

VULNERABILIDAD A LA INTRUSIÓN MARINA DE ACUÍFEROS COSTEROS EN EL PACIFICO NORTE MEXICANO; UN CASO, EL ACUÍFERO COSTA DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO

Miguel Rangel MEDINA¹
Rogelio Monreal SAAVEDRA¹
Mariano Morales MONTAÑO¹
Jose Castillo GURROLA²

RESUMEN

En la evaluación de la vulnerabilidad acuífera, los problemas de contaminación del agua subterránea, ya sea por fuentes puntuales o dispersas, tienen un común denominador; los contaminantes son adicionados sobre o cerca de la superficie del terreno. Bajo este criterio, se ha evaluado la vulnerabilidad de acuíferos con métodos como DRASTIC, AVI, ERI, GOD y otros. La intrusión salina, o contaminación del agua dulce por agua de mar en acuíferos costeros, involucra características distintas del contaminante y del medio hidrogeológico, que exigen para su evaluación, una metodología diferente y necesariamente más costosa, tardada y a veces con alto grado de complejidad para la obtención de parámetros hidrogeológicos. El acuífero Costa de Hermosillo en el noroeste mexicano, ha sido fuertemente afectado en los últimos 37 años, intrusionado en más de 30 km fue estudiado a detalle, obteniéndose el modelo hidrogeológico conceptual basado en control tectónico-estructural, métodos hidráulicos, hidrogeofísicos e hidrogeoquímicos con apoyo isotópico, que permitieron definir la geometría del basamento, la hidrostratigrafía y propiedades del acuífero, la distribución espacial de la posición del agua salina y finalmente las zonas más vulnerables por donde ha penetrado el agua de mar preferencialmente. Se identificó la existencia de paleoagua entrampada en sedimentos detríticos marinos y rocas volcánicas. La edad del agua del acuífero varía entre 2,751 y 4,630 años \pm 50 años. Mientras que la paleoagua tiene una edad de entre 26, 800 y 30,000 \pm 150 años por lo que se considera un recurso finito del cual no existen estudios de evaluación.

Palabras clave: *Costa de Hermosillo, intrusión salina, vulnerabilidad, acuíferos costeros, hidrogeoquímica.*

ABSTRACT

In the assessment of ground water vulnerability, from punctual or dispersed sources, there is in many cases a common denominator; the pollutants are added on or near the surface of the ground. Under this criteria, the vulnerability has been evaluated with methods like DRASTIC, AVI, ERI, GOD and others. Nevertheless, the saline intrusion, or pollution of ground water by sea water in coastal aquifers, involves another characteristics because of the kind of pollutant and the hydrogeologic frame that demand a different methodology necessarily expensive, sometimes with high degree of complexity, for obtaining hydrogeologic parameters. The aquifer of the coast of Hermosillo, in northwest México (west-central state of Sonora), has been one of the most affected, since has been intruded more than 30 km landwards. A detailed study of the aquifer, supported by tectonic and structural control, through hydraulic, hydrogeophysic and hydrogeochemistry methods with isotopic characterization allowed to obtain the following: 1) the geometry of the basement, 2) the hidrostratigraphy with the aquifer properties, 3) the spatial distribution of the saline water intrusion and 4) the most vulnerable zones, from where the marine water penetrates preferentially since 37 years ago. The paleo-

¹ Dpto. de Geología; mrangelm@geologia.uson.mx

² Dpto. de Agricultura; jcg@rtn.uson.mx

Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, 83000, México

water was identified trapped in marine detritic sediments and volcanic rocks. The age of the water in the aquifer varies from 2,751 and 4,630 years \pm 50 years; whereas the paleo-water has an age between 26, 800 and 30,000 \pm 150 years, that's why this water is considered as a finite resource, however there are not additional evaluation studies.

Key words: *Coast of Hermosillo, saltwater intrusion, vulnerability, coastal aquifers, hydrogeochemistry.*

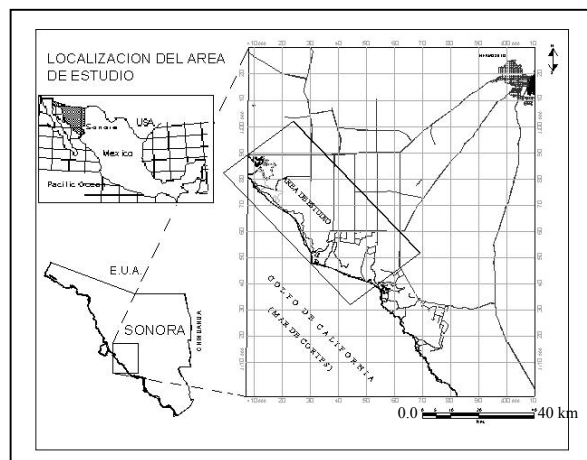
INTRODUCCION

El acuífero de la Costa de Hermosillo se ubica 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 Oeste, dentro de la Región Hidrológica 9 Sonora Sur y comprende una superficie aproximada de 3200 Km², es una cuenca exorreica ubicada sobre la vertiente occidental de México y sus aguas superficiales drenan hacia el Golfo de California (Figura 1).

El área de estudio queda comprendida dentro de la superficie mencionada, formando una franja de aproximadamente 35 x 55 Km

(1925 km²) paralela a la línea de costa, franja comúnmente denominada zona de interfase salina. La región cuenta con un clima seco, predominando el subtipo seco semicálido, con lluvias en verano. Las temperaturas medias anuales varían de los 22° a los 24 °C. Las lluvias se presentan durante los meses de Junio a Septiembre, con mayor precipitación en Julio y Agosto que varía de 75 a 200 mm. La isoyeta 200 cruza por la zona, en un patrón paralelo a la línea de costa (Rangel, 1997). La pendiente de la cuenca calculada con el Criterio de Horton es de 0.18 % (INEGI, 1993).

Figura 1. Localización del área de estudio



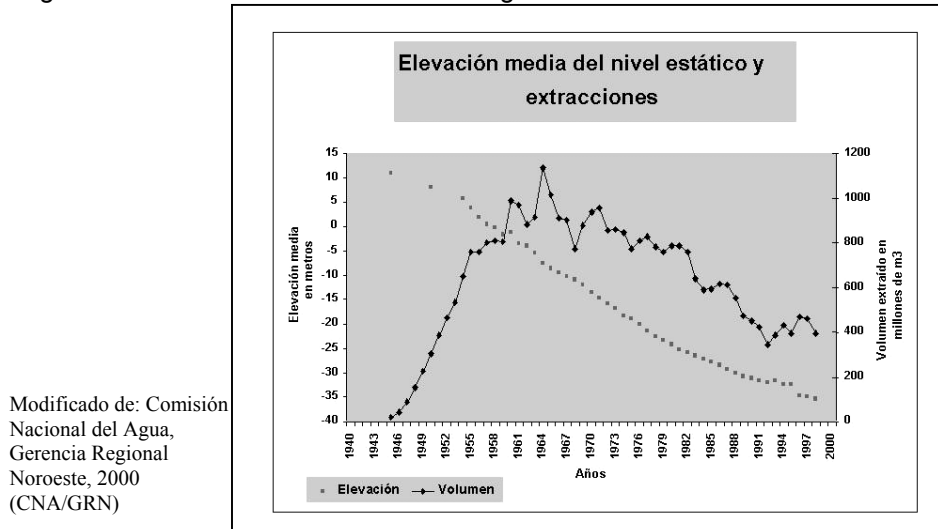
ANTECEDENTES

El acuífero Costa de Hermosillo inició su explotación en 1945 con 17 pozos, en el año 1965 alcanzó su máximo volumen de extracción, con alrededor de 1100 Hm³ por año (Arregín, 2000). Desde entonces se ha ido reduciendo la extracción de agua subterránea, hasta descender en la actualidad a un valor estimado en 550 Hm³ por año (Colegio, 1999) (Figura 2).

La pérdida de carga hidráulica del acuífero originó un cono de abatimiento e invirtió

el flujo del litoral hacia el centro de la planicie desde 1949 (Figura 3 y 4). Como consecuencia, se decretaron vedas para la explotación de aguas subterráneas. La primera en 1951, subsecuentes ampliaciones en 1954 y en el ciclo agrícola 1963-1964 se impuso el Reglamento para la Explotación de las Aguas Subterráneas en la zona vedada y posteriores ampliaciones se dieron debido a los fuertes abatimientos en 1967.

Figura 2. Evolución de la extracción de agua en el acuífero Costa de Hermosillo, Son.



Diversos estudios aislados analizaron las condiciones del acuífero, (Matlock, Fogel y Bush, 1966), aportando evidencias para que se reglamentara su uso y manejo.

Figura 3. Potencimetría 1945

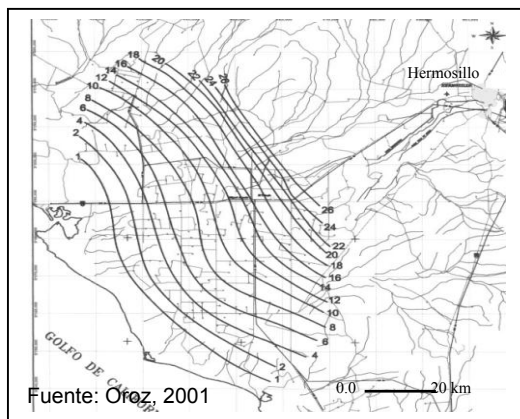
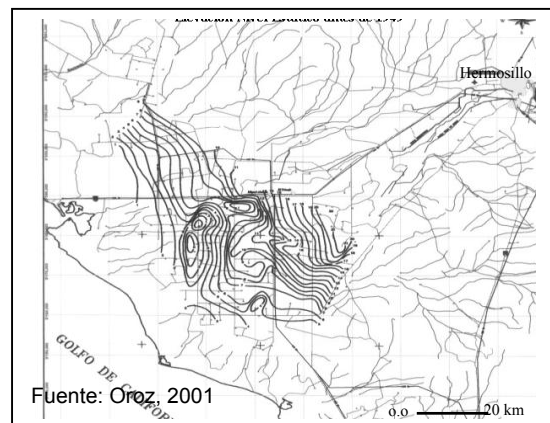


Figura 4. Potencimetría 1949



Arreguín et al. (1968) elaboraron el estudio de mayor trascendencia para la administración del recurso en los siguientes 35 años. En este, se definió un modelo hidrogeológico y se calculó la recarga del acuífero en 350 Hm³/año, de los cuales 280 Hm³ correspondían a infiltración vertical ascendente, proveniente de un acuífero inferior y 70 Hm³/año a infiltración vertical. Con base en este esquema, se reubicaron 105 pozos afectados por salinidad. Lo anterior implicaba también, reducir paulatinamente la extracción de agua subterránea, hasta un volumen cercano a la recarga estimada por el estudio.

Este modelo hidrogeológico de dos acuíferos; inferior y superior permaneció durante 37 años y el nivel dinámico continuó profundizándose hasta alcanzar 135 m en el año 2000 (65 m bajo el nivel del mar) (Figura 5). Por ello, autoridades y usuarios han dudado en los últimos años, de la posición de la interfase salina, de su migración continente adentro, así

como del alcance que esta ha logrado en la degradación del agua subterránea, sobretodo porque aducen que sus acciones, con la modernización del riego, debían haber sido suficientes para detener la penetración del agua de mar y el descenso de los niveles dinámicos del acuífero.

