

HIDROGEOLOGÍA DE ACUÍFEROS COSTEROS
HYDROGEOLOGY OF COASTAL AQUIFERS
HYDROGÉOLOGIE DES NAPPES CÔTIÈRES

APLICACIÓN DE DIFERENTES METODOS PARA ESTUDIAR LA INTRUSIÓN SALINA EN ACUÍFEROS DE SONORA, MEXICO

José Castillo Gurrola

D.E.A. Profesor de la Universidad de Sonora. México.
jcg@rtn.uson.mx

RESUMEN

Se han aplicado diferentes métodos para el estudio de la intrusión salina en los acuíferos costeros de Sonora, México. Los métodos son los siguientes: geoquímicos, con énfasis en los análisis de cloruros y bromuros, conductividad eléctrica en pozos; geofísicos como los de resistividad eléctrica verticales (SEV), Transitorio Electromagnético (TEM) y gravimetría (complementario); matemáticos utilizando el modelo SHARP e hidrodinámicos estudiando la evolución de la piezometría y gradientes hidráulicos.

Palabras Claves

Acuíferos; Sonora; México; Intrusión salina; Métodos geoquímicos; Métodos geofísicos; Modelos matemáticos; Métodos hidrodinámicos.

ABSTRACT

Different methods for studying sea water intrusion have been applied on coastal aquifers of Sonora, Mexico. The methods used are: geochemical, with focus on chloride and bromide analysis; geophysical, such as the electrical resistivity (SEV), transient electromagnetic (TEM) and gravimetry (complementary) methods; mathematical, using SHARP models; and hydrodynamic, studying the evolution of piezometry and hydraulic gradients.

Key Words

Aquifers; Sonora; Mexico; Sea water intrusion; Geochemical methods; geophysical methods; Mathematical models; Hydrodynamic methods.

INTRODUCCIÓN

La escasez del recurso agua, aunado a otros fenómenos, ha provocado que la población se concentre en áreas urbanas, que a su vez demanda grandes volúmenes del vital líquido, para satisfacción de sus habitantes.

Algunas prácticas desordenadas que se han hecho en el manejo del agua, limitan el mejoramiento económico y social en la entidad.

En México se tienen identificados 653 Acuíferos de los cuales 100 están sobre explotados.

En Sonora se tienen identificadas 47 zonas geohidrológicas de las cuales cinco están sobre explotadas y con graves problemas de Intrusión Salina.

Actualmente la sociedad en Sonora, está solventando la deuda que tiene con la naturaleza, debido al mal manejo de sus recursos naturales, entre los que se cuenta el *Agua*. No se ha sabido usar adecuadamente y casi todas las regiones del Estado sufren problemas de escasez o de calidad.

El considerable volumen de agua destinado a la agricultura ha provocado en los acuíferos costeros un daño irreversible, debido al abatimiento de los niveles del agua subterránea que la naturaleza ha depositado durante miles de años y la presencia de agua salobre proveniente del mar hacia el continente, conocida como *Intrusión Salina*, que ha venido a perjudicar y en algunos casos a arruinar lo que hace pocos años eran polos de firme economía.

Todas las acciones que se realicen respecto al manejo y preservación del agua deben estar sustentadas en principios de equidad social y equilibrio económico, financiero y ambiental.

Tratando de contribuir con el mejor conocimiento de este fenómeno y buscar soluciones a los problemas del uso y manejo del agua en nuestro Estado, la Universidad de Sonora, apoyada por CONACYT y Comisión Nacional del Agua, ha realizado investigaciones en los acuíferos costeros de Sonora y al mismo tiempo pretende formar recursos humanos que continúen con estos estudios.

Se han aplicado diferentes métodos para estudiar la Intrusión Salina y se propone una estrategia a seguir para identificarla y caracterizarla.

LITERATURA REVISADA

El Agua en México

El problema de sobreexplotación en México es cada vez más grave. De un total de 653 acuíferos, en 1975 eran 32 los que se encontraban sobreexplotados, el número se elevó a 36 en 1981, a 80 en 1985 y a 96 en el 2000 (figura 1). Estos acuíferos suministran cerca del 50% de la extracción anual para todos los usos. Aunque de acuerdo al balance nacional de agua subte-



Figura 1. Acuíferos sobreexplotados en México. Fuente: (CNA, 1995)

rránea, la extracción equivale apenas a un 38% de la recarga, en regiones áridas del país el balance es negativo, minando el recurso a un ritmo de 8 km³/a. Además, otra causa de sobreexplotación es el rápido aumento de demanda de agua en las ciudades, agravada por la ocurrencia de asentamientos diferenciales y agrietamiento del terreno.

