes organismos internacionales y que se ha pretendido encauzar a través del gobierno federal mexicano. Los objetivos son:

- a) Otorgar apoyos públicos a quienes renuncien a sus derechos para que tengan una fuente de ingresos permanente y sin costo ambiental. En otras palabras, pagar a productores de baja eficiencia y altas carencias económicas para que dejen de bombear el agua subterránea del acuífero. Un programa similar ha sido arrancado con éxito en el distrito de riego de Caborca.
- b) Otorgar apoyos complementarios para reconvertir y tecnificar una superficie que baste para mantener el nivel de empleo y generar beneficios económicos reales. Esta acción beneficiaría a quienes se mantienen principalmente en el mercado de cultivos de exportación y alto rendimiento económico. No reconvertir esta región agrícola significará continuar exportando agua subsidiada a un país rico. Con este programa se ha estimado que podría reducirse en cerca de 400 hm³ la extracción de los acuíferos de la costa y el valle. Pero además implica un control

que estaría bajo un Comité Técnico Local que implementaría medidas de seguridad tales como:

- a) Reglamento
- b) Ajuste en el suministro de extracciones
- c) Sistema de monitoreo

¿Qué falta para trabajar con este programa e iniciar la restauración? Un acuerdo de voluntades y autoridad para imponerlo. Mientras tanto, el frente de intrusión continúa avanzando 650 m/año y disminuyendo el almacenamiento en 850 hm³/año en la cuenca del río Sonora.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El acuífero de la Costa de Hermosillo, ha sufrido un grave deterioro ambiental producto del bombeo intensivo al que ha sido sometido desde los años 50's. Restaurar una unidad hidrogeológica es, en cualquier país, una tarea de grandes costos y mucho tiempo. En el nuestro solamente tenemos el segundo. Pero se está perdiendo en forma inevitable.

La morfología del subsuelo de la región costera del estado de Sonora, fue conocida a partir de este trabajo, con ello, la fragilidad que presentan los acuíferos costeros ante el bombeo intensivo. La morfología está compuesta por una serie de fosas tectónicas sedimentarias formadas por bloques caídos, cuyo basamento cristalino regional está constituido por intrusivos de composición granítica de rocas antiguas, cubiertos en discordancia, por rocas post-batolíticas y depósitos recientes. Los materiales de relleno de las fosas constituyen un acuífero multicapa, en el que existen semiconfinamientos, pero en su conjunto trabaja como acuífero libre. Las fosas igualmente representan canales de alta permeabilidad que facilitan el proceso de intrusión marina hacia el continente. Los datos gravimétricos existentes, muestran que la profundidad al basamento cristalino alcanza profundidades superiores a los 1500 metros, pero de ellos solamente 200 forman el acuífero. La Transmisividad media de este acuífero es de $4.5 \cdot 10^{-2}$ m²/s y si se considera un espesor medio de 200 metros, la permeabilidad media es de $2.25 \cdot 10^{-4}$, con gradiente medio del orden de 0.0025, una velocidad de Darcy de $5.625 \cdot 10^{-7}$ m/s y rendimiento específico (Sy), coeficiente de almacenamiento para acuíferos libres de 0.13.

La evaluación de la recarga total al acuífero es de 150 hm³/año, con una extracción tres veces superior, por tal motivo el desequilibrio se cubrió con la intrusión marina estimada en 98 hm³. La intrusión de agua salina ha penetrado gran parte del acuífero, por el noroeste (Estero de Kino) en hasta 3 km y por el sur del área de estudio en más de 30 km (Punta Baja). Esta intrusión, no ha respondido a la reducción del bombeo y avanza a una tasa de 650 m al año, atraída hacia el centro del acuífero. Ello sugiere que de continuar con las condiciones actuales, la intrusión marina continuará mezclándose y degradando la calidad del agua de dulce del acuífero, en la zona de interfase varía entre 2,500 y hasta 40,000 μ S/cm en términos de conductividad eléctrica.

El agua bombeada de este acuífero muestra ausencia de recarga moderna. Los deltas de isótopos estables tienen una amplia dispersión de valores en todos los casos, lo que permite identificar diferentes orígenes. Para el acuífero de la Costa de Hermosillo, los valores δD del agua subterránea, muestran un alto sesgo con la máxima frecuencia cercana al valor promedio de $\delta D = -45.17\text{‰}$, con lo que se aprecia homogeneidad isotópica de una sola familia de agua, lo que soporta la no existencia de dos diferentes acuíferos. Para el agua relacionada con el cauce moderno del Río Sonora, los valores delta de Deuterio tienen una media de $\delta D = -34.12\text{‰}$. índice de frecuencia que incluye

valores cercanos para el agua que tiene origen en la recarga por precipitación local y su mezcla con regímenes de flujos semiregionales y el retorno de riego. Ello permite independizar orígenes y diferenciar que el agua del acuífero Costa de Hermosillo es pre moderna y el agua subterránea de los acuíferos del valle del río Sonora es moderna. Lo que en conclusión es de mayor impacto ambiental por los tiempos que toma su recuperación.

El almacenamiento del acuífero ha sido disminuido en el orden de 65%, se ha creado en el subsuelo no solamente un gran vacío de 45 km de diámetro, cuyo punto más profundo se encuentra 65 m bajo el nivel del mar, sino que esta condición ha generado preocupación en quienes desean un manejo sustentable del agua subterránea, e incertidumbre respecto al futuro del acuífero.

Adicionalmente, los acuíferos del valle del río Sonora, que fueron considerados siempre por diversos autores, como zonas potenciales de entrada de flujo subterráneo hacia el sistema acuífero de la Costa de Hermosillo, hoy se encuentran sobre bombeados, soportando el crecimiento urbano y agrícola de la región. Ante este panorama, la solución, si es posible llamarle así, se plantea como una recomposición de su estatus administrativo, el cual se apoya en los resultados de este trabajo. Los nuevos límites deben alcanzar un esquema de sustentabilidad y reiniciar con un nuevo régimen de bombeo, considerando que el almacenamiento minado, es un acuífero de baja disponibilidad que debe prolongar su futuro.

Los resultados obtenidos en este estudio, permiten concluir para el acuífero en estudio, que en el futuro no se debe ampliar el desarrollo de baterías de pozos en las zonas acuíferas descritas, sin antes llevar a cabo estudios de evaluación hidrogeológica. Puesto que las zonas se han independizado hidrodinámicamente al perder la entrada de recarga de flujo de reciente infiltración. El sistema dejó de funcionar como una serie de "cubetas" (fosas) en las que en condiciones iniciales el flujo saturaba la primera y circulaba a las subsecuentes. Actualmente, la intercepción con sobre bombeo de las primeras (Zanjón, Mesa del Seri-La Victoria), que se encuentran a la entrada del sistema Costa de Hermosillo, originó la pérdida de recarga y con ello el descenso de niveles en las subsecuentes (Calle Cero, Siete Cerros), hasta hacer más agudo el abatimiento en la última "cubeta" que es el acuífero de la Costa de Hermosillo.