OBJETIVO

El objetivo de este estudio fue caracterizar la geoquímica del agua salina así como el alcance que esta ha logrado en el agua subterránea, obtener la posición de la interfase salina y explicar su proceso de migración continente adentro definiendo las zonas más vulnerables por donde penetra preferencialmente el agua de mar.

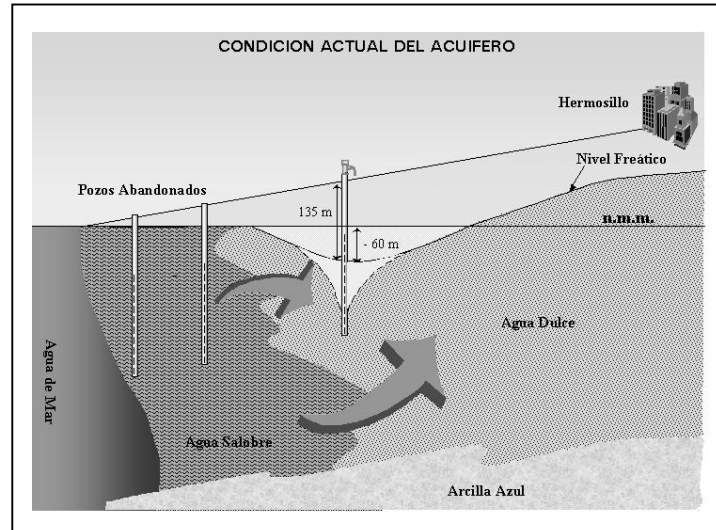
METODOLOGIA

Se realizó análisis de imágenes de satélite, cortes litológicos, se correlacionó la información geológico-geofísica e hidráulica

existente. La geoquímica del agua se realizó con base en la recolección de 107 muestras de agua subterránea mixta (boca de pozo); muestreo discreto en pozos de producción abandonados, pozos de observación y piezómetros; medición de conductividad eléctrica vertical y temperatura

en 32 pozos abandonados; toma de muestras de agua para análisis isotópicos y caracterización geoquímica e isotópica de las aguas. Con la información obtenida se elaboró el modelo hidrogeológico y se caracterizó la franja de intrusión marina.

Figura 5. Evolución del Nivel estático



Fuente: Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional NO, 2000 (CNA/GRN)

El muestreo de agua siguió el modelo hidrogeológico y la posible definición de cinco familias isotópicas, sugeridas preliminarmente como facies hidrogeoquímicas por trabajos previos de diversos autores (Arreguín, 1968; Marín, 1996; Steinich, 1997; Castro, 1998):

- a) Acuífero Superior (somero)
- b) Acuífero Profundo
- c) Interfase Salina (agua dulce con presencia de agua marina)
- d) Agua de Mar
- e) Agua Salina (salmueras)

Con este criterio, se pretendió que también la toma de muestras de agua para isótopos estables, Carbono-14 y Tritio, llenara los siguientes requisitos:

- a) Representar a todas las profundidades
- b) Representar a todas las regiones geográficas del acuífero
- c) Que fueran representativas de las diferentes salinidades

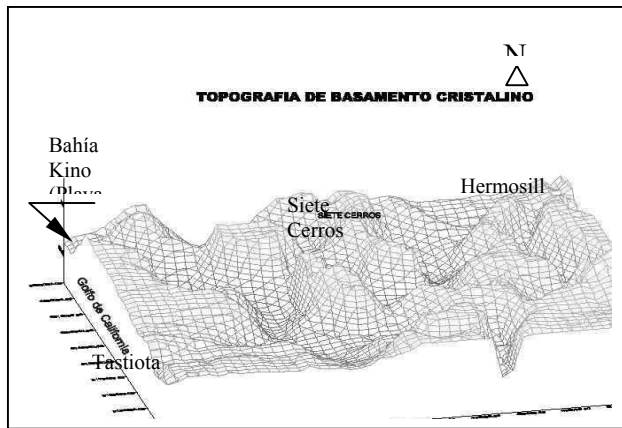
HIDROMORFOTECTÓNICA

La morfología de la zona litoral es producto de la tectónica distensiva de la Provincia del "Basin and Range Sonorense" (De Zcerna, 1988) y a la apertura del Golfo de California. Como resultado existen una serie de

fosas tectónicas sedimentarias formadas por bloques caídos, cuyo basamento cristalino regional está constituido por intrusivos de composición granítica, que forman parte del llamado Batolito Larámide de Sonora, presentan numerosos "roof pendants" de rocas antiguas, cubiertos en discordancia, por rocas post-batolíticas y depósitos recientes (SARH, 1978; 1982; Morales, et al., 2000). Desde el punto de vista hidrogeológico estas fosas representan canales de alta permeabilidad que facilitan el proceso de intrusión marina hacia el continente (Flores et al. 1998; Morales, et al., 2000). Con base en datos gravimétricos (Exploraciones del Subsuelo, S.A., 1971), Morales, et al., (2000) obtuvieron un plano de profundidad al basamento cristalino que muestra el desarrollo de una alternancia de estas fosas tectónicas (grabens) y bloques levantados (horsts) sensiblemente orientadas NW-SE que alcanzan profundidades superiores a los 1500 metros (Figura 6 y 7)(Morales, et al., 2000).

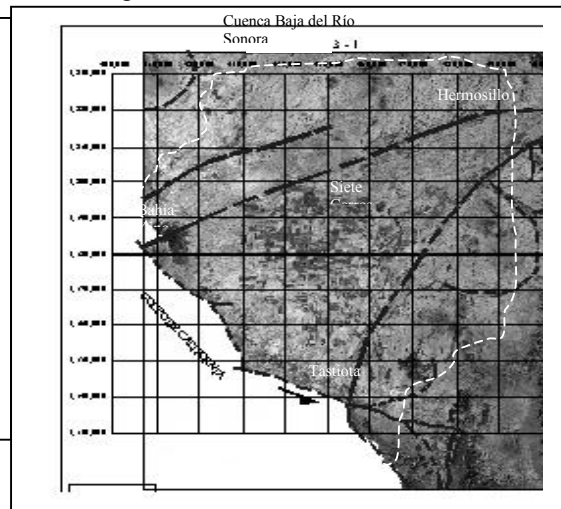
El escenario de mayor importancia hidrogeológica es la *Cuenca Baja* del Río Sonora que tiene como máxima elevación topográfica 1,080 msnm, en un lugar próximo al nacimiento del Río Bacoachi y el más bajo es el nivel del mar.

Figura 6. Vista Tridimensional del basamento



Modificados de Morales, et al., 2000

Figura 7. Lineamientos estructurales



Del análisis de la imagen LANDSAT y el mapa de anomalías de gravedad de Schelhorn (1991), se ubicaron las diversas estructuras que limitan la cuenca baja del Río Sonora y sus relaciones obteniéndose los resultados siguientes (Rangel 2001)(Figura 7):

1.- En la región de estudio sobresalen dos elementos hidromorfotectónicos: 1) la extensión submarina de la cuenca baja del Río Sonora, hacia donde descargaba flujo subterráneo de agua dulce del acuífero somero y; 2) la delimitación de la Caldera de Guaymas.

2.- Un patrón complejo de alineamientos con orientaciones NE, N y NW. que marcan el límite Norte de la cuenca baja del Río Sonora, casi paralelos a la línea de costa y que están asociados a la Falla Libertad descrita por Gastil & Krummenacher (1977).

3.- Este patrón estructural resultante de la neotectónica del Basin and Range Sonorense es de suma importancia en la distribución, almacenamiento y movimiento del flujo subterráneo, ya que limitó y restringió a los depósitos miocénicos de relleno sedimentario y a las rocas volcánicas contemporáneas. Constituyó con ellos almacenamientos de agua subterránea aislados entre cuencas, en algunas de ellas los sedimentos tienen fuerte presencia de interstratos semiconfinantes que restringen su movimiento lateral y vertical. Estos depósitos pueden descansar ya sea sobre las rocas volcánicas miocénicas, mesozoicas o sobre el basamento cristalino.

HIDROESTRATIGRAFIA

Los afloramientos de la Cuenca Baja 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 NW-SE descrita por Couch y otros (1991). Monreal, (2000) reconstruyó la geología de los alrededores del área de estudio, a partir de los trabajos de Gastil y Krummenacher (1977), en ella afloran rocas de varias edades que varían desde el Paleozoico hasta el Cuaternario que están constituidas por rocas sedimentarias, ígneas intrusivas y volcánicas (Figura 8).

En el subsuelo, a pesar de la abundancia de pozos en el área de estudio, pocos pueden considerarse para la reconstrucción de un modelo hidroestratigráfico. La información continúa siendo insuficiente para conocer la estratigrafía del subsuelo con precisión.

Monreal et al. (2000); Montijo (2001) basándose en la información geofísica y litología de pozos someros y profundos proponen la presencia de tres unidades principales y un basamento (Figura 9): 1) Unidad Superior (aluviones del cuaternario); 2) Unidad Media (sedimentos marinos de edad miocénica); 3) Unidad Inferior (gravas y arenas miocénicas), Basamento cristalino (granitos y rocas volcánicas).

Figura 8. Columna estratigráfica regional simplificada

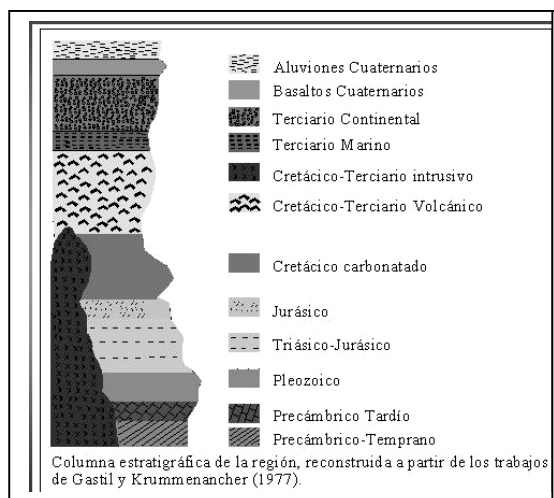
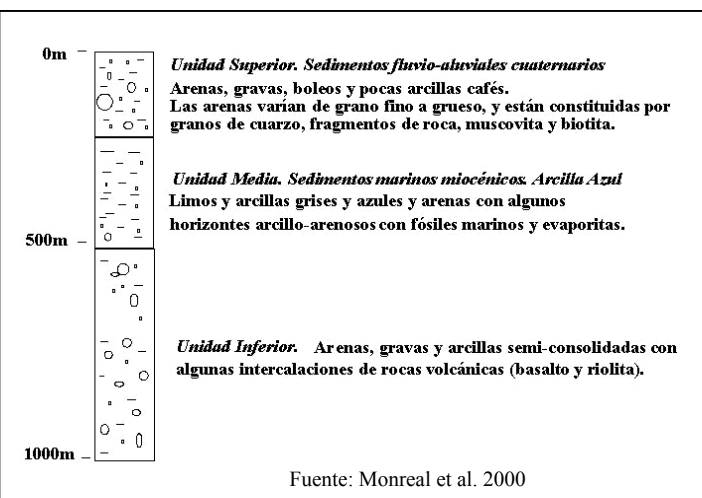


Figura 9. Hidroestratigrafía



HIDROGEOLOGIA

Dado que la geometría del basamento es irregular, el relleno en el sistema de cuencas

también lo es, existen áreas donde el relleno tiene un espesor de 150 m y en otras de hasta 800 metros (Figuras 10 y 11).