Por otra parte, el desarrollo futuro de las regiones afectadas por la sobreexplotación de acuíferos es limitado y será más grave si persiste la tendencia climática de los últimos años, caracterizada por condiciones extremas que incluyen sequías severas, prolongadas y frecuentes, que tienen un impacto negativo sobre la disponibilidad de agua superficial y la recarga de los acuíferos.

En México, la intrusión salina se encuentra presente en 18 acuíferos ubicados en los estados de Baja California, Baja California Sur, Colima, Sonora y Veracruz. Por otra parte, la sobreexplotación encarece la producción de muchos cultivos tradicionales, debido a que en varias zonas de riego los niveles del agua subterránea se han abatido decenas de metros, elevando el costo de extracción, ya que se requieren equipos más potentes con un mayor consumo de energía (CNA, 1995).

El Agua en Sonora

Sonora ocupa un lugar preponderante en el país por su desarrollo económico, basado principalmente en la agricultura y en la ganadería. Situado en la porción más árida del territorio, con una superficie de 182,052

kilómetros cuadrados, correspondiendo a un 9.3 % del área total del país.

La región se caracteriza por su aridez, efecto que conlleva a una vegetación típica y al déficit de humedad en los suelos debido a la escasa precipitación y alta evaporación, existiendo una raquítica distribución de las corrientes superficiales perennes mismas que han sido modificadas en su curso por la construcción de obras hidráulicas. Con una disponibilidad de agua superficial en el conjunto de 23 presas con una capacidad de almacenamiento de 11,000 millones de metros cúbicos.

Existen cuarenta y siete zonas geohidrológicas, identificadas en tres grupos, los acuíferos fronterizos, intermontanos y los costeros (figura 2). Siendo estos últimos los más explotados y los que presentan graves daños irreversibles. Paradójicamente, el mayor desarrollo agrícola se encuentra precisamente en la porción árida del estado donde destacan los distritos de riego de Hermosillo, Guaymas y Caborca, notables por su tecnificación. Los valles de los ríos Yaqui y Mayo, ubicados en la parte sur del estado, presentan condiciones hidrológicas notablemente diferentes a las anteriores. Las cuencas de ambos ríos tienen una gran extensión y en su porción montañosa se generan abundantes escurrimientos superficiales aprovechados para generación de energía eléctrica y desarrollo agrícola. Los distritos de riego establecidos en su planicie costera utilizan principalmente el agua superficial almacenada en grandes presas; pero no siendo suficientes para beneficiar la totalidad de la superficie cultivable, las fuentes subte-

En Sonora se presentan graves problemas hidrológicos derivados de la insuficiente disponibilidad de agua para satisfacer la creciente demanda de este recurso. Durante varias décadas, su progreso ha sido a costa del minado y la contaminación de sus fuentes de agua, dando lugar a una condición no sustentable y a un impacto ambiental que comprometen cada vez más su futuro.

La sobreexplotación se observa en mayor grado en los acuíferos costeros de Caborca, Costa de Hermosillo y Guaymas en donde el abatimiento es de más de cincuenta metros por debajo del nivel del mar. Respecto a la contaminación de los acuíferos de Sonora el problema más serio es el de la intrusión salina, principalmente en el Valle de Guaymas, La Costa de Hermosillo, El Sahuaral y Caborca. Otro tipo de contaminación, lo

viene a ser la presencia de sales en los primeros estratos del suelo, ocasionados por la presencia de elevados mantos freáticos, se han detectado 53 mil hectáreas con ensalitramiento y 12400 con drenaje deficiente, como en el Valle del Yaqui y Mayo, también en Pesqueira y Colonia Morelos; asimismo se han reportado contaminación por elementos menores como bario en el Mátape, flúor en el acuífero de La Victoria al nor-este de Hermosillo, cobre, manganeso y fierro en las cuencas de los ríos Sonora y San Pedro. (Castillo Gurrola, et al 2002).