Es por lo tanto conveniente realizar estudios para llevar a cabo recarga artificial y/o almacenamiento de acuíferos, dada la cada vez más baja potencialidad acuífera de la región. Se sugiere la conveniencia de estudiar las calizas de los alrededores de Hermosillo, donde podría ser utilizada su carsticidad para almacenar y/o recargar el sistema acuífero. Esto ayudaría a evitar la pérdida de agua por evaporación en la Presa Abelardo Rodríguez por estar expuesta a la intemperie. Como sucedió en los años 1997 con 98 hm³ y en 2001-2002 con pérdidas del orden de 50 hm³.

La aplicación de un Índice de Equilibrio como propuesta metodológica, genera buenos resultados de manejo. Obtiene como recomendable extraer un volumen menor a $163 \text{ hm}^3/\text{año}$, para regresar al equilibrio el acuífero Costa de Hermosillo y no seguir abatiendo los niveles piezométricos que permiten el avance de la intrusión. La segunda parte de esta propuesta, es un Índice de Disponibilidad y Uso Sustentable (IDUS), que considera la condición histórica y actual, así como el resultado del modelo de simulación de flujo subterráneo a 5 años, se aplicó bajo diferentes escenarios de extracción y recarga futura. La disminución más favorable considera bajar el bombeo al volumen del índice de equilibrio = cero. Con este índice el IDUS resuelve que tomaría 50 años alcanzar la menor tasa de entrada de agua por intrusión marina, con $60.5 \text{ hm}^3/\text{año}$ y 20 años si se inyecta recarga artificial adicional de $150 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Sin embargo, llevar a cero el índice de equilibrio en el acuífero, precisa de un gran esfuerzo de parte de los usuarios en el manejo de volúmenes de extracción, modernizar al máximo sus sistemas de riego e inyectar una recarga artificial adicional para poder revertir el fenómeno. Será necesario determinar el volumen de agua dulce necesario para propósitos ambientales de la recuperación de la zona de interfase.

Por lo anterior, en la solución de la restauración del acuífero, los agricultores de la costa de Hermosillo son la clave, pero es necesario realizar primero estudios que evalúen los costos que implica la recuperación ambiental, con una participación multipartita efectiva, con todos los usuarios comprometidos y el gobierno federal financiando con apoyos directos e indirectos la reconversión de los cultivos, modernización de los sistemas de riego, aplicación de las tasas efectivas de agua a los cultivos y evitando así las pérdidas actuales, reducir los caudales de bombeo utilizando modelación que permita aplicar en sitios adecuados las propuestas y verificar sus resultados. Para ello, se requiere determinar el financiamiento que tendría que ser entregado a los agricultores para mantener sus utilidades constantes y conocer igualmente con un estudio de valoración contingente su disposición a aceptar. Como resultado se podrá conocer con cuanto y cuando estarían dispuestos los agricultores a modificar paulatinamente sus condiciones actuales de bombeo.

Es necesario buscar el equilibrio y sustentabilidad integral en los acuíferos de la región, con base en el análisis de la alternancia de los ciclos cortos, medios y largos de precipitación y sequía que se han observado en la cuenca del río Sonora al menos en los últimos 50 años. Comprender que el fenómeno natural de la sequía para la cuenca es temporal y localizado, contra la condición de desierto que en la escala del hombre es permanente, y por ello el reuso del recurso es inaplazable en la región.

Finalmente, de las autoridades, se requiere decisión política, fuertes presupuestos y un compromiso multianual. Este proceso requerirá del trabajo de varias generaciones, las actuales deberán ocuparse sin que noten que se retrae el frente de intrusión durante varias decenas de años.

13. Referencias bibliográficas

- Abdulghaffar S. Bazuhair; Warren; W. Wood. 1995. Chloride mass-balance method for estimating ground water recharge in arid areas: examples from western Saudi Arabia. Elsevier.
- Anderson, M. P., & W. Woessner. 1992. Applied groundwater modeling – Simulation of flow and advective transport. San Diego: Academic Press.
- Andrews R.W. 1981. Salt–Water Intrusion in the Costa de Hermosillo, Mexico: A Numerical Analysis of Water Management Proposal. Groundwater. Vol. 19 No. 6. November-December. U.S.A. 635-647.
- Andrews W.R., 1982. Salt-Water intrusion in the Costa de Hermosillo, México: A numerical Analysis of water Manager Proposals. Groundwater. Vol. 19. No. 6. Ph D. dissertation. Univ. Of Illinois, Urbana. Ill. U.S.A.
- Angelier, J., B. Colletta, J. Chorowicz, L. Ortlieb, & C. Rangin, 1981. Fault tectonics of the Baja California Peninsula and the opening of the Sea of Cortez, Mexico. J. Struct. Geol. 3(4); 347-57.
- Ariel Construcciones, S.A., 1968. Estudio geohidrológico completo de los acuíferos de la Costa de Hermosillo, Son. (para la dirección de Aguas Subterráneas, SRH).
- APHA (American Public Health Association), 1995. Standard Methods for the examination of water and wastewater, 19th ed., New York, 769 pp.
- AquaChem v. 3.7 for Windows 95/98 NT, 1999. Aqueous Geochemical data, Análisis, Plotting and Modeling. Waterloo Hydrogeologic, Software User's Manual and Program.
- Ariel Construcciones, S.A., 1967. Estudio geohidrológico preliminar de los acuíferos de la Costa de Hermosillo, Son. (para la dirección de Aguas Subterráneas, SRH).
- Ariel Construcciones, S.A. de C.V., 1968. Estudio hidrogeológico completo de los acuíferos de la Costa de Hermosillo, Sonora, Mex., Secretaria de Recursos Hidráulicos, Informe inédito, 220 p.
- Ariel Consultores, S.A. 1996. Estudio del manejo de la demanda para la estabilización y recuperación de los acuíferos de Hermosillo, Son. y Querétaro, Qro.—Costa de Hermosillo, Son. Comis. Nal. Agua, Subdir. Gral. Téc., Ger. Aguas Subterráneas, Contrato GAS-010-PRO-96, 134 pp. + anexos.
- Arreguín, G., Figueroa, J. and Peña, S. (Ariel Construcciones, S.A. de C.V.) 1968. Estudio hidrogeológico completo de los acuíferos de la Costa de Hermosillo, Sonora, Mex., México, D.F., Secretaria de Recursos Hidráulicos, Informe inédito, 220 pp.
- Arreguín, J. (1998) Aportes a la historia de la geohidrología en México, CIESAS 1998. Citando los trabajos de Paul Waitz publicados en la Revista Irrigación en México, entre 1930 y 1943, p. 35-37.
- Astier J.L., 1882. Geofísica aplicada a la Hidrogeología. Editorial Paraninfo. Madrid, España. 343 p.