Figura 10. Correlación hidroestratigráfica, sección paralela a la costa, Vista al Noreste

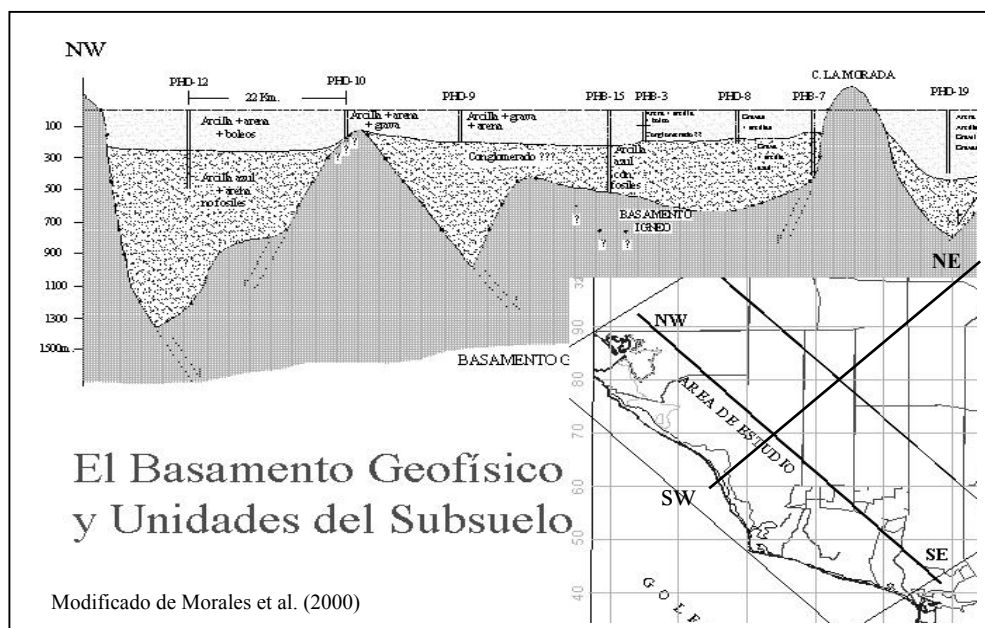
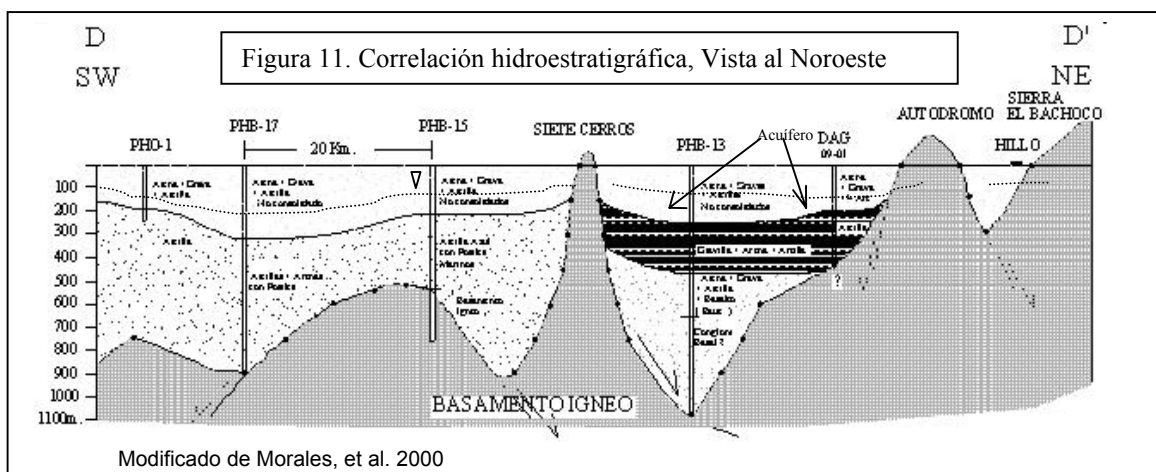


Figura 11. Correlación hidroestratigráfica, Vista al Noroeste



Los materiales de relleno constituyen un acuífero multicapa, en el que existen semiconfinamientos, pero en su conjunto trabaja como acuífero libre. Tales semiconfinamientos hicieron pensar a otros autores, sobre la existencia de dos diferentes acuíferos.

Castillo, et al. (2000; 2001) realizaron análisis de la hidráulica del sistema y definen que es de tipo libre, que el área suroeste es la zona de menor permeabilidad y que el radio de influencia del bombeo es de 115 metros. Al noreste se encuentra una franja de mayor permeabilidad siendo el radio de influencia del bombeo de 435 metros. La distribución de la

transmisividad es mayor en el centro del acuífero y la parte noreste, en la zona del paleocauce del Río Sonora con valores de 10^{-1} y disminuye hacia la línea de costa, al noroeste y en las laderas de montañas con valores de 10^{-4} . Concluyen que en la actualidad la recarga de agua dulce es de $175 \text{ Hm}^3/\text{año}$, a diferencia de los $350 \text{ Hm}^3/\text{año}$ calculada para el año 1967. Mientras que la recarga proveniente del mar es de $98 \text{ Hm}^3/\text{año}$, lo que mantiene prácticamente equilibrada la posición del cono de abatimiento principal a una distancia de 32 km de la línea de costa (Figuras 12 y 13).

Figura 12. Piezometría año 2000

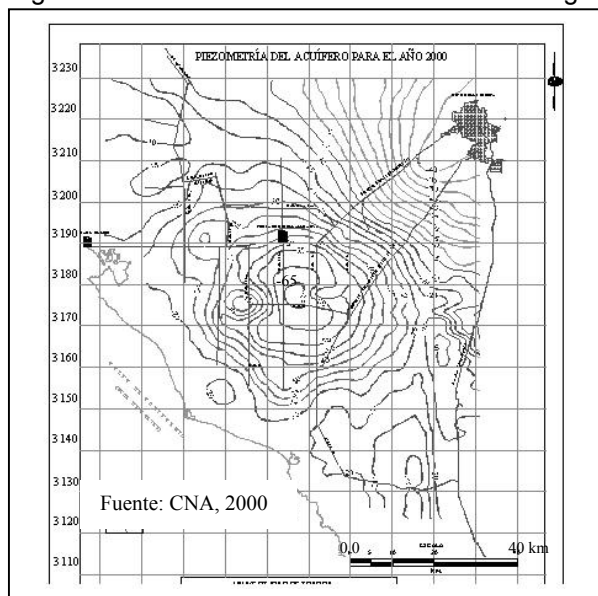
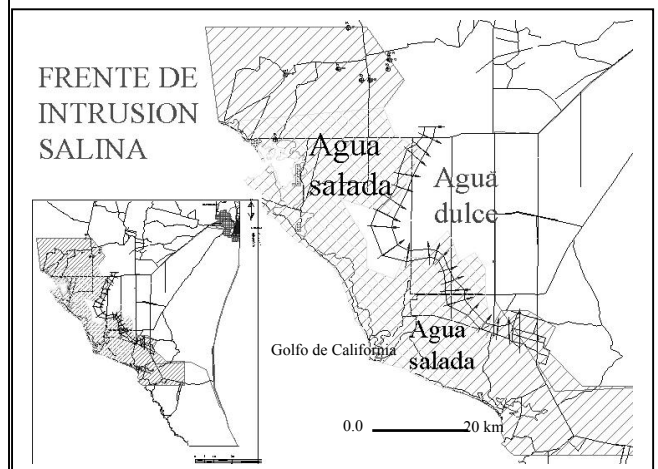


Figura 13. Área del cálculo de la recarga de agua marina



HIDROGEOQUÍMICA

La salinidad del acuífero tuvo una fuerte difusión en los primeros 30 años de operación, lo que motivó que en determinadas zonas, su incremento fuera muy notorio pero en otras, a veces próximas a ellas, apenas fue perceptible. Esta condición se mantuvo durante muchos años sin llegar a entenderse bien las condiciones hidrogeológicas que diferenciaban ese comportamiento.

Para determinar y caracterizar el avance de la salinidad, se utilizó ampliamente la conductividad eléctrica (CE) expresada en $\mu\text{S}/\text{cm}$ ($1 \mu\text{S}/\text{cm} = 10^{-6} \text{ S}/\text{cm} = 10^{-6} \text{ mhos}/\text{cm}$), como uno de los parámetros más importantes ya que se considera representativo de la salinidad en consecuencia de las siguientes consideraciones (Gaona, 1976):

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.

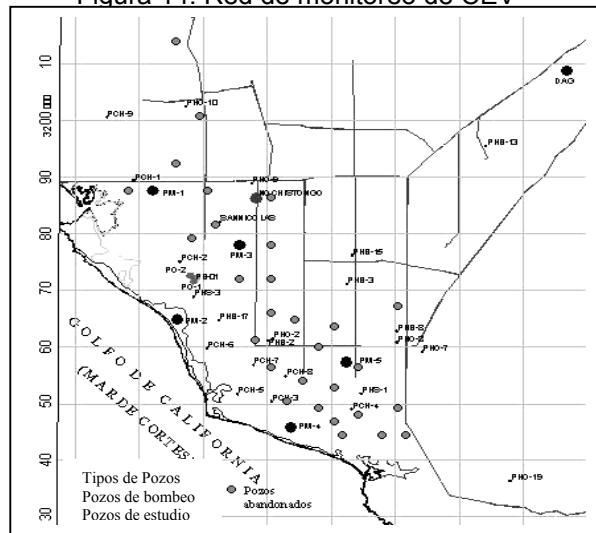
Diversas interpretaciones se basaron en la aplicación directa de la CE o bien de su correlación con la geofísica para obtener la extensión de la intrusión salina, examinar la migración del agua salobre y su distribución a diferentes profundidades. De igual manera se utilizó para identificar la posible estratificación de la calidad del agua, seleccionar profundidades a las cuales tomar muestreo discreto de agua para realizar análisis físico-químicos en laboratorio.

Con base en este criterio, la calidad del agua por su salinidad se clasificó de acuerdo con las jerarquías de la APHA (1995):

- 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

En primer término se registró conductividad eléctrica vertical (CEV) en una red de monitoreo de 30 pozos, aproximadamente paralela a la línea de costa (Figura 14). Con esta información se configuró la distribución de la CEV a 40, 70 y 100 m de profundidad, la cual mostró la migración de la intrusión salina (Figuras 15, 16, 17).