Intrusión del Agua de Mar

El problema de la intrusión marina empezó a producirse en zonas costeras con alta densidad de población, donde la demanda de agua dulce era apremiante. La creciente salinización de las aguas extraídas de pozos fue notada en Londres y Liverpool en 1855. Hoy

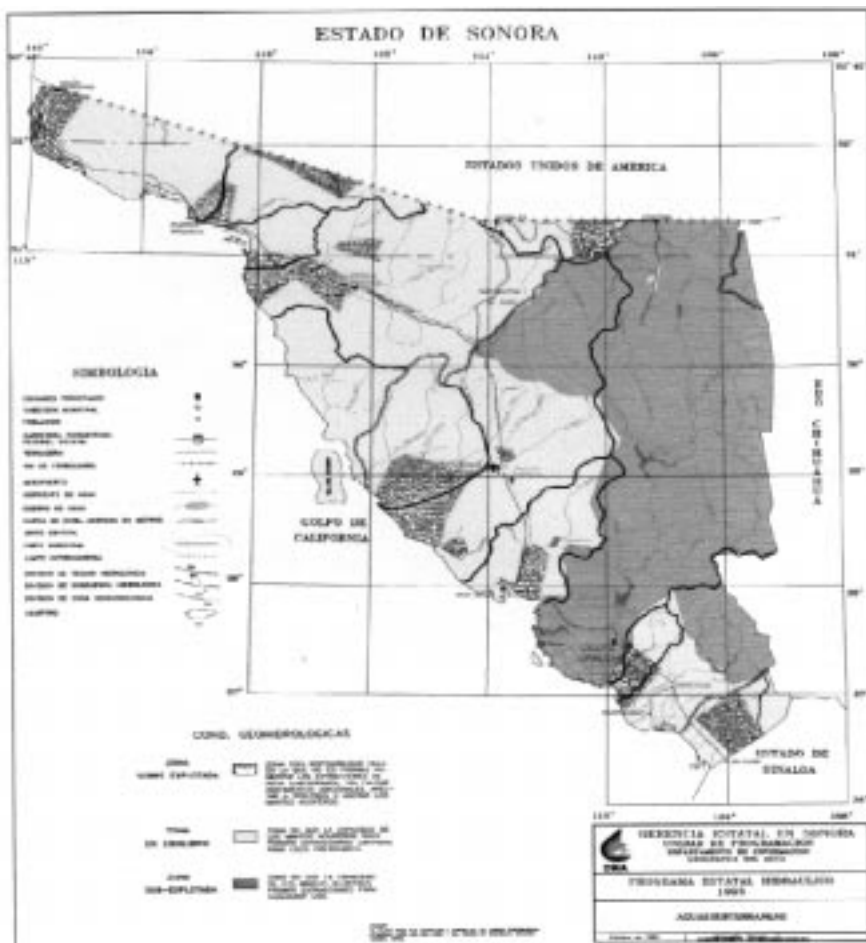


Figura 2. Condiciones geohidrológicas de Sonora

en día, este problema se observa en acuíferos costeros en muchos países del mundo.

El geólogo consultor de Houston, Texas, Nicolás A. Rose, reporta en 1952, que el campo de pozos propiedad del Ferrocarril del Sud-Pacífico al este de Empalme, Sonora, México, es el mayor desarrollo de abastecimiento de agua subterránea en esta área. Diez pozos han sido perforados desde que se inició la explotación durante la década de 1920. Siete de ellos han sido abandonados debido a percolaciones en los 300 o 400 pies (91.5 y 122 metros), superiores del ademe que han permitido que el agua salada entre a los pozos, haciendo de esta manera inaprovechable para uso doméstico o industrial. (Castillo Gurrola et al., 2002)

En los últimos años se han desarrollado una serie de métodos de análisis y modelos para la interpretación del fenómeno, junto a la necesaria tecnología de observación, control y prevención de éste problema.

El agua dulce del acuífero y el agua salada del mar son miscibles y por lo tanto, lo que existe es una zona de transición, más que un paso abrupto entre ambas. Esta zona de transición está causada principalmente por el fenómeno de dispersión, interviniendo también el de difusión molecular, aunque en menor grado. Asimismo, la zona puede variar en espesor, desde unos cuantos metros en acuíferos relativamente estables y sin influencia de bombeos, hasta centenares de metros en acuíferos muy manipulados, con pozos que se bombean y se detienen a menudo. La hipótesis de una interfaz abrupta puede conducir a grandes errores.