- Atwater, T., 1970. Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America. *GSA Bull.* 81 (12); 3,513-36.
- Aunay, B., Duvail, C. Le Strat, P., Dörfliger, N., Lachassagne, P., and Pistre, S., 2004, Importance of a high resolution lithological and geometrical knowledge for mediterranean coastal sedimentary aquifers management, application to the roussillon basin, south of France. 18 SWIM, Cartagena 2004, Spain. (ed Araguas, Custodio and Manzano) IGME. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas No. 15. , pp 259-271, Madrid, España
- Barrocu, G., 2003, Seawater intrusion in the coastal aquifers in Italy, Instituto Geológico y Minero de España, Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas No. 8. , pp 207-224, Tomo II, Madrid, España
- Bear, J. A.H.-D. Cheng, S. Sorek, D. Ouazar and I. Herrera, 1999, Sea Water Intrusion in coastal aquifers- Concepts, Methods and Practices. Kluwer Academic publishers, USA
- Bedinger, M.S., K.A. Sargent, W.H. Langer, F.B. Sherman, J.E. Reed, & B.T. Brady, 1989. "Studies of geology and hydrology in the Basin and Range province, southwestern United States, for isolation of high-level radioactive waste—Basis of characterization and evaluation". USGS Prof. Pap. 1370-A; A1-A41.
- Benton y Asesores S.C, 1998, Estudio Geohidrológico para establecer zonas acuíferas de reservas para el abastecimiento de agua potable en la Ciudad de Hermosillo, Sonora.
- Biondic, B. And R. Biondic, 2003. State of seawater intrusion of the croatian coast. Instituto Geológico y Minero de España, Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas No. 8. , pp 225-238, Tomo II, Madrid, España
- Bocanegra, E. 2004. Explotación de acuíferos costeros en América Latina, Memoria de Proceedings, Editado en CD por la AIH Grupo Peruano.
- Bull, W., 1992. Types of climates according with the precipitation volumes. En Tarbuck, E.J. y Lutgens, F.K. (1999). *Ciencias de la Tierra*. Prentice Hall.
- Brooks, N.K. et al., 1991, *Hydrology and the Management of Watersheds*. Iowa State University Press. U.S.A.
- Calmus, T., 1990, La frontera entre las placas norte-america y caribe: estructuras principales y evolución cenozoica. *Boletín del Dpto. de Geol.* Vol. 3, No. 1 Abril 1986. Universidad de Sonora.
- Casares, S. R., 2005, Implicaciones ambientales en la zona de descarga del acuífero de Yucatán debidas a las actividades humanas. Libro de Resúmenes, V Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Hermosillo, Son., Oct., 2005.
- Castro G.J.A., 1998. Modelo numérico de intrusión salina en la Costa de Hermosillo, sonora., con base en estudios geofísicos. Tesis de maestría. Instituto de Geofísica. UNAM. México. 95 p.
- Castillo, G. J., 1980. Evaluación de la Recarga Vertical en un modelo matemático en el acuífero del Valle del Yaqui. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.

- Castillo G.J., M.A. Ríos, R.A. Gutiérrez, 2004. La sobreexplotación de los acuíferos en Sonora. Memorias del III Seminario sobre Acuíferos Costeros de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.
- CEA, 2004 Programa Estatal de mediano plazo. Aprovechamiento sustentable 2004-2009. Gob. Del estado de Sonora, Comisión Estatal del Agua..
- Chavez G. R., 1986. Geohidrología. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- Cherkinsky, A., 2002, Comunicación personal, Geochron Lab. Inc. Mass. EUA
- CIGSA, 1999, Estudio Geofísico para la Caracterización de la Intrusión Salina en la Costa de Hermosillo. Informe inédito, realizado para el Dpto. de Geología de la Universidad de Sonora.
- Colegio de Postgraduados, 1999. Estudio para la estimación de volúmenes de agua subterránea extraídos para uso agrícola en las zonas de: Costa de Hermosillo, Sonora y Janos Chihuahua, aplicando técnicas de percepción remota. Instituto de Recursos Naturales. Especialidad de Hidrociencias. Montecillos, Estado de México. México.
- Colletta, B., & J. Angelier, 1983. Tectonique cassante dur nord-ouest mexicain et ouverture du Golfe de Californie. Bull. Centr. Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine, 7(1); 433-41.
- Consultores, S.A. 1981. Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona de Hermosillo, Son. (para la Subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas).
- Comisión Estatal del Agua, 2004, Elementos para una política estatal del Agua. Ponencia en Memorias del Tercer Foro del Agua, Universidad de Sonora, Abril, 2004.
- Comisión Nacional del Agua, 1989-1995. Estudio geohidrológico preliminar de los acuíferos de la Costa de Hermosillo, Son. (para la dirección de Aguas Subterráneas, SRH).
- Comisión Nacional del Agua. 1995. Programa Estatal Hidráulico. Gerencia Estatal en Sonora.. Hermosillo, Sonora. México.
- Comisión Nacional del Agua, 1997. Pozos de observación localizados en el acuífero de la Costa de Hermosillo, Sonora. Gerencia Regional Noroeste, Informe Interno, junio, 1997.
- Comisión Nacional del Agua, 1998. Muestreo de Aguas Subterráneas, con énfasis en el Análisis de compuestos Orgánicos Volátiles y Metales Traza. México, D.F.
- Comisión Nacional del Agua, 1999. Guía de Muestreo de Aguas Subterráneas y el Manual de Equipamiento de Pozos de Monitoreo. México, D.F.
- Comisión Nacional del Agua, 1999^a, Disponibilidad de Agua en la Región Noroeste Documentos de la presentación al Sector Industrial de Nogales, Son. Gerencia Regional Noroeste.
- Comisión Nacional del Agua, 2000. Pozos de estudio perforados por la Dirección de Aguas Subterráneas en el periodo 1967-1969 en el acuífero de la Costa de Hermosillo, Sonora. Recopilación Gerencia Regional Noroeste, Febrero, 2000.

- Comisión Nacional del Agua, 2002, Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Costa de Hermosillo, Estado de Sonora. Gerencia de Aguas Subterráneas, México, D.F.
- CNA, 2004a. Disponibilidad media para 2004-2025. Proyecciones de la Subdirección General Técnica, Comisión Nacional del Agua.
- CNA, 2004b. Reporte Mensual mes de Diciembre, Hidrometría de las Presas de la Región Noroeste, Gerencia Regional, Comisión Nacional del Agua.
- CNA, 2004c. Disponibilidad de agua en la Región Noroeste. Comisión Nacional del Agua, Presentación de oportunidades y retos al sector Industrial de Sonora, Nogales, Sonora, 2004.
- Colletta, B., et Angelier, J., Chorowicz, J., Ortlieb, L. et Rangin, C., 1981, Fracturation et évolution néotectonique de la péninsule de Basse Californie (Mexique). C.R. Acad. Sci. Paris, t 292, Serie II, p. 1043-1048.
- Craig, H., 1957. Isotopic Standards for Carbon and Oxygen and Correction Factors for Mass-Spectrometric Analysis of Carbon Dioxide; *Geochem. Et Cosmochem. Acta*, vol. 12.
- Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science* vol. 133, pp. 1072-1073.
- Craig, H., Gordon, L.I., Horbe, Y., 1963. Isotope exchange effects in the evaporation of water. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 68, No. 17, pp 5079-5087.
- Cruickshank, C., and R. Chavez-Guillen. 1969. Modelo matemático "DAS" para el estudio del comportamiento de acuíferos. *Ingen. Hidráulica en Mex.* V. 23.no. 1, pp 31-42.
- Cuevas Quintana Felisa, 1997. Calidad del Agua de Bombeo en el Distrito de Riego 051 Costa de Hermosillo, Sonora., Tesis. UACH.
- Custodio, E.; Llamas, M.R. 1976 *Hidrología Subterránea*, Ediciones Omega, Barceloa, España.
- Custodio, E. (1994) Gestión y protección de acuíferos. En *Temas actuales de Hidrología Subterránea*, Bocanegra y Rapaccini Eds. UNMDP-CFI., 225-244.
- Custodio, E. G. (1997) Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. *Asoc. Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Español, Textos del Seminario de Las Palmas, Gran Canaria, Enero, IGME,1997.* pp 19-39.
- Custodio, E. G. (1997) Salinidad de la Recarga: Problemática, evaluación y efectos diferidos. *Asoc. Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Español, Textos del Seminario de Las Palmas, Gran Canaria, Enero, IGME,1997.* pp 181-208.
- Custodio, E. G. Y Fc. J. Alcalá G.(2003) El potencial de la relación rCl/rBr como indicador del origen de la salinidad de los acuíferos costeros españoles. *Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas No. 8, Tomo 1.* pp 401-412.