Figura 14. Red de monitoreo de CEV



Fuente: Rangel, et al., 2000

Figura 15. CE a 40 m de profundidad

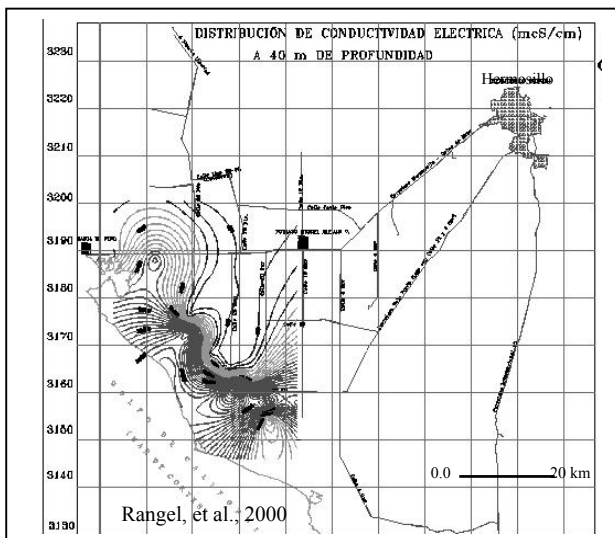


Figura 16. CE a 70 m de profundidad

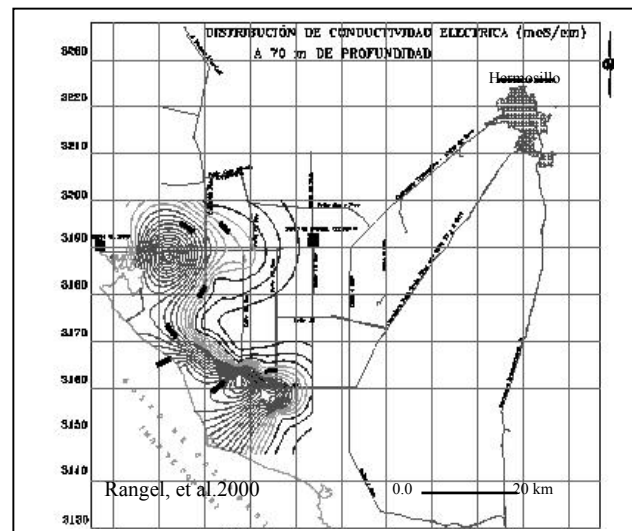
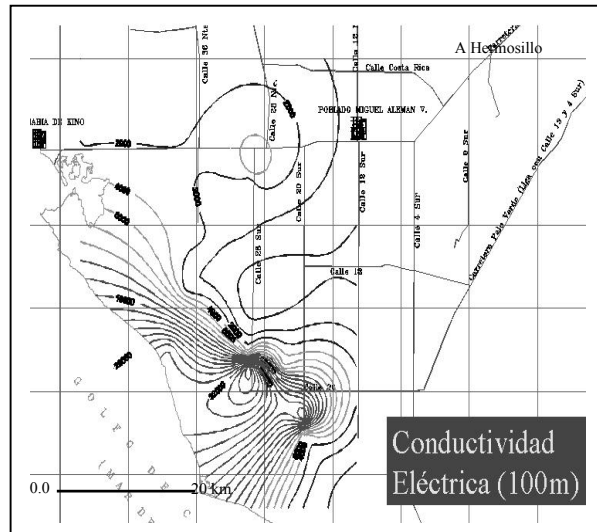


Figura 17. CE a 100 m de profundidad

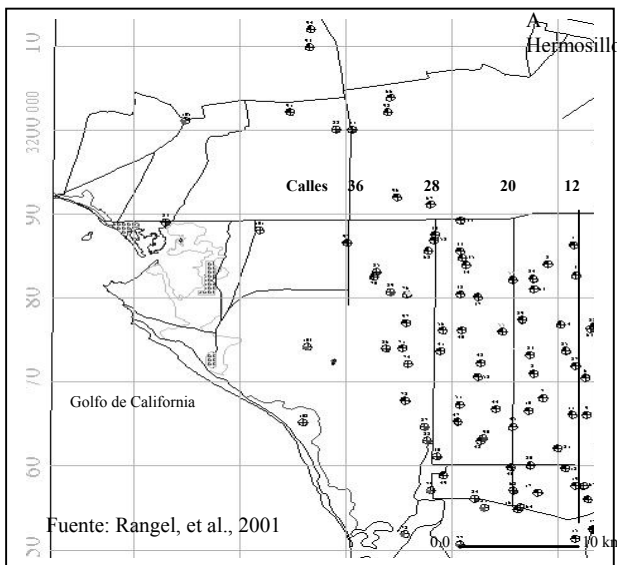


Fuente: Rangel, et al., 2000

La distribución espacial de parámetros físicos y químicos se obtuvo con una red de monitoreo de 107 pozos y se utilizaron las calles agrícolas del Distrito de Riego (36, 28, 20 y 12) como rutas de rastreabilidad (Figura 18). Los resultados de análisis se presentan en la tabla 3. En cada pozo se midió la C.E; pH y T °C de la

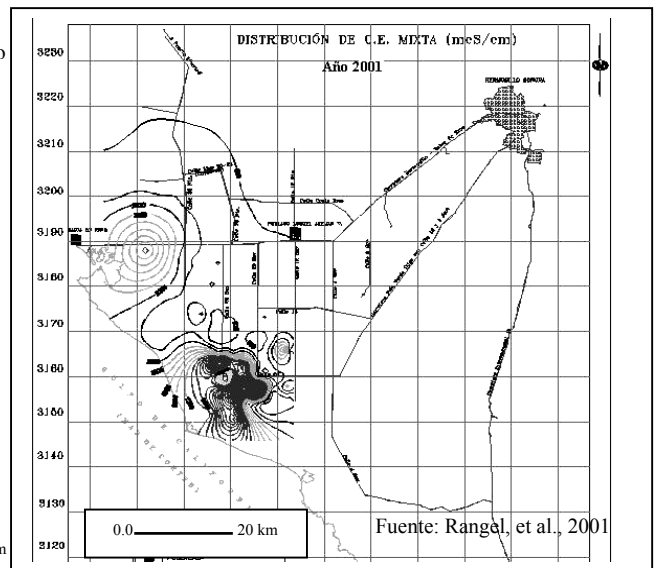
muestra, así como las Coordenadas UTM con un equipo de posicionamiento Garmin GPS 100 SRVY II (Tabla 1). Con la CE mixta (medida a boca de pozo) se obtuvo la distribución de la salinidad del agua de mezcla, representativa de la columna en las tres zonas de; a) intrusión, b) interfase y c) agua dulce del acuífero (Figura 19).

Figura 18. Red de monitoreo de agua



Fuente: Rangel, et al., 2001

Figura 19. CE Mixta ($\mu\text{S}/\text{cm}$)



Fuente: Rangel, et al., 2001

La configuración de la CE mixta muestra una distribución espacial que coincide muy cercanamente con la hidrodinámica del sistema, ya que responde al cono de abatimiento que ha modificado e inducido al flujo subterráneo hacia la zona de mayor concentración del bombeo, esto confirma los patrones advectivos citados por Flores et al. (1998). La mayor concentración de la salinidad utilizando los diagramas de Stiff (familia sódico clorurada), se observa entre las calles 28 y 36 sur (Figura 19), entre 10 y 20 km

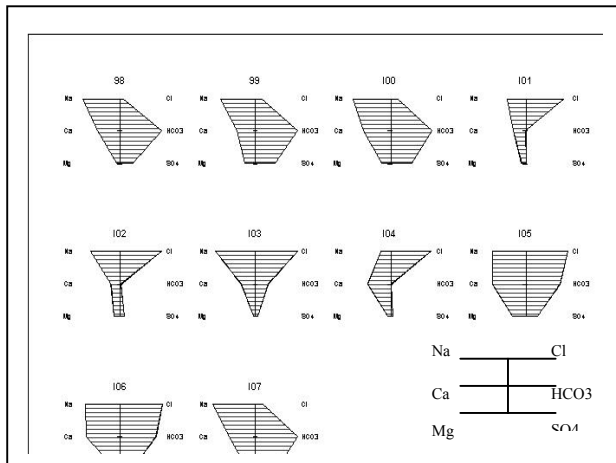
de la línea de costa, si bien la mezcla de aguas se aprecia hasta la calle 20 (30 km de la costa) y predomina agua dulce (cálcica bicarbonatada) entre la calle 12 y 20 (a 35 y 45 km de la costa) (Figura 20).

Esta distribución de la salinidad, en términos de la CE, es igualmente consistente con la obtenida para sólidos totales disueltos (STD) y confirma las tres zonas de salinidad, según la clasificación simple de Custodio (1976): 1) zona de intrusión de agua marina, más de 10,000

mg/lit; 2) zona de interfase de agua salina, entre 1000 y 10,000 mg/lit; y 3) zona de agua dulce con menos de 1000 mg/lit (Figura 21). La calidad del

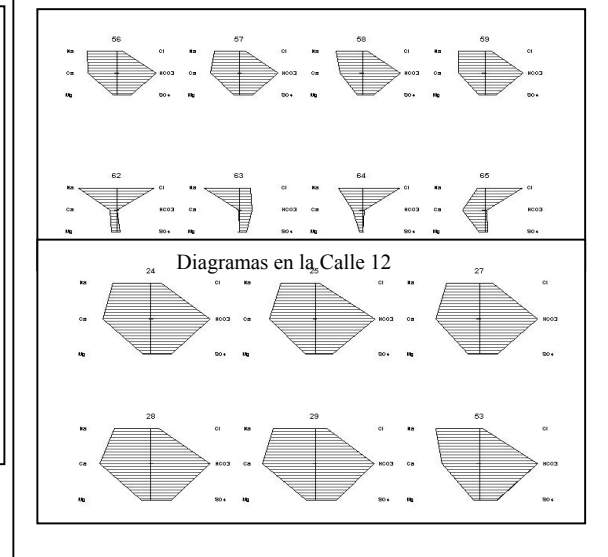
agua dulce representativa del acuífero, en términos de STD tiene 350 mg/lit.

Figura 19. Diagramas de Stiff, Calle 36 y 28



Fuente: Rangel, et al. 2000

Figura 20. Diagramas de Stiff, entre Calles 20 y 28

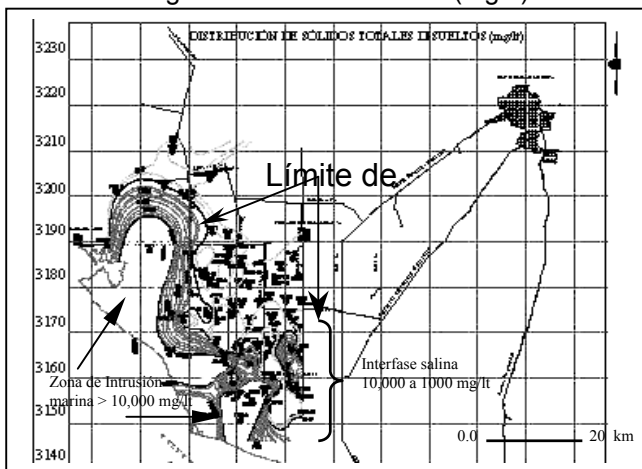


Si se compara la salinidad de los años 1975 y 2000 se observa la evolución de la salinidad en el tiempo en la faja costera (Figura 21 y 22). Para el primer caso, la calidad del agua no rebasaba 1500 mg/lit en las zonas con mayor salinidad, mientras que para el año 2000 la invasión salina ocupa ese espacio con más de 10,000 mg/lit.

y mediciones directas de la resistividad del fluido, obtenidas en los 30 pozos de monitoreo por Morales, et al. (2000) (Figura 23 y 24), se pueden trazar las rutas preferenciales de entrada de agua marina hacia el continente, que fueron a su vez correlacionadas, para obtener un primer modelo de migración de la salinidad del agua del acuífero para las profundidades de 60 y 100 metros respectivamente, lo que resultó igualmente consistente con las configuraciones obtenidas con la CEV.