Una vez que el acuífero se ha contaminado, los esfuerzos han de dirigirse en uno de estos dos sentidos, eliminar o extraer el penacho o lengua de contaminación, o bien evitar su propagación. En cualquier caso, es importante recordar que el efecto del bombeo del agua subterránea establece gradientes hidráulicos y pueden aumentar o disminuir la velocidad de desplazamiento del agua contaminada (FAO, 1981).

Identificación del Agua de Mar en los Acuíferos

Para evitar diagnósticos erróneos de la invasión del agua de mar, como lo prueban los aumentos transitorios del total de sales disueltas, se recomienda la proporción cloruro-carbonatos como norma para evaluar la invasión. El cloruro es el ion que predomina en el agua del océano y normalmente se encuentra en pequeñas cantidades en el agua subterránea. En cambio el bicarbonato es, generalmente, el anión más abundante en el agua subterránea y solo se encuentra en pequeñas cantidades en el agua de mar.

Lo que más delata el comienzo o el establecimiento de un estado de intrusión marina es una rápida elevación del contenido en ion cloruro.

El agua del mar tiene como característica intere-

sante su bajo contenido en bicarbonato.

La relación cloruro a bromuro puede ser también interesante, pero el agua debe estar ya muy salinizada para que el contenido en bromuro sea medible con la suficiente precisión.

La relación rCl^-/rCO_3H^- se emplea como un índice cuya rápida elevación puede traducirse en signo de intrusión marina, ya que aguas muy cloruradas de contaminación humana o de riegos intensivos son también muy carbonatadas. El alto valor de relación rMg^{2+}/rCa^{2+} (5) y el bajo valor para las aguas dulces (0.2 a 1) es también un posible índice (Correu Toledo, 1974).

La exploración geofísica es la prospección de estructuras geológicas y de depósitos minerales realizada por medio de la medición de ciertas cantidades físicas, verificadas en la superficie del terreno como fenómenos que pueden ser interpretados por las leyes fundamentales de la física y el empleo de instrumentos adecuados.

Estas originan cuatro métodos geofísicos: Gravimétrico, Magnético, Sísmico y Eléctrico. Los métodos de resistividad eléctrica y electromagnéticos en superficie son la única herramienta que encaja en la exploración del agua subterránea en la zona costera. Su capacidad inherente para detectar cambios en la conductividad del agua contenida en los poros la hace responder altamente a la interfaz agua dulce-agua salada encontrada en las regiones costeras e islas. Uno de los nuevos usos más exitosos de la resistividad eléctrica de superficie fue la determinación de la interfaz agua dulce-agua salada en las islas de Hawaii por Swartz (1937). Desde entonces el método ha sido aplicado en todo el mundo, más notablemente en las costas de Bélgica (De Breuck y De Moor, 1969), Holanda (Van Dam y Meulenlamp, 1967) e Israel (Ginsburg y Levanon, 1976), la costa de Florida (Fretwell y Stewart, 1981) y en islas (Bugg y Lloyd, 1976; Zohdy y Jackson, 1969). Un ejemplo de mucho uso para la interpretación de acuíferos complejos es proporcionada por Van Dam (1976), en donde discute la aplicación del principio de Ghyben-Herzberg sobre la hidrogeología de la costa de Holanda y los resultados de la prospección geoelectrica en esa región. (Morales Montaña et al, 2000)

Para plantear un modelo hidrogeológico en tres dimensiones en una zona donde las condiciones son particularmente extremas para la aplicación de métodos de corriente continua como el SEV, debido a la dificultad que presentan las líneas de corriente para cruzar estratos altamente conductores como aquellas 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, ya que se han observado en ciertos casos lecturas de voltaje que están fuera del alcance de medición de los equipos.

Estas aparentes desventajas de la técnica del SEV ha conducido a la utilización cada vez más frecuente de los llamados sondeos TEM (Time Domain Electromagnetic) (Morales Montaña et al., 2000).

MATERIAL Y MÉTODOS

Acuífero del Valle de Guaymas

En 1975 la Compañía ICGA, desarrolló un modelo para simular y predecir el efecto de la difusión y dispersión del agua salada.

Herrera et al. (1985), elaboraron un modelo y simularon hasta el año 2010, determinando un abatimiento de 100 metros debajo del nivel del mar y un avance de la intrusión marina de más de 15 kilómetros.