- Chaulot-Talmon, 1984, en Monreal S, R., Morales M. M., Rangel M., M., Castillo G. J., 2002, *Evaluación de la recarga al acuífero Costa de Hermosillo, Son.*, Informe inédito para la Com. Nal. Del Agua (CNA) Hermosillo, Son.
- Dansgaard, W., 1964. Stable Isotopes in precipitation. *Tellus*, 16: 436-468.
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., 1969a, A flow model and a time scale for the ice core from Camp Century, Greenland, *J. Glaciol.* 8, 215p.
- Davies, R. De Wiest, 1971. *Hidrogeología*, Ediciones Ariel, Barcelona.
- Deines, P. Langmuir, D., Harmon, R.S., 1975. Stable carbon isotopes to indicate the presence or absence of a gas phase in the evolution of carbonate groundwater, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38 (1975) 1147-64.
- De Cserna, Z., (1989), An outline of the geology of Mexico, in Bally, A.W. and Palmer, A.R., eds., *The geology of North America*, an overview: Boulder Colorado, Geol. Soc. of Am., *The geology of North America*, V.A., p233-264.
- Delpretti, P., 1987, Contribution a l'étude de la Sierra Madre Occidental, Mexique: la séquence volcanique tertiari de la transversale Tepoca-Yepachic, Université de Droit, d'économie et des Sciences d'aix-Marseille, These, pp.342.
- Diario Oficial de la Federación, DOF (1980) Ley de Aguas Nacionales, Título Primero, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Gobierno Federal, México, D.F.
- Diario Oficial de la Federación, DOF (2002) Ley de Aguas Nacionales, Título Cuarto, Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, Gobierno Federal, México, D.F.
- Domenico, P. A., F.J. Tapia García, and L. Uribe. 1974. Alternative policies for water management in the Costa de Hermosillo. Unpublished study conducted for Plan Nacional Hidráulico under auspices of the World Bank .Domenico, P.A. and F.W. Schwartz, 1990 *Physical and Chemical Hydrogeology*; New York; Wiley.
- Domenico A., P. & Schwartz W., F (1998) *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley and sons, Inc.
- Dohrenwend, C.J., 1987, Basin and Range, *Geomorphic Systems of North America*, Centennial Special, V.A. Menlo Park, Cal., USA, p.303
- Dourejeani, A. y Jouravlev, Andrei, 2003, Evolución de políticas hídricas en América Latina y el Caribe. División de Recursos Naturales e Infraestructura, Serie No. 51, CEPAL, ECLAC, Naciones Unidas, Santiago de Chile.
- Drever, I.J. (1997) *The Geochemistry of Natural Waters, Surface and groundwater Environments*, University of Wyoming, Prentice Hall, U.S.A.
- Driscoll F.G. 1987. *Groundwater and Wells*. Johnson Division. Saint Paul Minnesota. U.S.A.
- Durfor, C.N., and Becker, 1964. Public water supplies of the 100 largest cities in the United States, 1962; U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 1812, 364 p.

- Edmunds W. M.; C. B. Gaye. 1993. Estimating the spatial variability of groundwater recharge in the sahel using chloride. Elsevier.
- Epstein, S., Mayeda, T. (1953) Variation of O-18 content of waters from natural sources, *Geochim. Cosmochim. Acta* 4, 213.
- Eriksson Erik, Vachi Khunakasem, 1969, Chloride concentration in groundwater recharge rate and rate of deposition of chloride in the Israel costal plain. *Journal of Hydrology* 7 (1969) 178-197; North publishing Co. Amsterdam.
- Espinoza V.A., 1998. Investigación y análisis piezométricos del acuífero La Victoria y Mesa del Seri, Sonora. COAPAES: Hermosillo, Sonora, México.
- Estudios Geotécnicos, S.A., 1977. "Sondeos geofísicos en zonas de relocalización de la Costa de Hermosillo, Sonora". S.A.R.H.
- Exploraciones del Subsuelo S. A., 1971. Informe del levantamiento gravimétrico e interpretación cuantitativa del mismo. Costa de Hermosillo, Sonora. Informe inédito para la Secretaría de Recursos Hidráulicos. México. 19 p. y anexos.
- FAO. ONU. 1981. Contaminación del Agua Subterránea, tecnología, economía y gestión. Roma.
- Fernández-Aguirre M.A., Monreal R., y Grijalva-Haro A.S., 1993. Carta Geologica Sonora, 1:500, 000: Dirección General de Fomento Minero y Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora (Mapa).
- Fernández, A.J., & D.L. Rudolf, 2001. "The influence of Cenozoic tectonics on the groundwater-production capacity of fractured zones: A case study in Sao Paulo, Brazil". *Hydrogeol. J.*, 9(2); 151-167.
- Fetter, C.W. 2001, *Applied Hydrogeology*, Fourth Edition. Prentice Hall, USA.
- Fimbres, S., F. (1999) Reglamentación de sistemas de riego por bombeo. IX Congreso Nacional de Irrigación, Culiacán, Sin.27-29 de Octubre. Artículo NEI—S69908, p 56-58.
- Fletcher y Hallet, 1983 en Monreal S, R., Morales M. M., Rangel M., M., Castillo G. J., 2002, Evaluación de la recarga al acuífero Costa de Hermosillo, Son., Informe inédito para la Com. Nal. Del Agua (CNA) Hermosillo, Son.
- Flores-Márquez, E.L., J.O. Campos-Enríquez, R.E. Chávez-Segura and J.A. Castro-García., 1998, Saltwater intrusion of the Costa de Hermosillo aquifer, Sonora, México: a numerical silulation, *Geofísica Internacional*, vol. 37, núm. 3, p. 133-151.
- Fogg G.E., E.S. Simpson, Sh. O. Neuman, 1979. Aquifer modeling by numerical methods applied to an arizona groundwater basin .Technical reports on natural resource systems. The University of Arizona. Technical report no.32. Tucson, Az. U.S.A.
- Forkasiewicz J. 1972. Interpretation des donnés de pompages d'essai pour lévaluation des paramètres des aquifères. Bureau des Recherches Géologiques et Minières. 72sgn273Ame. Orleans. Francia.
- Foreman, T., L. (2003) Management of seawater intrusion in the Los Angeles coastal basin, California: an evolution of practice. Instituto Geológico y