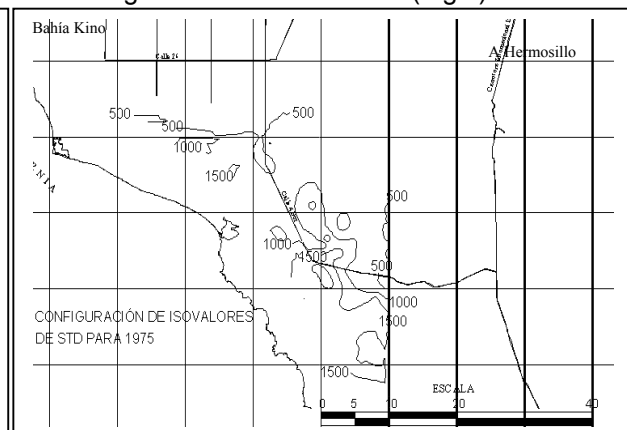
Al correlacionar la geoquímica del agua con resultados de resistividad profunda, sondeos electromagnéticos (método TEM), la gravimetría

Figura 21. STD Año 2000 (mg/lit)



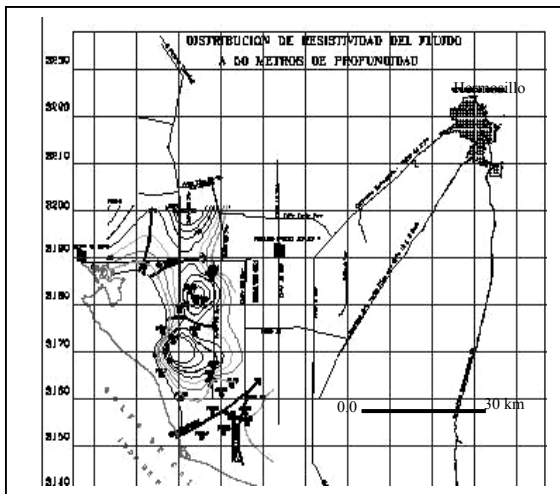
Fuente: Rangel, et al., 2000

Figura 22. STD Año 1975 (mg/lit)



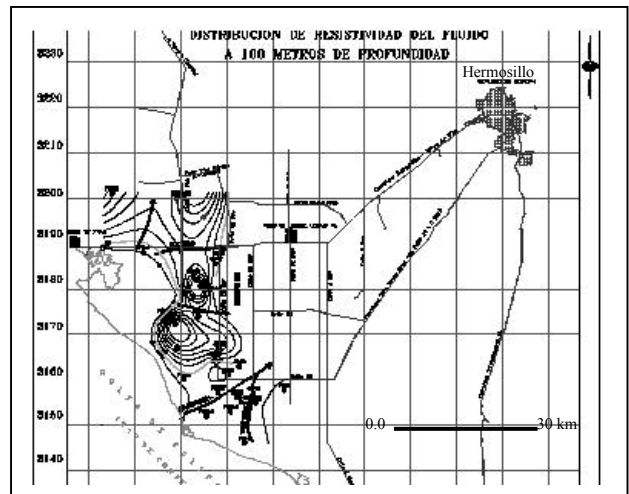
Fuente: Oroz, 2001

Figura 23. Resistividad del fluido a 60 m



Morales, et al., 2000

Figura 24. Resistividad del fluido a 100 m



Para completar la distribución tridimensional y confirmar los espesores de agua salina en el acuífero, se utilizaron los resultados de registros de Conductividad Eléctrica Vertical (CEV) de pozos, que se agruparon para su análisis hidrogeológico en tres tipos de acuerdo con el comportamiento observado (Figura 25):

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

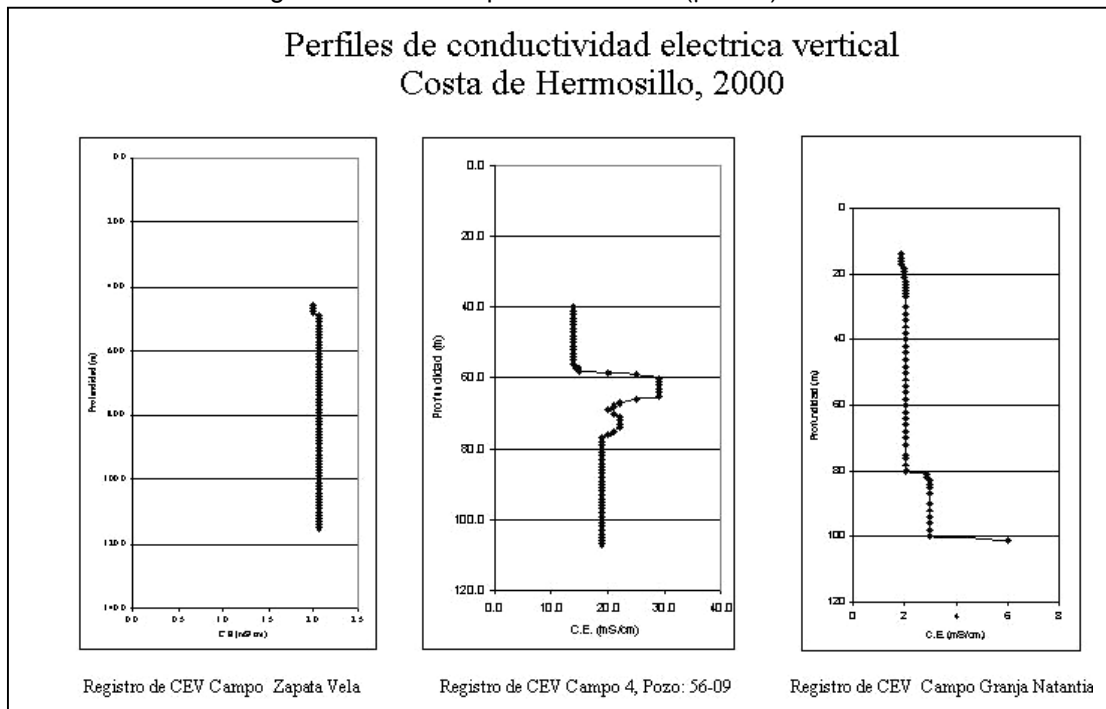
Pozos con salinidad uniforme. Los pozos identificados con esta categoría, tienen salinidad uniforme y muestran homogeneidad de los valores de CEV a todo lo largo de la columna registrada. Su ubicación está entre la calle 20 y 12 (entre 35 y 45 km de la costa). Los casos típicos son los pozos PHB-15, PH-B-17, 20-17; MD-01; 35-04; PO-1; SPR México; PB-01; MD-06 y 35-04 (Figura 28). Con excepción del pozo PHB-17 que muestra agua salobre (4,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en toda su columna, el resto tiene agua que varía entre 450 (pozo 35-04) y 1050 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (PHB-15). La profundidad de los pozos es variable, ya que van desde 70 m en el pozo 20-17, hasta 432 m en el PHB-15.

Pozos con salinidad estratificada. Los pozos agrupados en esta categoría, muestran salinidad menor en los primeros metros de registro,

incrementan fuertemente su salinidad, y aumenta luego de un intervalo de espesor variable (pozos 56-01, 55-05, 49-11). Estos pozos en el nivel estático inician con agua de calidad salobre ($>1500 \mu\text{S}/\text{cm}$) que se 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 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 30,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos pozos se encuentran en la franja de intrusión marina, entre las calles 36 y 28 (10 a 15 km de la costa).

Pozos con interfase salina. La mayoría de los pozos registrados se agrupan en esta clasificación. Muestran salinidades bajas, o agua dulce desde el nivel estático y se incrementa con la profundidad, hasta alcanzar valores de alta salinidad ($> 5,000 \mu\text{S}/\text{cm}$). Este comportamiento se considera como el típico del acuífero y es más marcado en zonas donde el acuífero muestra mayor permeabilidad, generalmente próximos a la influencia del paleocauce del río Sonora, frente a Punta Baja, al sur del área de estudio.

Figura 25. Perfiles típicos de la CEV ($\mu\text{S/cm}$)

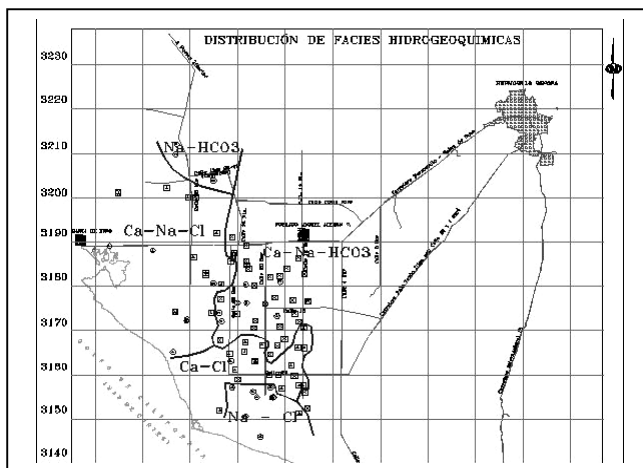


Rangel et al., 2000

La distribución de las familias de agua define claramente la penetración alcanzada por el agua salina (Figura 26). Utilizando la clasificación de Piper se reconocen seis familias de agua, predominan los tipos bicarbonatada cálcica, representativa del agua dulce del

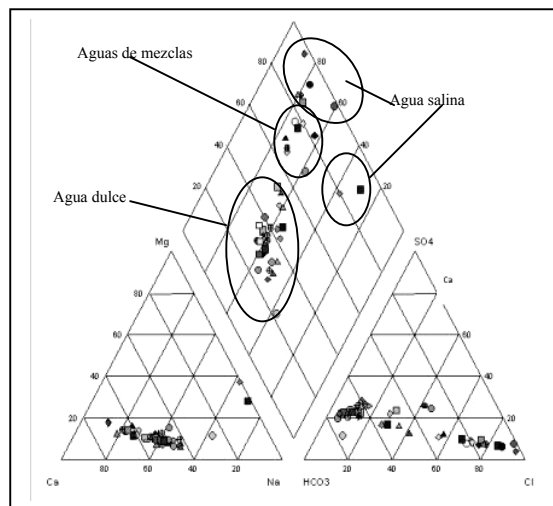
acuífero y clorurada sódico-cálcica, reflejo de la zona de mezcla de aguas salina y dulce en la zona de interfase (Figura 27 y 28). Igualmente la distribución coincide con las rutas de migración de la intrusión marina obtenidas con la CE y la resistividad del fluido.