Córdova, (2001), realizó un análisis de la evolución de la piezometría y la intrusión salina. Sin conocerse la potencialidad del acuífero, en el Valle de Guaymas se inició la explotación del acuífero y los efectos perjudiciales se reflejaron en rápido abatimiento de los niveles piezométricos que se encontraban varios metros por arriba del nivel del mar. Para 1957 ya habían descendido debajo de dicho nivel, originando en consecuencia el avance tierra adentro del agua marina, volviéndose práctica muy común la suspensión y relocalización de pozos con la inutilización de unas 8000 has. entre 1954 y 1957.

Castillo et al. (2002), realizaron un estudio de la disponibilidad y su planeación del recurso agua para el Municipio de Empalme, Sonora, donde contemplan la sobreexplotación y salinización del acuífero. Con el objeto de conocer las condiciones del subsuelo que conforma el Valle de Guaymas – Empalme, tanto en su distribución vertical como horizontal, se procedió a la aplicación de técnicas indirectas (Geofísica) de prospección del mismo. Para la aplicación del método de resistividad en su modalidad de sondeo eléctrico vertical (SEV) se utilizó el arreglo tetraelectrónico de Schlumberger con una apertura mínima para AB/2 de 1.0 mts. y una máxima de 450 mts. Todos los SEV's levantados fueron con el objeto de determinar la profundidad al basamento, así como el conocer la distribución vertical de las distintas capas que conforman el subsuelo. El número de SEV's levantados fue de 41 con un espaciamiento variable entre estos, tratando de que su distribución fuera lo más uniforme posible.

Según Custodio y Llamas (1996) se encuentra menos de 0.01 ppm de Br⁻ en aguas dulces y el agua de mar tiene 65 ppm. De acuerdo a Snoeyink y Jenkins (1987) la concentración de bromuro de la mayoría de las aguas naturales dulces es ≤ 1 mg/L y en agua de mar de alrededor de 70 mg/L. Se tiene que 29 de los pozos muestreados exceden el límite máximo para aguas dulces, siendo el valor máximo reportado de 14.00 mg/L Br. (Castillo et al 2002).

Borgo, (2002), aplica el modelo SHARP para predecir el avance de la intrusión salina. El modelo Sharp facilita la simulación regional de las condiciones costeras de agua subterránea en sistemas de capas, e incluye los efectos de la dinámica del agua salada sobre el sistema de flujo de agua dulce. El programa está escrito en FORTRAN 7.

Costa de Hermosillo

Andrews, (1982), realiza un estudio de la intrusión salina, aplicando un modelo. Determina valores del rendimiento específico (Sy) de 0.15 y el avance anual del frente salino.

Castro, (1998), aplica un modelo de intrusión salina. (Monreal Saavedra et al., 2000)

Monreal et al, (2000), conceptualizaron a detalle la intrusión salina, utilizando diferentes métodos. La utilización de los Sondeos Electromagnéticos presenta la gran ventaja de evitar el contacto galvánico necesario en los sondeos eléctricos convencionales y son particularmente útiles en condiciones extremas para la aplicación de métodos de corriente continua como el SEV. Se fundamentan básicamente en el principio de inducción electromagnética. Con la aplicación de los Transitorios Electromagnéticos (TEM), se pretende mostrar 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. Para el área de interés, la empresa CIGSA levantó alrededor de 400 sondeos electromagnéticos para la Universidad de Sonora y la Comisión Nacional de Agua, con el fin de definir de manera precisa los frentes de intrusión marina hacia el continente.

Gonzalez, (2001), aplicó métodos geoquímicos y geofísicos para el estudio de la intrusión salina en los acuíferos de Guaymas, Boca Abierta, Yaqui y Mayo. Se realizaron 110 sondeos eléctricos verticales (sev), con arreglo Schlumberger para el Valle del Yaqui, 56 para el Valle del Mayo, y 56 para el Valle de Guaymas-Boca Abierta. Además se efectuaron 59 sondeos electromagnéticos en dominio del tiempo (TDEM) en 10 perfiles de exploración someros con una bobina de 100X100 y 150X150 m., explorando hasta 300 m de profundidad y otros TDEM profundos en 9 sitios para investigar hasta los 1000m, utilizando una bobina de 300X300 m.