- Minero de España, Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas No. 8. , p 137-148, Tomo II, Madrid, España
- Freeze, R.A.; Cherry, J. (1979) Groundwater, Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, US.A.
- Friedman, I., 1953. Deuterium content of natural waters and others substances; *Geochem. And Cosmochem. Acta*, vol. 12, 1957.
- Gaona, V.S., Aceves, H.J., Cuervo, M.L., Durazo, J., Ferrat, P.P., 1976. Determinación de las causas del incremento de la salinidad en el acuífero del Valle de Mexicali, B.C. IFUNAM, Cd. Universitaria, México, D.F.
- Gastil, R.G., & D. Krummenacher, 1977. Reconnaissance geology of coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahía Kino. *GSA Bull.* 88(2); 189-98.
- Gastil, G., D. Krummenacher, & J. Minch, 1979. The record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California. *GSA Bull.* 90(9); 839-57.
- Gastil, G., Miller, R., Anderson, P., Crocker, J., Campbell, M., Buch, P., Lothringer, C., Englehardt, P.L., y Roldan, Q., J., 1991, The relation between the Paleozoic strata on opposite sides of the Gulf of California, in Perez -Segura, E., and Jacques-Ayala, C. eds., *Studies of Sonoran geology : Geological Society of America Special Paper 254*.
- Gat, R.J., 1975. Comments on the stable isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea Area, *Water Resour.* 7: 980-993.
- Gates J.S., 1972. Worth of data used in digital-computer model of groundwater basins. Technical Report No. 8. The University of Arizona. U.S.A.
- George, R.J., 1992, *Hydrogeology Journal*. Vol. 1 Issue 1.
- Gonfiantini, R. Gratsiu, S. and Tongiorgi, E. 1965. Oxygen isotopic composition of water in leaves. In : *Isotopes and radiation in soil-Plant nutrition studies*. IAEA, Vienna p. 405.
- Gonfiantini, R., 1971. Notes on Isotope Hydrology. Internal Publication. Isotope Hydrology section, IAEA, Vienna, Austria.
- Gomez, J.D. 2003, The state of seawater intrusion in Spain. *Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, pp 169-186
- Gómez, P., M., 1971. Sobre la presencia de estratos marinos del Mioceno en el Estado de Sonora, México. *Revista del Instituto Mexicano del Petróleo*, Vol. III, Núm. 4, p. 77-78.
- González, H. R., 2005. Evidencia de autodepuración en el acuífero yucateco, Libro de Resúmenes, V Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Hermosillo, Son., Oct., 2005.
- Graf, W.L., 1987. "Regional geomorphology of North America"; In: W.L. Graf, ed., *Geomorphic Systems of North America*. Geol. Soc. Am. Centen. Spec Vol. 2, The GSA, Inc., Boulder, Colorado, p. 1-3.
- Grael, C. E., Carrillo, C. M.A., Coronado, P. V., Estudio hidrogeológico de la zona nororiental del estado de Yucatán. Libro de Resúmenes, V Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Hermosillo, Son., Oct., 2005.

- Gresta, D (2004) Efectividad de la recarga inducida del acuífero del valle del río Chillon con fines de aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas. Primer Congreso Peruano de Hidrogeología, Memoria de Proceedings, Editado en CD por la AIH Grupo Peruano.
- Grijalva, J., y Rangel, M., 1989 Prefactibilidad de sitios para presa en la Cuenca Media del Río Yaqui, Memoria de Estudios Geológicos del Río Yaqui, Residencia de Estudios Son.Sin y B.C., Comisión Federal de Electricidad, pp. 139.
- Gustafson, P., 1994. Spot satellite data for exploration of fractured aquifers in a semi-arid area in southeastern Bostwana. *Appl Hydrogeol.* 2(2); 9-18.
- Guzmán B., A.E., (1980). Geología cenozoica del noroeste de Sonora, incluyendo su mar patrimonial. Petroleos Mexicanos, Superintendencia General de Distritos de Exploración, Zona Noreste, Manuscrito inédito, 29 pp.
- GYMSA, 1990, Determinación del Potencial de Explotación del Acuífero La Victoria como fuente de abastecimiento a la Cd. de Hermosillo.
- Helenes, J., & A.L. Carreno, 1999. Neogene sedimentary evolution of Baja California in relation to regional tectonics. *J. South Am. Earth Sci.* 12; 589-60.
- Hem, J., 1970. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water, 2nd ed., U.S. Geological Survey Water Supply, Paper 1473. United States Gov. Washington, D.C.
- Hernández, C. G. (2003) Modelo hidrogeofísico de la porción Noreste del acuífero costero ubicada entre Hermosillo y Siete Cerros, Sonora. Tesis profesional presentada para obtener el título de la licenciatura en geología, Universidad de Sonora.
- Hoefs, J., 1973. Stable Isotope Geochemistry, Springer Verlag. Marín, S. L., Steinich, B., Velázquez, O.G. Simón, V.I., González, R., IGFUNAM (1996) Caracterización Geoquímica de los sistemas de flujo del valle de Hermosillo, Sonora. Cd. Universitaria, México, D.F.
- Huntoon, 1977 en Fetter, C.,W., *Applied Hydrogeology*, Prentice Hall, 5th Ed., 2001.
- IFUNAM, 1976 Determinación de las causas del incremento de la salinidad en el acuífero del Valle de Mexicali, B.C.. Laboratorio de espectrometría de masas, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, Nov. 1976. Reporte inédito para la Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- IMADES, 1998, Carta de Suelos del Estado de Sonora, Instituto del Medio Ambiente del Estado de Sonora, Gobierno del Estado, Hermosillo, Son.
- INEGI, 1984, Carta geológica 1:250,000 Ciudad Obregón G12-3. Secretaría de Programación y Presupuesto, México, D.F.
- INEGI, 1993, Estudio hidrológico del Estado de Sonora. Gobierno del Estado de Sonora, & INEGI, Aguascalientes, Ags., 186 pp.
- Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, 1976, Complemento del programa para establecer los medios de detección y control del avance de intrusión salina de la Costa de Hermosillo, Sonora. SARH.

- Instituto Nacional de Estadística Geografía E Informática INEGI, 1981. ed. 1993. Estudio Hidrológico del Estado de Sonora, pp 185.
- Johnson E.E.. 1966. El agua subterránea y los pozos. Johnson Division. Saint Paul Minnesota. U.S.A:
- Ketchum Jr. J. Neil, et al., 2000. Recharge characteristics of a phreatic aquifer as determined by storage accumulation. *Hydrogeology Journal* (2000)
- Kruseman G. P. 1975. Análisis y Evaluación de los datos de ensayos por bombeo. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen. Holanda.
- Jiménez, A. (1965) Condiciones de las aguas subterráneas en el Distrito de Riego num. 051, Costa de Hermosillo, Sonora, *Ingeniería Hidráulica en México*, no. XIX, num. 3, 1965, p. 65-81.
- Jiménez G.R. y G. León Martínez. 1975. Perforación de Pozos Profundos. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México.
- Johnson E.E.. 1966. El agua subterránea y los pozos. Johnson Division. Saint Paul Minnesota. U.S.A:
- Kruseman G. P. 1975. Análisis y Evaluación de los datos de ensayos por bombeo. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen. Holanda.
- Kumar Sharma Santoch. 1977. Natural Ground-Water Recharge estimation Methodologies in India. Simmers edit. Reidel Publishing Company. New Delhi India. 301-311.
- Liu Beiling, et al. 1994. Water movement in desert soil traced by hydrogen and oxygen isotopes, chloride, and chloride-36, *Southern Arizona Journal of Hydrology*. Elsevier.
- Loera Burnes P. I.. 1999. Modelos Matemáticos para pruebas de bombeo con aplicación al cálculo de la transmisividad de acuíferos. Tesis Profesional. Departamento de Matemáticas. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora. México.
- Lohman S. W. .1983. Ground-water Hydraulics. Geological Survey professional paper 708. U.S. Department of Interior.
- Lonsdale, P., 1991. Structural patterns of the Pacific floor of Peninsular California. *AAPG Mem.* 47; 87-125.
- Lugo-Hubp, J., 1990, El relieve de la República Mexicana, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Rev., v.9, No.1, p.82-111.
- Lugo-Hubp, J. y Córdova-Fernández A.C., 1990a, Morfogénesis (Mapa de la República Mexicana) Universidad Nacional Autónoma de México, Inst. de Geografía, Atlas Nacional de México, Hoja geomorfología 1, No. IV.3, 3 ,escala 1:4,000,000.
- Maidment, R.D., 1992. Handbook of Hydrology. Mc Graw Hill.U.S.A.
- Marín, S., L.; B., Steinich, G., Velázquez; I., Simón; R., González, 1996, Caracterización geoquímica de los sistemas de flujo del valle de Hermosillo, Sonora. Informe Final, Instituto de Geofísica, UNAM. Ciudad Universitaria, México, D.F.