Figura 26. Distribución de Familias de agua



Fuente: Rangel, et al., 2000

Figura 28. Familias de agua (Diagrama Piper)



Fuente: Rangel, et al., 2000

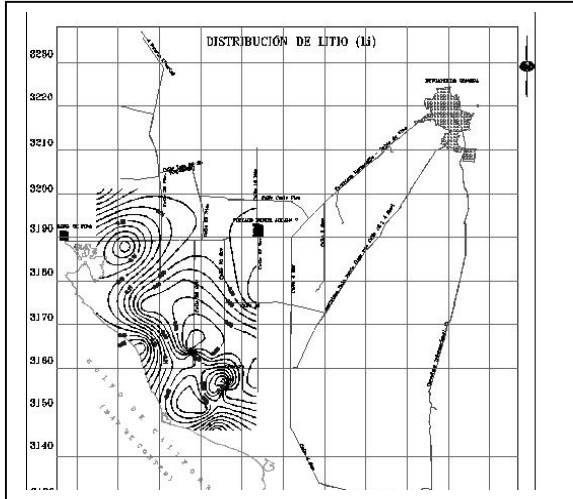
Figura 27. Familias de agua. Clasificación de Piper

| | |
|--------------------------------|------------------------------|
| 1) $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ | Bicarbonatada Cálcica |
| 2) $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$ | Bicarbonatada cálcico-sódica |
| 3) $\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$ | Bicarbonatada sódico-cálcica |
| 4) Cl-Ca | Clorurada cálcica |
| 5) Cl-Ca-Na | Clorurada cálcico-sódica |
| 6) Cl-Na | Clorurada sódica |

De igual manera los valores máximos de trazas como cloruros, bromuros, estroncio, litio y boro, elementos conservativos abundantes en el agua de mar, utilizados como trazadores (Custodio, 1976), permiten observar claramente las zonas de mayor penetración de la intrusión marina. (Figura 29, 30 y 31). Al norte su mayor

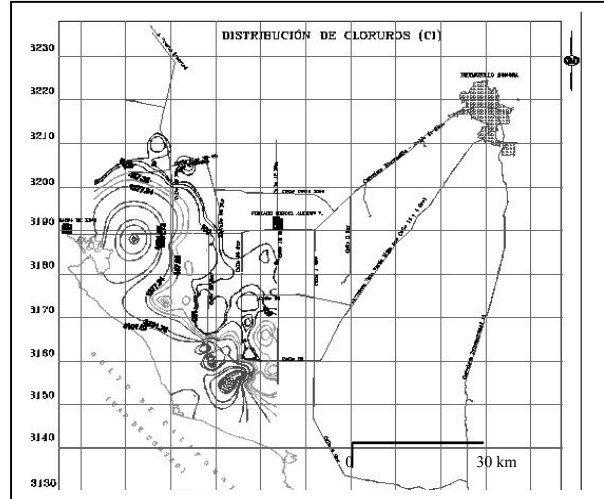
concentración se observa entre las calles 20 y 28 como respuesta a la migración de la mezcla de agua salada que ha sido inducida desde el estero de Bahía Kino. Al sur las zonas de mayor concentración son una respuesta a la penetración del agua marina por la zona de Punta Baja.

Figura 29. Litio (mg/lt)



Fuente: Rangel, et al., 2000

Figura 30 Cloruros (mg/lt)

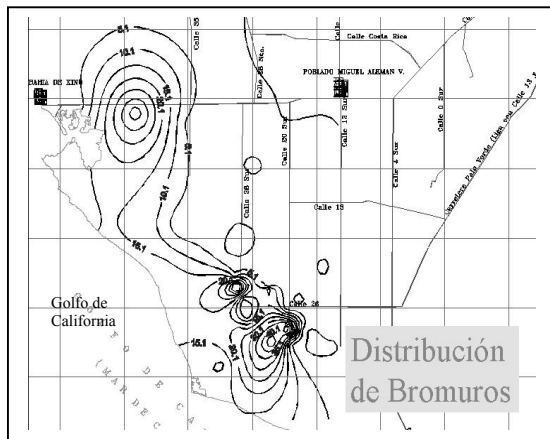


Fuente: Rangel, et al., 2000

De igual el patrón de distribución es muy semejante al configurar la relación $rCl/rHCO_3$ y es aún mas notoria la forma en que el

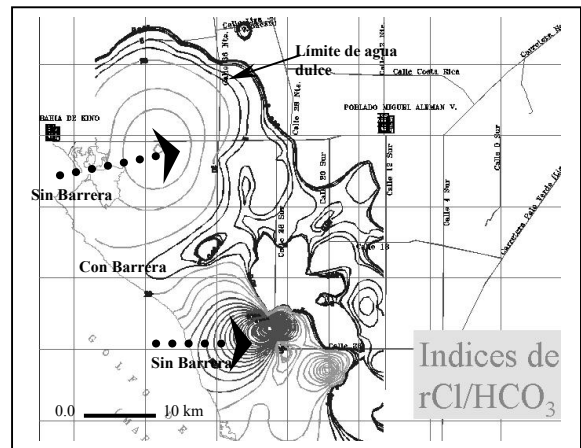
basamento puede actuar como zona vulnerable o barrera al flujo de agua marina (Figura 32).

Figura 31. Bromuros (mg/lt)



Fuente: Rangel, et al., 2000

Figura 32. Relación $rCl/rHCO_3$



Finalmente para confirmar las rutas de penetración del agua marina se seleccionaron pozos con diferente salinidad de acuerdo con la jerarquía de APHA (1995) y se ubicaron con su posicionamiento georeferenciado, correlacionándolos con la geoquímica del agua, la geofísica y la hidrodinámica del acuífero. Siguiendo el posicionamiento de los pozos se

obtuvo el trazo de las rutas de intrusión marina (figura 33 y 34).

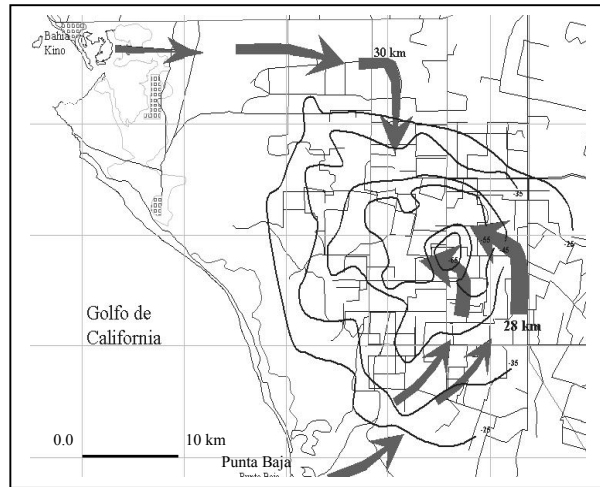
La configuración resultante muestra dos zonas de penetración predominantes, Bahía de Kino y Punta Baja, con un alcance de hasta 32 y 28 km respectivamente. En ambos casos, su trazo tiene tendencia hacia la ubicación del cono de abatimiento, del cual se induce al flujo salino hacia el centro del cono.

Figura 33. CE de pozos intrusionados

| Agua Salobre | | Intrusión Marina | |
|--------------|-------|------------------|--------|
| Pozo | C.E. | Pozo | C.E. |
| 56-09 | 2,606 | 49-16 | 14,123 |
| 50-18 | 3,563 | 49-11 | 40,800 |
| 50-06 | 1,956 | PM-4 | 8,960 |
| 43-10 | 1,970 | PCH-3 | 17,770 |
| 49-06 | 1,643 | PCH-5 | 7,670 |
| 50-01 | 4,400 | PCH-7 | 14,670 |
| PM-5 | 3,620 | PCH-8 | 38,000 |
| MD-03 | 2,800 | 55-05 | 39,800 |
| 42-04 | 2,630 | 49-13 | 31,700 |
| 49-01 | 4,040 | 49-16 | 10,500 |
| 25-05 | 1,492 | PM-1 | 22,400 |
| 50-01 | 6,973 | PM-2 | 14,000 |
| | | PCH-2 | 7,940 |

Fuente: Rangel, et al., 2000

Figura 34. Rutas de intrusión marina



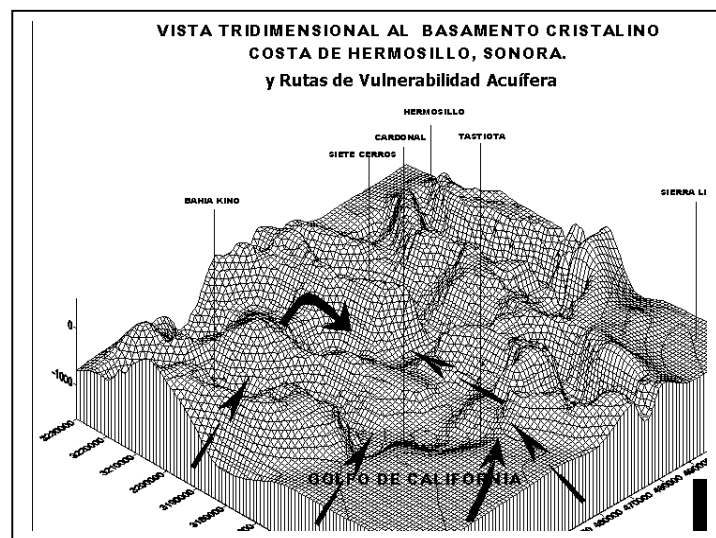
Fuente: Rangel, et al., 2000

Utilizando el esquema tridimensional del basamento cristalino (Morales, et al. 2000), se observa que las rutas coinciden con los bajos gravimétricos, lo que explica el porqué de la mayor facilidad de penetración del flujo marino por estas zonas preferenciales (Figura 35).

La integración de los perfiles de resistividad, los TEM, la hidroestratigrafía y la CEV, definen con claridad la pluma de intrusión

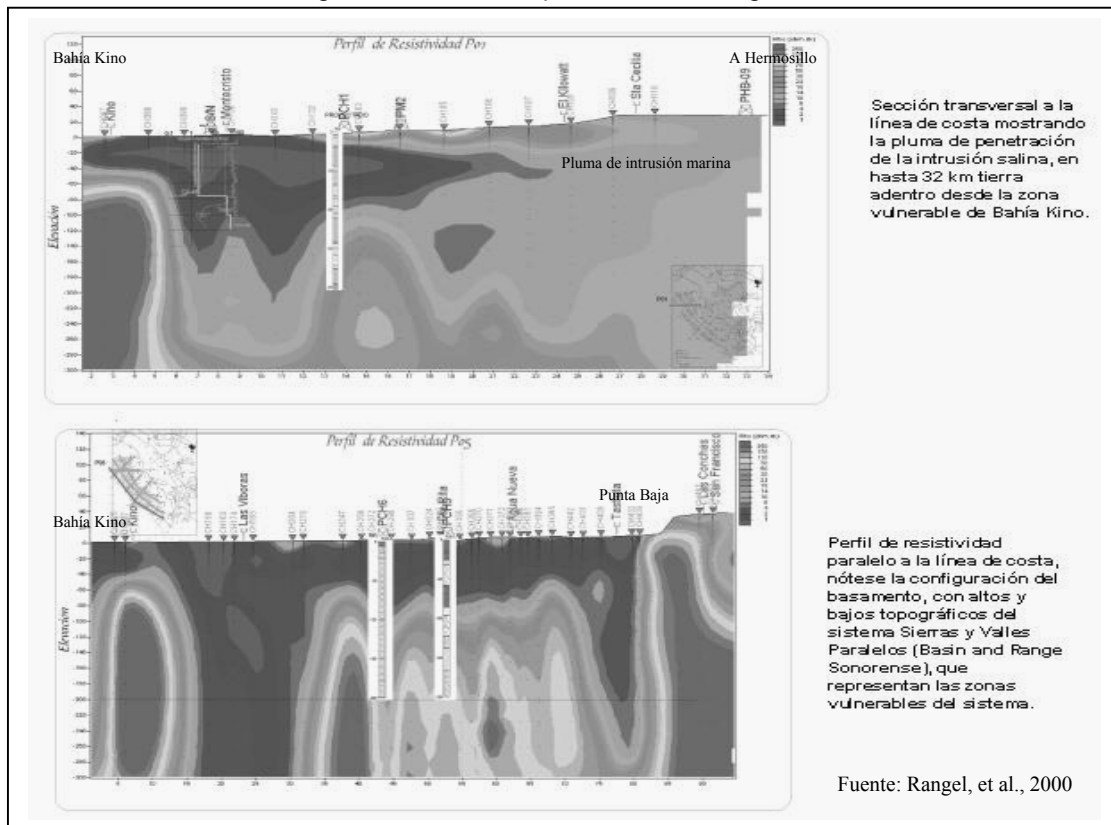
salina, mostrada en la figura 36 en color más oscuro, la cual se ha formado en sentido transversal a la línea de costa, así como el espesor alcanzado. De igual manera se aprecia la topografía del basamento con vista al N-NW. La sección paralela a la línea de costa, muestra los bajos y altos topográficos, ubicados en las áreas de Bahía Kino y Punta Baja.