RESULTADOS

En el acuífero de Guaymas, igualmente se ha caracterizado la intrusión salina, solo que no se ha determinado su espesor. El incremento hacia el continente en los valores de resistividad, define claramente la presencia de una zona de interfase o de transición caracterizada por una mezcla de aguas. De acuerdo a informa-

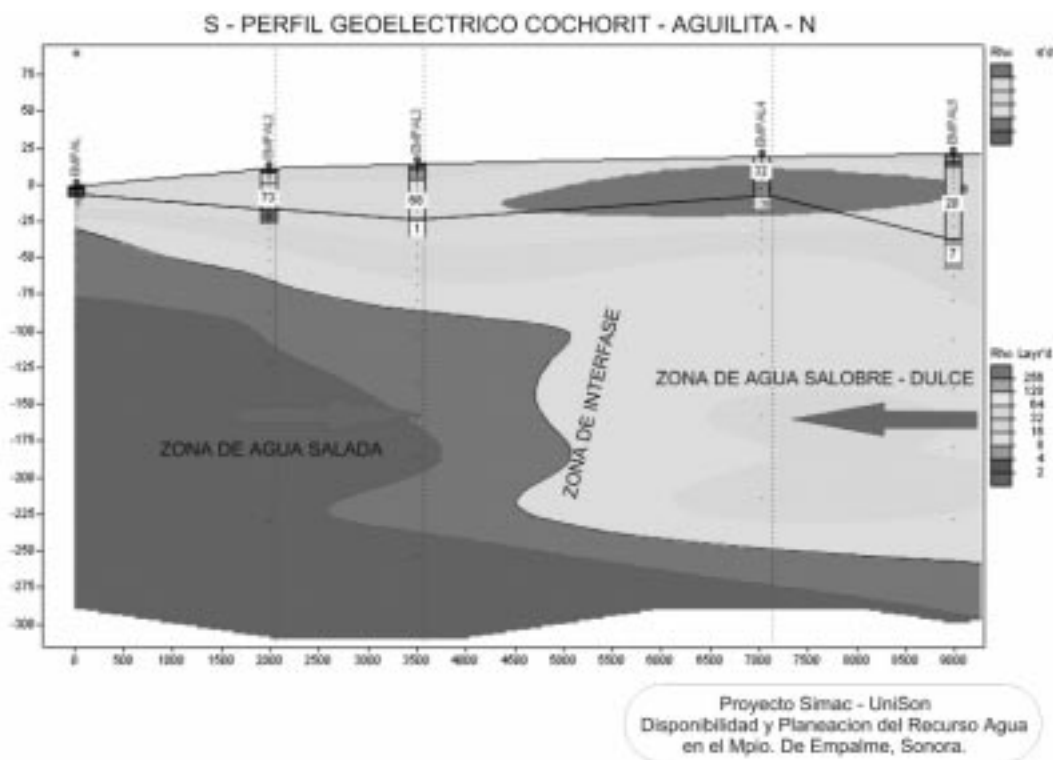


Figura 3. Corte longitudinal de la Intrusión Salina, obtenida por los estudios de geofísicos de resistividad desde el Cochorit a La Aguilita.

ción de pozos localizados en las inmediaciones del sev EMPAL5 (carretera el Aguilita) el agua predominante es salobre.

La zona saturada presenta variaciones de resistividad desde 1 Ω -mts. hasta valores superiores a los 150 Ω -mts., mostrando rápidos cambios laterales de facies y una gran heterogeneidad por la presencia de capas interdigitadas en el depósito del relleno. A la altura de los ejidos Cárdenas y Sonora se observan lentes potentes de materiales arcillosos que se acuñan lateralmente tanto al norte como al sur. En las cercanías del poblado las Guásimas, en el sitio correspondiente al sev ITSON 11 se observa un frente de intrusión salina caracterizado por una caída abrupta en el comportamiento de la resistividad hasta los 2 Ω -mts., típico de medios saturados con agua salada. Este frente de intrusión de no tomarse las medidas adecuadas en el valle de Boca Abierta, puede extenderse rápidamente continente adentro.

Se puede observar claramente la presencia de un amplio frente de intrusión salina caracterizado por una caída abrupta en el comportamiento de los valores de resistividad de 1 a 2 Ω -mts, tal como se observa en el sondeo prototipo anexo clásico de materiales granula-

res saturados con agua salada. El frente de intrusión presenta una distribución irregular en forma de lenguas hasta una distancia de la línea de costa del orden de los 8.5 kilómetros.(figura 3)

Se ha caracterizado a detalle la intrusión marina en la Costa de Hermosillo, conociéndose su penetración, anchura y espesor de la lengua salina. El análisis e interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales distribuidos en el área de interés, muestra claramente 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 del Cardonal y la tercera, a lo largo del estero de Tastiota. Estos canales preferenciales 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 2 Ω - metros). (Monreal et al., 2000).