- Maron, S.H. and Prutton, K.F., 1965. Principles of Physical Chemistry, Mc Millan ed., New York.
- Matlock W.G., Fogel M.,C.D. Bush. 1966. Utilization of water resources in a coastal ground water basin. J. Soil and Water Conserv. V. 21. No. 5.
- Mayer, A., 2004, Análisis sustentable en el manejo del Agua y su posible aplicación en Sonora, CD de Resúmenes del Tercer Foro del Agua, Universidad de Sonora, Hermosillo, Son.
- Mazor, E. (1997) Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology, The applied Approach, second edition, Revised and expanded Marcel Dekker, Inc, Halsted Press a Divison of John Wiley and Sons, U.S.A. 413 pp.
- Melton, M.A., 1965. "The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvium deposits in southern Arizona". J. Geol., 73(1); 1-38.
- Mc Dowell, F. W., Keizer, R.P., 1977, Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlan, Mexico, Geol.Soc. of Am. , Bull. Vol. 88,p.1479-1487.
- Mc Dowell, F., W., 1993 The Volcanic section near Yecora, Sonora and its regional significance. En Rodriguez y Calmus Edit: III Simp. de la Geol. de Sonora y áreas adyacentes. Libro Guia de Excursiones; pp.185-194.
- Minjarez Sosa, I., Ochoa Granillo, J., Sosa León, P. 1992, Tectónica transcurrente cretácica en Sonora Central. XI Convención de la Soc. Geol. Mex. Libro de Resúmenes.
- Monreal, R., Castillo, J., Rangel, M. Morales, M., 2000, Estudio geohidrológico del comportamiento del acuífero mediante la realización de pruebas de bombeo y conceptualización a detalle de la intrusión salina en el acuífero de la Costa de Hermosillo", Informe Final de Proyecto en colaboración con la Comisión Nacional del Agua- Universidad de Sonora. Febrero a Agosto de 2000.
- Monreal, R., Castillo, J., Rangel, M. Morales, M., Oroz, L.A., y Valenzuela, H., 2001, La intrusión salina en el acuífero de la Costa de Hermosillo, Sonora, en Corona-Esquivel, R y Gómez-Godoy, J., (eds.), Acta de Sesiones de la XXIV Convención Internacional de la Asociación de Ingenieros de Minas Metalurgistas y Geólogos de Mexico A.C., Acapulco Guerrero, 17-20 de octubre del 2001, p. 93-98.
- Monreal S, R., Morales M. M., Rangel M., M., Castillo G. J., 2002, *Evaluación de la recarga al acuífero Costa de Hermosillo, Son.*, Informe inédito para la Com. Nal. Del Agua (CNA) Hermosillo, Son.
- Montgomery Watson S.A. de C.V., 1998 Diagnóstico de la Región II Noroeste. Estudio realizado para la Comisión Nacional del Agua.
- Morell, I. (2003) Acuíferos Detríticos Costeros. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Hidrogeología y aguas subterráneas No. 8.Tomo I, pp 31-44.
- Montijo, G.,A. 2002. Geomorfología y Estratigrafía del complejo Deltaico de la Costa de Hermosillo. Tesis de Posgrado en Ciencias, Geología, Universidad de Sonora.

- Montaño-Jiménez, 1988, en Monreal S, R., Morales M. M., Rangel M., M., Castillo G. J., 2002, *Evaluación de la recarga al acuífero Costa de Hermosillo*, Son., Informe inédito para la Com. Nal. Del Agua (CNA) Hermosillo, Son.
- Morales, M., M., Rangel, J., Castillo, R., Monreal, 2000, Hidrogeofísica del acuífero de la Costa de Hermosillo, II Foro del Agua, Resúmenes, UNISON-AIMMGM. Octubre, 2000. Hermosillo, Son.
- Moran Zenteno, D.J., 1984. "Geología de la República Mexicana". I.N.E.G.I., & Fac. Ing., U.N.A.M., México, D.F., 88 pp.
- Moreno, V., J.L. (2004) Antecedentes del uso de agua subterránea en el distrito de riego de la Costa de Hermosillo. En El agua y la agricultura en la historia de Sonora. Sociedad Sonorense de Historia, A.C. Hermosillo, Son, pp 319-330.
- Oliveira da Silva, M., 2003, Current knowledge of coastal aquifers in Portugal. In Coastal aquifers Inrusion Technology: Mediterranean countries. Tomo II pp. 159-167, Publicaciones del IGME No. 8, Madrid, España, 2003.
- OMM, 2004. Manejo Sostenible de acuíferos en la parte baja de la cuenca del río Sonora. Organización Meteorológica Mundial, Proyecto MASAS. Hermosillo, Son., México.
- OMM, Organización Meteorológica Mundial (2005) Manejo sostenible en la cuenca baja del Río Sonora, Notas de la Presentación del Proyecto Masas, Hermosillo, Son. Mex. Abril, 2005.
- Orellana E., 1982. Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. Editorial Paraninfo. Madrid, España. 578 p.
- Oroz, R. L. A. (2003) Modelo conceptual hidrogeológico e hidrogeoquímico del acuífero de la Costa de Hermosillo. Tesis profesional de Licenciatura en Geología, UNISON.
- Ortlieb, L., & J. Roldan Q., 1981. Geology of northwestern Mexico and southern Arizona (Descriptions of field trips prepared for the GSA, Cord. Sect. Ann. Meet., held in Hermosillo, Son., Mexico, March 21-30, and sponsored by the Inst. Geol. UNAM in cooperation with the Universidad de Sonora). Inst. Geol., U.N.A.M., Mexico, D.F., 435 pp.
- Otero, San V., N., 1990, Artificial recharge of aquifers in alluvial fans in México, Alluvial Fans, a field approach, Chapter 18. John Wiley and Sons. Edited by Rachocki A. & M. Church.
- Panteleit, B., W. Kessels and H.D. Schulz (2002) Geochemical processes in the salt-freshwater transition zone-Preliminary results of a 2D sand tank experiment. Proceedings of the 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, The Netherlands, pp 29-38.
- Piper, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses; Am. Geophys. Union Trans., v. 25, p. 914-923.
- Payne, R.B., Quijano, L., and Latorre D. C., 1978, Study of the leakage between two aquifers in Hermosillo, México, using environmental isotopes. International Atomic Energy Agency-AG-158/9.