Figura 35. Rutas de Vulnerabilidad acuífera



Modificado de Morales et al. (2000)

Figura 36. Pluma de penetración del agua de mar



COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DE LAS AGUAS

Se analizaron 22 muestras por concentraciones isotópicas de hidrógeno y oxígeno, medidas por espectrometría de masas 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, asegurando una incertidumbre de $\pm 1 ‰$.

Además, se integraron a la base datos, resultados de referencias nacionales e internacionales publicados por IFUNAM (1976); Payne (1980) y Rangel (2000a). Las concentraciones isotópicas están expresadas como la abundancia relativa en partes por mil de acuerdo con la práctica aceptada. La referencia para ambos isótopos, es la relación oxígeno-18/oxígeno-16 y deuterio/hidrógeno del Viena Standard Mean Ocean Water (V-SMOW).

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.

La información integró muestras que caracterizan aguas próximas al Río Sonora,

gradiente arriba de la Costa de Hermosillo. Incluyen agua superficial del Río Sonora y de los acuíferos que dependen de su cauce como Ures, Santa Rosalía, La Poza, El Sahuaral, San Miguel de Horcasitas, El Zanjón y Aconchi. Con el objeto de observar diferencias y coincidencias entre los tipos de aguas. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Los resultados muestran valores negativos comparados con el estándar del agua de los océanos, dado que el agua está enriquecida en isótopos ligeros. 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 $\delta^{18}O$ en el agua de la precipitación meteórica (Figura 37). La composición isotópica de, virtualmente toda la precipitación moderna (Friedman, 1953; Craig, 1961b; Dansgaard, 1964), cae a lo largo de una recta conocida como Línea Meteórica mundial cuya ecuación es: $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$. El efecto es, en términos simples, una respuesta a la temperatura superficial que produce evaporación la cual quedará isotópicamente registrada como un dato a la derecha de la línea meteórica promedio en el diagrama $\delta^{18}O$ vs δD .

Tabla 4. Resultados de análisis isotópicos.

| No Orden | Muestra | dD | d18-O | Fecha | No Orden | Muestra | dD | d18-O | Fecha |
|----------|----------|------|-------|--------|----------|------------|------|-------|--------|
| 10 | 12/20-12 | -46 | -6.8 | Jun-00 | 1502 | Costa | -47 | -6.8 | Jun-80 |
| 13 | 12/20-15 | -45 | -6.6 | Jun-00 | 3214 | " | -48 | -6.5 | Jun-80 |
| 31 | 20/28-01 | -42 | -5.9 | Jun-00 | 409 | " | -6.3 | -42 | Jun-80 |
| 49 | 20/28-24 | -50 | -7 | Jun-00 | 2003 | " | -45 | -6.4 | Jun-80 |
| 56 | 20/28-36 | -47 | -6.9 | Jun-00 | 4408 | " | -48 | -6.9 | Jun-80 |
| 57 | 20/28-37 | -48 | -6.8 | Jun-00 | 4909 | " | -49 | -6.9 | Jun-80 |
| 58 | 20/28-42 | -46 | -6.8 | Jun-00 | 5012 | PHB-15 | -62 | -8.4 | Jun-80 |
| 62 | MD-04 | -12 | -2 | Jun-00 | | Ac.Ures | -36 | -5.4 | Jun-80 |
| 63 | MD-10 | -6.2 | -9.2 | Jun-00 | | Ac Aconch | -42 | -6 | Jun-80 |
| 68 | 36/09 | -46 | -7 | Jun-00 | | Río Sonora | -36 | -5 | Jun-80 |
| 71 | 36-14 | -49 | -6.6 | Jun-00 | | kino mar | 2 | 1 | Jun-80 |
| 72 | 36-15 | -48 | -6.7 | Jun-00 | pch-2 | Costa | -40 | -6 | Jun-80 |
| 82 | MD-02 | -49 | -6.9 | Jun-00 | pch-4 | " | -54 | -7 | Jun-80 |
| 83 | MD-03 | -44 | -5.3 | Jun-00 | pch-5 | " | -47 | -6.5 | Jun-80 |
| 84 | MD-05 | -20 | -3.1 | Jun-00 | pch-6 | " | -13 | -1.4 | Jun-80 |
| 85 | MD-06 | -46 | -6.9 | Jun-00 | pch-7 | " | -32 | -4.3 | Jun-80 |
| 86 | MD-07 | -46 | -6.7 | Jun-00 | pch-8 | " | 15 | -2 | Jun-80 |
| 87 | MD-08 | -46 | -6.6 | Jun-00 | pch-9 | " | -6.4 | -45 | Jun-80 |
| 88 | MD-09 | -26 | -3.1 | Jun-00 | G.Calif. | mar | 0.8 | -0.37 | Ene-70 |
| 94 | 36-6 | -48 | -6.6 | Jun-00 | G.Calif. | mar | 1 | 0.02 | Oct-68 |
| 95 | 36-8 | -47 | -6.8 | Jun-00 | G.Calif. | mar | 1.7 | -0.47 | Oct-68 |
| 98 | 36-18 | -43 | -6.3 | Jun-00 | 1502 | | -47 | -6.8 | Jun-80 |

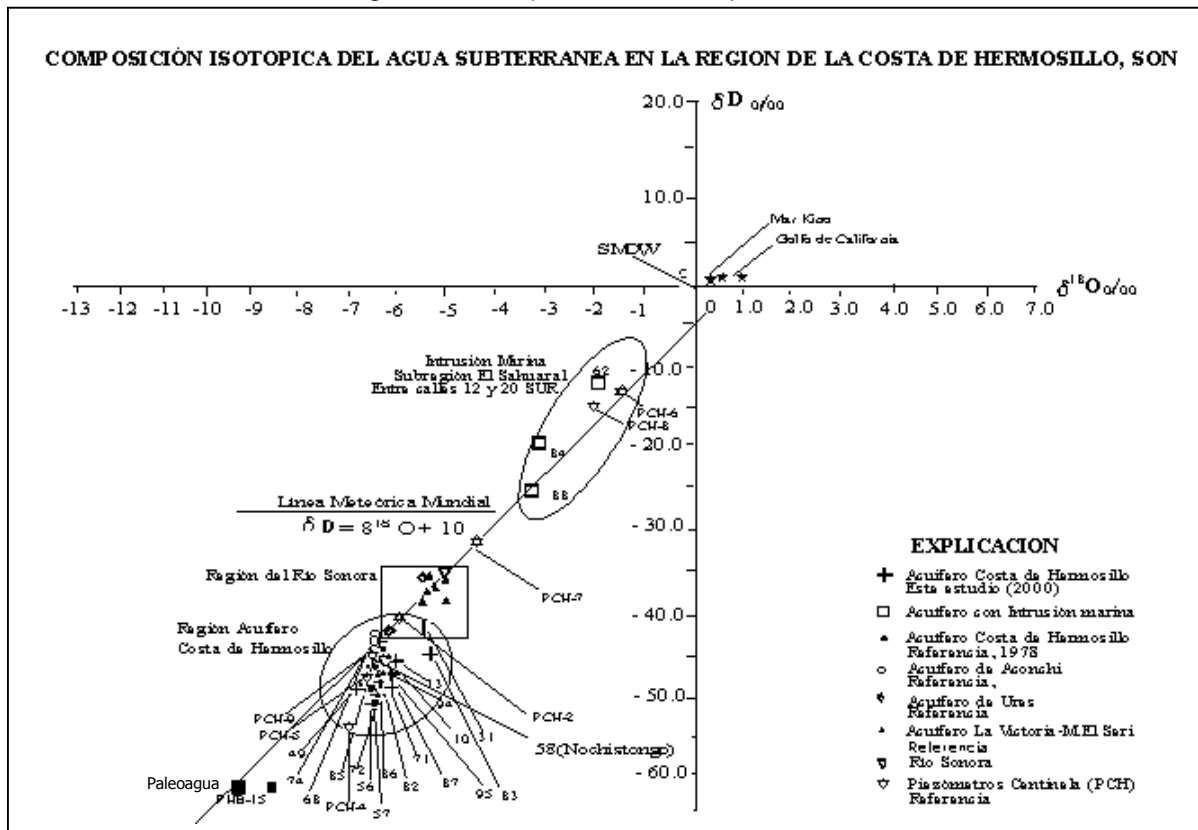
Con la posición de los valores isotópicos de deuterio y oxígeno del agua subterránea respecto a la línea meteórica mundial, pueden hacerse las siguientes observaciones:

- Los valores que representan las aguas subterráneas de la Costa de Hermosillo pueden describirse satisfactoriamente por una recta cuya ecuación es $\delta D = 6.3681^{18}O - 3.9779$, valores acordes con una región de condiciones climáticas áridas (Figura 37).
- Las concentraciones isotópicas de las muestras de agua ubicadas en acuíferos próximos al Río Sonora presentan grados de evaporación que sugieren que son afectadas por una evaporación rápida, típicamente desértica, de los cuales de acuerdo con lo

esperado se desprende que tienen al Río Sonora por origen. Sus promedios típicos se agrupan en $\delta D = -54.9 \text{ ‰}$; $\delta^{18}O = -4.9 \text{ ‰}$. Estas aguas son de reciente infiltración y están sujetas a variaciones estacionales.

- 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 estrecho. Consecuentemente se infiere una cierta constancia de los valores isotópicos durante el lapso 1978-2000. Esto permite tipificar el agua del acuífero de la Costa de Hermosillo por sus promedios isotópicos: $\delta D = -45.17 \text{ ‰}$; $\delta^{18}O = -6.39 \text{ ‰}$, lo que se percibe como estabilidad isotópica.

Figura 37. Composición de isótopos estables



Fuente: Rangel, 2000b

CONCLUSIONES Y DISCUSION

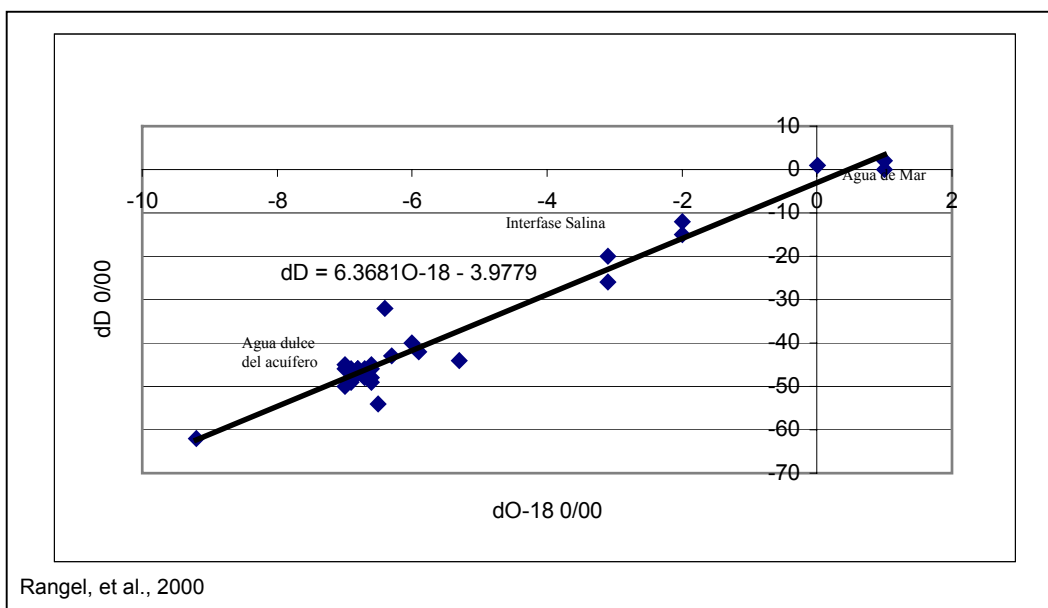
El sistema acuífero Costa de Hermosillo obedece al patrón estructural derivado de la neotectónica del Basin and Range Sonorense el cual actúa en la distribución, almacenamiento y movimiento del flujo subterráneo ya que rellena las fosas resultantes tanto al norte como al sur de la cuenca baja. El esquema tridimensional del basamento muestra la alternancia de fosas y pilares orientados NW-SE, la intrusión marina se lleva a cabo a lo largo de tres de estas fosas, que actúan como zonas de alta vulnerabilidad, localizadas en el estero de Bahía Kino, estero El Cardonal (Punta Baja) y estero de Tastiota. La intrusión salina actúa como una recarga proveniente del mar con 98 Hm³ y está siendo inducida hacia el centro del acuífero, donde históricamente se ha concentrado el bombeo.