En los acuíferos de Boca Abierta el avance de la intrusión es incipiente. Alejándose de la línea de costa y hacia el continente, los materiales que predominan en los primeros 100m, son principalmente arenas, gravas,

arcillas y boleos y es a través de estos que se da el fenómeno de la intrusión salina. (Gonzalez, 2001)

CONCLUSIONES

La contaminación de los acuíferos puede deberse a diferentes orígenes. Ya sea de origen geológico, por mal uso y manejo del agua de riego, por desechos industriales y domésticos y por intrusión marina. El fenómeno

no de intrusión de agua salada deja inutilizada amplias zonas del acuífero. Esto causa un daño irreversible.

La intrusión marina se puede detectar e identificar utilizando análisis físico-químicos, especialmente las relaciones de los índices cloruro-bromuros y cloruro-bicarbonatos. Su caracterización en cuanto a su avance longitudinal, anchura y espesor se puede realizar con los sondeos geofísicos TEM y SEV y con la sonda de Conductividad Eléctrica.

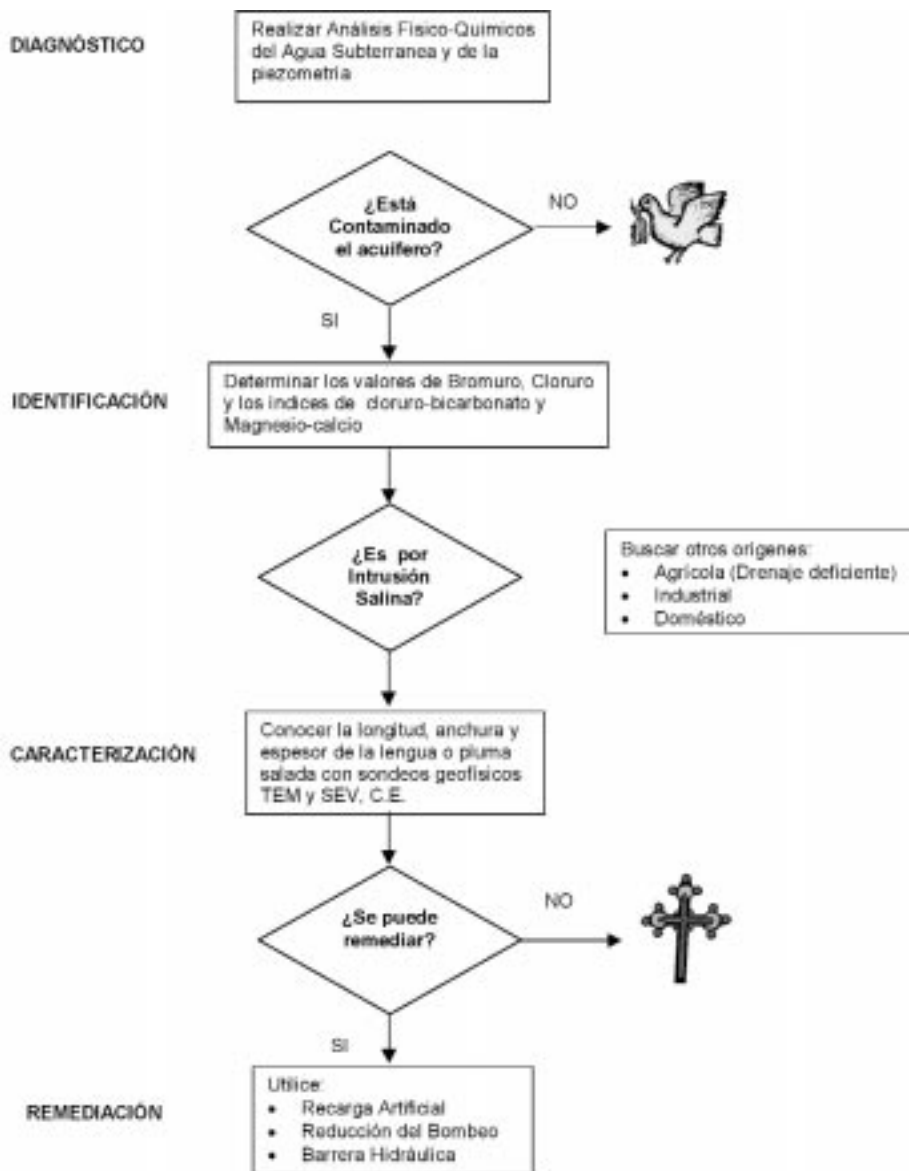


Figura 4. Estrategia básica de diagnóstico, identificación, caracterización y remediación de la intrusión salina (adaptado de Bedient, 1994).