- Payne, R, B.; L. Quijano and Latorre, C. 1979. Environmental Isotopes in a study of the origin of salinity of groundwater in the Mexicali Valley. *Journal of Hydrology*, 41 (1979) 201-215. Elsevier Scientific Publishing Co, Amsterdam, The Netherlands.
- Raisz, E., 1959. "Landforms of Mexico", prepared for the Geograph. branch of Off. Nav. Res., Cambridge, Massachusetts. (escala. 1:3'000'000).
- Radelli, L., 1986, An essay on the southern Basin and Range. *Bol. Dpto. Geol. Unison*, Vol. 3, No. 1, pp 51-146. Hermosillo, Son.
- Radelli, L., Rodríguez., P., Ornelas., 1985. Origin of the some geomorphologic lineaments and curvalineamnts of central Sonora (NW México). *Bol. Dpto. De Geol. Unison*, v.1, No. 1-2, Hermosillo, Sonora.
- Radelli, L, Thierry Calmus, Diana Meza F. And Tito Rey Montañó, 1990. Structural asymetry of the north-central part of Miocene Paleogulf of California. *Boletín del Dpto. de Geología, Unison.*, vol. 7, No.1-2, 1990, pp. 49-56.
- Radelli, L, Thierry Calmus, Diana Meza F., D., 1991, The asymmetry of the Gulf of California. First Intern. Meeting on Geology of the Baja California Penninsula, Univ. Aut. De Baja California Sur. Resúmenes, p. 65
- Rankama, K., and Sahama, T.G., 1950. *Geochemistry*; Chicago, University, Chicago, Press, 912 p.
- Rangel, M. M. 1995, *Geología y análisis estructural de la cuenca hidrográfica del Río Sonora y Modelo preliminar estratigráfico de su planicie deltaica.*
Trabajo de investigación inédito, Proyecto: Geología de las Costas del Pacífico Norte, M.C. Rafael Rodríguez Torres, Dpto. de Geología, Universidad de Sonora.
- Rangel, M. M. 1996, *Delimitación de los elementos fisiográficos de la cuenca baja del Río Sonora.* Seminario de Tesis, Dpto. de Geología. Universidad de Sonora.
- Rangel, M.M. 2000. Contributions on the isotopic characterization of the coast of Hermosillo aquifer and its relation with the marine intrusion, Sonora, Mexico. *Geological Society of America, Simposium Proceedings*, Reno, Nev. U.S.A.
- Rangel, 2000, New contributions on the isotopic of the coast of Hermosillo aquifer and its relation with the marine intrusión, Sonora, México, GSA 2000 Annual Meeting, Abstracts, pp. A357, Reno, Nevada, 9-18 nov., 2000
- Rangel, M. M., A., Cortés, 2000. Geological Society of America, 2000 GSA Annual Meeting-Reno, Nevada. Abstract No. 50903 "Contributions on the isotopic characterization of the Coast of Hermosillo aquifer and its relation with the marine intrusion, Sonora, Mexico" Reno, Nevada, USA.
URL: <http://rock.geosociety.org/absindex/annual/2000/50903.htm>.
- Rangel, M. M., et al., 2000a. Isotopic characteristics of the groundwater in the divide between the Matape and Sonora Basins. 4a. Reunión Internacional de Geología del Noroeste y zonas Adyacentes, Memorias, Hermosillo, Son., Mex.

- Rangel, M. M., et al., 2000b. Nuevas Aportaciones Para El Entendimiento Del Modelo Hidrogeológico de la Costa de Hermosillo, Utilizando Isótopos Ambientales (O-18; D) y Fechamiento de Agua (C-14). II Reunión Nal. UGM, Pto. Vallarta, Jal., Mex.
- Rangel-Medina. M., Castillo, G. José; Monreal, S. Rogelio; Morales, M. Mariano, 2001, Determinación de la Vulnerabilidad del Acuífero Costero Costa De Hermosillo, Son. Méx. a la Intrusión Salina. XI Congreso Nacional de Geoquímica, Ensenada, B.C.
- Rangel, M. M., 2002, Introducción a los Riesgos Geológicos Libro Uno de la Serie Elementos de Geología Ambiental; Dpto. de Geología, Universidad de Sonora.
- Rangel, M. M., et al., 2002, Determinación de la vulnerabilidad a la intrusión marina de acuíferos costeros en el pacífico norte mexicano; un caso, el acuífero costa de Hermosillo, Sonora. México. 23 al 25 de Abril del 2002, Ciudad de La Habana, CUBA. Página web del CYTED XVII <http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/Rangel.html>
- Rangel-Medina. M., Monreal, S. Rogelio; Morales, M. Mariano, Castillo, J. y Valenzuela, H. (2002), Importance of the Hydrogeological Modeling in the Management of Groundwater, A Case Study: The Coast Of Hermosillo Aquifer, Sonora, Mexico . Fundación Centro internacional de Hidrología Subterránea, Editorial SINEX, Barcelona, España.
- Rangel-Medina. M., et al., 2003. Caracterización geoquímica e isotópica del agua subterránea y determinación de la migración de la intrusión marina en el acuífero de la Costa de Hermosillo, Son., México. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Hidrogeología y aguas subterráneas No. 8.Tomo I, pp 325-335.
- Rangel, M. M., et al., 2003a Estimation of the vulnerability to saline intrusion of the Coast of Hermosillo aquifer, Sonora, Mexico" Proceedings of the First International Workshop on Aquifer Vulnerability and Risk; Salamanca, Mex. May, 2003.
- Rangel-Medina, M. (2003) El Análisis Hidrogeomorfológico En El Entendimiento Del Origen Y Distribución De La Calidad Del Agua Subterránea Del Acuífero Del Valle Del Yaqui, Sonora, México. Seminario de Vulnerabilidad de acuíferos, CYTED, Lima Perú.
- Rangel-Medina, M., Monreal, S. Rogelio; Morales, M. M., Castillo, G., J. (2004a). Estimation of the vulnerability to saline intrusion of the coast of Hermosillo aquifer, Sonora, Mexico. Vol. no. 3, pp 621-631. Geofísica Internacional, UNAM, México, D.F.
- Rangel-Medina, M., Monreal, S R., Minjarez S, I., De La Cruz O, L. (2004b) The Saline Intrusión in The Costa de Hermosillo Aquifer in Sonora, México; A Challenge to Restore. 18 SWIM, SPAIN, 2004, Custodio, Manzano and Araguas, editors. IGME.
- Rankama, K., and Sahama, T.G., 1950. Geochemistry; Chicago, University, Chicago, Press, 912 p.