En el área de estudio, en las zonas de entrada de recarga y en los acuíferos aledaños al de la Costa de Hermosillo, la familia dominante de acuerdo con Piper y Stiff es de tipo Na-HCO₃, seguida de la familia Ca-HCO₃ típico de acuíferos en aluviones, con algunas variaciones a mixta. En una franja costera de entre 20 y 40 km en Punta Baja y frente a Bahía Kino prevalecen las aguas del tipo Clorurada Cálcica y Clorurada Sódica. Típicas de la franja costera influenciada por la intrusión salina.

La intrusión de agua salina ha penetrado gran parte del acuífero, por el noroeste (Estero de Kino) en hasta 30 km y por el sur del área de estudio en más de 20 km (El Sahuaral). Esta intrusión, no ha respondido a la reducción del bombeo y avanza por las rutas mencionadas, atraída por su inducción, hacia el centro del acuífero. Ello sugiere que de continuar con las condiciones actuales, la intrusión marina continuará hasta mezclarse completamente con el agua de dulce del acuífero.

Las muestras que representan el avance de la intrusión salina tienen valores isotópicos promedio de δD = -18.25 ‰; δ¹⁸O = -2 ‰. Se encuentran ubicadas al sur, frente a Punta Baja y al norte, frente a Bahía Kino, donde el agua subterránea presenta un exceso de deuterio que sugiere una zona de mezcla de aguas que corresponde con la ruta de recarga de agua marina. La relación del contenido de Cloruros contra δ¹⁸O es consistente también con esta afirmación, los grupos de agua están claramente definidos por estos parámetros, como una función lineal que se ajusta a una recta cuya ecuación es δD = -6.3681 δ¹⁸O - 3.9779 (Figura 38).

Figura 38. Composición isotópica del agua subterránea de la Costa de Hermosillo.



El pozo de observación PHB-15, con 1000 m de profundidad, sellado desde la superficie hasta 380 m, presenta una concentración isotópica promedio de $\delta D = -62$ ‰; $\delta^{18}O = -8.8$ ‰. 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 caracterización isotópica sugiere que se trata de aguas muy antiguas, o fósiles, entrampadas sin recarga, cuyo origen se dio bajo condiciones climáticas más frías y más húmedas que las actuales. Ninguna otra agua de pozo obtuvo concentración isotópica similar, el resto se agrupa en torno a una sola familia isotópica, cuyo origen es meteórico, con la concentración típica del acuífero de $\delta D = -46$ ‰; $\delta^{18}O = -6.8$ ‰. Estos datos muestran una evaporación más alta que la paleoagua, lo cual acentúa más su diferencia de origen y sugiere una respuesta al promedio anual de la temperatura y a la escasa precipitación en la región. 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 2.1 U.T, lo que sugiere que las aguas son de origen meteórico, pero tienen más de 50 años de haberse infiltrado (Figura 37).

La geoquímica apoya esta interpretación, dado que el agua antigua del PHB-15 está casi libre de calcio y magnesio (2.2 y 0.4 mg/lit), para cumplir con lo anterior, 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, lo que sugiere que esta agua tuvo su origen en los periodos interglaciares de hace 50,000 a 10,000 años, periodo durante el cual quedó entrampada.

Todo ello sugiere que no existen dos diferentes acuíferos, sino semiconfinamientos dentro de un solo acuífero y por debajo de este, se encuentra el agua fósil almacenada en rocas volcánicas.

El agua de la intrusión de agua salina tienen valor isotópico promedio de $\delta D = -18.25$ ‰; $\delta^{18}O = -2$ ‰, ubicadas al sur del área de estudio, en la zona del Sahuaral, frente a Punta Baja confirmando las rutas de penetración. Hacia el norte del área de estudio, frente a Bahía Kino, el agua muestra un exceso de deuterio que sugiere una zona de mezcla de aguas que corresponde con la otra ruta de recarga de agua marina, lo cual es consistente con la geoquímica del agua, con la relación del contenido de cloruros contra $\delta^{18}O$ y con los perfiles de conductividad.

La determinación de edades relativas por el método del Carbono-14, confirman la diferencia en orígenes para las aguas subterráneas. El agua del acuífero aluvial, varía entre 2,751 a $4,630 \pm 30$ a 50 años. La localización de la edad más antigua se encuentra entre la calle 20 y 28, ubicación que coincide con la fosa más profunda que conforma la topografía del basamento. En cambio la paleoagua tiene una edad que varía entre 25,820 y $30,000 \pm 190$ años. Lo que sugiere que esta agua tuvo su recarga durante periodos interglaciares, actualmente no tiene recarga, se puede considerar fósil y se encuentra entrampada, por lo que es un recurso finito que requiere ser evaluado antes de pretender explotarla.

BIBLIOGRAFÍA

- 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
- ARREGUIN, J., G., FIGUEROA and S. PEÑA, 1968 (Ariel Construcciones, S.A. de C.V.) 1968. Estudio hidrogeológico completo de los acuíferos de la Costa de Hermosillo, Sonora, México: Secretaria de Recursos Hidráulicos, Informe inédito, 220 p.
- ASTIER J.L., 1882. Geofísica aplicada a la Hidrogeología. Editorial Paraninfo. Madrid, España. 343 p.
- CASTILLO G.J., M.A. RÍOS R.A. GUTIÉRREZ, 1999. La sobreexplotación de los acuíferos en Sonora. Memorias del III Seminario sobre Acuíferos Costeros de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.
- CASTILLO, G.J., M., RANGEL, MORALES, M., R. Monreal, 2000, II Foro del Agua, Resúmenes, UNISON-AIMMGM. Octubre, 2000. Hermosillo, Son.
- 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.
- 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.
- 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, 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.
- CRAIG, H., 1957. Isotopic Standards for Carbon and Oxygen and Correction Factors for Mass-Spectrometric An. of Carbon Dioxide; *Geochem. Et Cosmoch. 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.
- CHAVEZ G. R. . 1986. Geohidrología. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- CSERNA, Z. de, (1989), An outline of the geology of Mexico, in Bally, A.W. and Palmer, A.R., eds., *The geology of North America, an over view: Boulder Colorado, Geol. Soc. of Am., The geology of North America, V.A., p233-264.*
- DANSGAARD, W., 1964. Stable Isotopes in precipitation. *Tellus*, 16: 436-468.
- 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.
- 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, 364p.
- 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).

- 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, Son, Méx: A numerical simulation. *Geofísica Internacional*, vol. 37, Num. 3, pp 133-151. UNAM.
- FORKASIEWICZ J. 1972. Interpretation des données de pompages d'essai pour l'évaluation des paramètres des aquifères. Bureau des Recherches Géologiques et Minières. 72sgn273Ame. Orleans. Francia.
- 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.
- GAT, R.J., 1975. Comments on the stable isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea Area, *Water Resour.* 7: 980-993.
- 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.
- 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.
- HEM, J., 1978. 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.
- 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. UNAM, México.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA, 1993, Estudio hidrológico del estado de Sonora. México.
- JIMENEZ 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.
- 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.
- MARÍN, L.E., STEINICH, G. VELÁSQUEZ, I. SIMÓN and R. GONZALEZ, 1996. Caracterización geoquímica de los sistemas de flujo del Valle de Hermosillo, Sonora, Informe final, Instituto de Geofísica, UNAM, 74 pp.
- MARON, S.H. and PRUTTON, K.F., 1939. 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.
- 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.
- MONREAL, R., M., MORALES, M., RANGEL, J., CASTILLO, 2000, Hidroestratigrafía y modelo geológico conceptual de la Costa de Hermosillo, Son. II Foro del Agua, Resúmenes, UNISON-AIMMGM. Octubre, 2000. Hermosillo, Son.
- OROZ, L.A., 2001, Modelo Conceptual Hidrogeológico e Hidrogeoquímico de la Costa de Hermosillo, Tesis Profesional, UNISON.
- ORELLANA E., 1982. Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. Editorial Paraninfo. Madrid, España. 578 p.
- 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.
- RANGEL, M. M., 1996, Delimitación de los Elementos Fisiográficos de la Cuenca Baja del Río Sonora, Seminario de Investigación de Tesis, Inédito, UNISON.
- RANGEL, M. M., 1997, Geología Y Analisis Estructural de la Cuenca Hidrografica del Río Sonora y Modelo Preliminar Estratigrafico de su Planicie Deltaica. Seminario de Investigación de Tesis, Inédito, UNISON
- RANGEL, M. M., 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.
- RANGEL, M. M., 2000b. Nuevas Aportaciones Para El Entendimiento Del Modelo Hidrogeologico de la Costa de Hermosillo, Utilizando Isótopos Ambientales (O-18; D) y Fechamiento de Agua (C-14). II Reunión Nal. de Ciencias de la Tierra, Vallarta , Jal.
- RANGEL, M. M., R., RODRÍGUEZ-TORRES, 2000, Interpretacion de Modelos Cartográficos Numéricos del Levantamiento de las Hojas H12-8 Y H12-11 del Levantamiento Aeromagnetométrico del COREMI en el Estado de Sonora. II Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, Pto. Vallarta , Jal., Resúmenes.
- RANGEL, M. M., A., CORTÉS, 2000. Contributions on the isotopic characterization of the Coast of Hermosillo aquifer and its relation with the marine intrusion, Sonora, Mexico. Proceedings, GSA, Reno Nevada, EUA.
- RANGEL, M. 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 Geoq., Ensenada, B.C.
- RODRÍGUEZ D. B. y E. PÉREZ ROMERO. 1991. Estudio hidrogeoquímico de la Costa de Hermosillo y el Valle de Guaymas en el Estado de Sonora. Instituto Politécnico Nacional. México. D.F.
- 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 Inedito.
- SANDERS L.L. 1998. A Manual of Field Hydrogeology. Prentice Hall. Northeastern Illinois University. U.S.A.
- SCHOELLER, H. 1935. Utilitie 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.
- STEINICH, B., SIMÓN, V., CHAVARRÍA, V.A., 1997. Estudio de la intrusion salina en la franja costera en el valle de Hermosillo y el Sahuaral, Sonora. Informe Final, IGFUNAM, Cd. Universitaria. México, D.F.
- 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.
- 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.