En el estudio del Valle de Guaymas, el método de resistividad define claramente la presencia de dos frentes de intrusión salina: uno localizado en el poblado de las Guásimas en el extremo sur del valle de Boca Abierta y el otro localizado a lo largo de la falla de Santa Ursula, con una extensión de aproximadamente 9 kilómetros. Sin embargo, es notorio el deterioro de la calidad del agua subterránea y suelos agrícolas por una extensión del orden de los 15 kilómetros continente adentro.

En la Costa de Hermosillo, el análisis e interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales distribuidos en el área de interés, muestra claramente 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 del Cardonal y la tercera, a lo largo del estero de Tastiota. Estos canales preferenciales, 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 2 Ω - metros).

Los modelos matemáticos para el estudio de la intrusión salina, deben ir complementados con uno de estos métodos anteriores.

RECOMENDACIONES

Se recomienda seguir el diagrama de flujo indicado en la figura 4.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Andrews W.R. 1982. Salt-Water intrusion in the Costa de Hermosillo, México: A numerical Analisis of water Manager Proposals. Groundwater. Vol. 19. No. 6. Ph d. dissertation. Univ. of Illinois, Urbana. Ill. U.S.A.
- Bedient, P. B.; Rifai, H. S. y Newell, C. J. 1994. *Ground Water Contamination*. Transport and Remediation. PTR Prentice – Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey. U.S.A.
- Borgo Valdez, G. 2002. *El modelo matemático SHARP para el estudio de la Intrusión salina en el acuífero del valle de Guaymas, Sonora, México*. Tesis. Dpto. de Matemáticas. Universidad de Sonora. México.
- Comisión Nacional del Agua. 1995. *Programa Estatal Hidráulico*. Gerencia Estatal en Sonora. México.
- Castillo Gurrola, J.; Rodríguez, J. C. y Watts, C. J. 2002. *El uso y manejo del agua: El agua subterránea en Sonora*. Sexto Seminario de Acuíferos costeros de Sonora. Poblado Morelos. Empalme, Sonora, México.
- Castillo G.J.; Morales, M.M.; Vega G.L. 2002. Disponibilidad y Planeación del Recurso Agua en el Municipio de Empalme, Sonora, México. Universidad de Sonora. Hermosillo Sonora, México.
- Córdova Durazo, J. P. 2001. *La sobreexplotación y la intrusión salina en el acuífero de Guaymas, Sonora, México*. Tesis Profesional. Dpto. Agricultura y Ganadería. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.
- Correu Toledo G. 1974. *Manual para el alumbramiento de aguas subterráneas*. FIRA. Banco de México. México.
- FAO. 1981. *Contaminación del Agua Subterránea, Tecnología, Economía y Gestión*. Organización de las Naciones Unidas. Roma, Italia.
- Gonzalez E.R. 2002. Geofísica de los acuíferos costeros del sur de Sonora. Sexto Seminario de acuíferos costeros de Sonora. Poblado Morelos. Empalme, Sonora, México.
- Herrera Revilla, I. 1984. *Ampliación al estudio Geofísico del Valle de Guaymas, Sonora, México*. UNAM. México.
- Herrera Revilla, I. 1985. *Ampliación a la modelación matemática de las fuentes de abastecimiento para el suministro de agua en bloque a las ciudades de Empalme, Guaymas y San Carlos, Sonora, México*. UNAM. México.
- Monreal Saavedra, R.; Morales Montaña, M.; Castillo Gurrola, J. y Rangel Medina, 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*. Comisión Nacional del Agua y Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.
- Morales Montaña, M. y Castillo Gurrola, J. 2000. *Generalidades de los métodos geofísicos aplicados a la geohidrología*. Quinto Seminario de Acuíferos Costeros de Sonora. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora. México.