- Reynolds, J. (2004) Estrategia utilizada para el manejo integrado de un acuífero en Costa Rica. Ist Congreso Peruano de la AIH, Proceedings en CD editados por AIH Grupo Peruano.
- Rodríguez-Castañeda, J.L., (1981). Notas sobre la geología del área de Hermosillo, Sonora. UNAM, Inst. Geol., Revista, 5(2); 131-39.
- Rodríguez, D. B y Ma. E. Pérez R. (1991) Estudio hidrogeoquímico de la costa de Hermosillo y el Valle de Guaymas en el Estado de Sonora. Tesis Profesional de Ing. Geólogo, ESIA-IPN 111 pp.
- Roldán-Quintana, Jaime, 1991, Geology and chemical composition of the Jaralito and Aconchi batholiths in east-central Sonora, Mexico: Geological Society of America, Special Paper 254, p 69-80.
- Sanders L.L. 1998. A Manual of Field Hydrogeology. Prentice Hall. Northeastern Illinois University. U.S.A.
- Sangree y Widmier, 1979, en Monreal S, R., Morales M. M., Rangel M., M., Castillo G. J., 2002, *Evaluación de la recarga al acuífero Costa de Hermosillo, Son.*, Informe inédito para la Com. Nal. Del Agua (CNA) Hermosillo, Son.
- Samper, C.J.,(1997) Métodos de evaluación de la recarga por lleva por balance de aguas: Utilización, calibración y errores. Asoc. Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Español, Textos del Seminario de Las Palmas, Gran Canaria, Enero, IGME,1997. pp 41-82.
- Salas y López Santoyo, 1981, en Monreal S, R., Morales M. M., Rangel M., M., Castillo G. J., 2002, *Evaluación de la recarga al acuífero Costa de Hermosillo, Son.*, Informe inédito para la Com. Nal. Del Agua (CNA) Hermosillo, Son.
- SARH, 1977, Estudio Geohidrológico de las cuencas altas de los Ríos Sonora, Zanjón y San Miguel.
- Schellhorn, R.W., C.L.V. Aiken, & M. de la Fuente, 1991. Bouguer gravity anomalies and crustal structure in Northwestern Mexico. *AAPG Mem.* 47; 197-215.
- Schoeller, H. 1935. Utilité de la notion des échanges de bases pour la comparaison des eaux souterraines; France, Soc. Geol. Comptes rendus Sommaire et Bull. Ser. 5, p. 651-657.
- Schoeller, H., 1955. Geochemie des eaux souterraines; Reveu de L' Institute Francais due Petrole, v. 10, p. 230-244.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1978, 1982, Reportes de perforación de Pozos de Observación y Centinelas en la Costa de Hermosillo, Son. Informe Inédito.
- Sharma, M.L. (1987) Groundwater Recharge. CSIRO, Division of Water Resources, Wembley Australia, Proceedings of the Symposium on Groundwater Recharge, Mandurah/ 6-9 July 1987.
- Sherif, M.M., 2003, Seawater intrusión in the Nile delta aquifer: an overview. Pub. IGME, España, Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas No. 8, Tomo II, pp 295-308. Mar. 2003.

- Steinich, B., Simón, V., Chavarría, V.A., 1997⁽¹⁾. Estudio de la intrusión salina en la franja costera en el valle de Hermosillo y el Sahuaral, Sonora. IGFUNAM, Cd. Universitaria. México, D.F.
- Steinich, B., I. Simón, J.A. Chavarría, y L.E. Marin, 1997⁽²⁾, Geophysical investigations of the vadose zone in the valley of Hermosillo aquifer, Sonora México. *Geofísica Internacional*, vol. 36, p. 191-200.
- Stiff, H.A. Jr., 1951. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns; *Jour. Petroleum Tchnology*, v. 8, no. 16, p. 15-17.
- Sukhija Es et al., 1987. Validity of the environmrntal chloride method for recharge evaluation of coastal aquifers, India. Enxeceved publishers B. V., Amsterdam.
- Suter, M., 1991, en Monreal S, R., Morales M. M., Rangel M., M., Castillo G. J., 2002, *Evaluación de la recarga al acuífero Costa de Hermosillo, Son.*, Informe inédito para la Com. Nal. Del Agua (CNA) Hermosillo, Son.
- Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A., 1977. " Informe final del Estudio Geohidrológico de las Cuencas Altas de los Ríos Sonora, Zanjón y San Miguel ".
- Thiessen, A.H., 1911. Precipitation of large areas, *Mon. Weather Rev.*, vol. 39, pp. 1082-1084.
- Thornbury, W.D., 1954. "Principles of geomorphology". John Wiley & Sons, New York, 618 pp.
- Thorntwaite, C.W., !948. An approach toward a Rational Classification of Climate, *Geograph. Rev.*, vol. 38, pp. 55-94.
- Tóth, J.A. (1963) A theory of ground-water motion in small drainage basins in central Alberta, Canada. *Journal of Geophysical Research* 67, no. 11: 4375-87.
- Tulipano, L. (2003) Overexploitation consequences and management criteria in coastal karstic aquifers. Instituto Geológico y Minero de España, Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas No. 8. , p 127-136, Tomo II, Madrid, España.
- Urish, D.W., R.K., Frohlich, 1990. Surface electrical resistivity in coastal groundwater exploration. *Geoexploration*, 26 (1990) 267-289. Elsevier Science Publishers. University of Rhode Island, Kingston, U.S.A.
- Valenzuela, S.L.H.(2002) Modelo conceptual hidrogeológico del sistema acuífero Costa de Hermosillo y simulación de flujo subterráneo. Tesis de Posgrado en Ciencias, Geología, Dpto. de Geología, Universidad de Sonora, México.
- VanDam, J.C., 1999, Exploitation, Restoration and Management, Chapter 4, in J. Bear et al., (eds.) *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers*, pp73 125, Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
- Vargas A.V. 1976. Técnicas y análisis de costos de pozos profundos y aguas subterráneas. Edit. Limusa. México.
- Velásquez, O.G. Simón, V.I., González, R., IGFUNAM (1996) Caracterización Geoquímica de los sistemas de flujo del valle de Hermosillo, Sonora. Cd. Universitaria, México, D.F.

- Waterloo Hydrogeologic. 1999. Aquifer Test-User manual. Waterloo, Ontario. Canada.
- Weyer, K.U., Krouse, H.R., Horwood, W.C. 1978. Investigation of regional geohydrology south of great slave lake, N.W.T. Canada, Utilizing Natural Sulphur and Hydrogen Isotope Variations. Paper number IAEA-SM-228/14. Neuherberg, F.R.G.
- Winterer, E.L., T.M. Atwater, & R.E. Decker, 1989. The northeast Pacific Ocean and Hawaii. In: A.W. Bally & A.R. Palmer, eds., The Geology of North America. Vol. A-An overview; The Geol. Soc. Am., Inc., Boulder, Colorado, p. 265-298.
- World Bank, 1999. México: Policy options for aquifer stabilization. Two volumes. Volumen I : Policy Report. Volumen II : Technical Report. Comisión Nacional del Agua y otros Consultores Particulares. México. D.F.
- Wood W.W. and Sanford, W.E., 1995. Chemical and Isotopic Method for Quantifying Ground -Water Recharge in a regional, Semiarid Environment. Ground Water, 33(3): 458-486
- Yong, Wu and Yongxin Xu, 2004. Recharge estimation with mixing model of chloride mass balance in Vermaak's river valley, South Africa. Groundwater Group, Earth Science Dpt. University of the Western Cape, South Africa. XXXIII IAH Congress, Zacatecas, México.
- Zohdy A. R., G.P., Eaton, D.R., Mabel, 1974. Application of surface geophysics to ground-water investigations. Techniques of water-resources investigations of the United States Geological Survey. U.S., Department of the Interior. U.S.A. ,