

Agua subterránea: alternativa acuícola en el Noroeste de México

Llanes-Cárdenas Omar¹, Norzagaray Campos Mariano¹, Muñoz Sevilla Patricia², Ruiz Guerrero R.³

¹ CIIDIR-IPN-Sinaloa. Blvd. Juan de Dios Bátiz Paredes No. 250. Guasave Sinaloa, C.P 8101.

² CIEMAD IPN. Calle 30 de Junio de 1520, Barrio la Laguna Ticomán C.P. 07340. Del. Gustavo A. Madero México. D.F.

³ Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada del IPN (CIBA-Tlax.), Carr. Estatal San Inés Tecuexcomac-Tepetitla Km. 1.5, Tepetitla. Tlaxcala, 90700, México
e-mail: oma_llanes@hotmail.com; mnorzaga@ipn.mx.

Resumen

El acuífero del Río Sinaloa, tiene agua salina por intrusión marina y por génesis tectónica de su geología. Presenta cuerpos de agua subterránea salobres atrapados intercontinentalmente. La importancia de caracterizar estos cuerpos radica en su aprovechamiento para el desarrollo de diversas actividades. Por tal, los objetivos fueron: (1) presentar una alternativa de desarrollo socioeconómico local (acuicultura), disponiendo del agua subterránea; (2) generar un mapa de variación espacial de los cuerpos de agua subterránea salobre con potencial de explotación. Se aplicó magnetometría para calcular el campo magnético total (CMT) y localizar sitios con posible presencia de agua salobre. A 5 sitios, se les aplicó Sondeos Eléctricos Verticales (SEV´s) para conocer la salinidad y profundidad del agua subterránea. Perforando los 5 pozos, se muestreó agua para validar la información de los SEV´s mediante la concentración media de indicadores fisicoquímicos. El SEV 4 presentó la mínima resistividad ($2.8-7.42 \text{ Ohm m}^{-1}$) y una agua de muy salina a salina (6780 mg L^{-1}) y el SEV 5 tuvo la mayor magnitud ($7.97-16.46 \text{ Ohm m}^{-1}$) con una agua de salina a escasamente salina (5570 mg L^{-1}). Es innegable la factibilidad del desarrollo de sistemas de cultivo de peces como la tilapia (del Nilo, Mossambica, Aurea y Roja), así como también la realización de alevinajes, o criaderos marinos, que posteriormente se podrían engordar en el Pacífico mexicano, debido a que estas especies pueden crecer en aguas con características salobres y algunas se adaptan al agua de mar (Tilapia Mossambica) soportando hasta 36 mg L^{-1} , dependiendo del cambio gradual o brusco en el cambio de salinidades del agua.

Palabras Claves: magnetometría, geoelectrónica, niveles de concentración, acuicultura

Summary

Groundwater: alternative aquaculture in Northwest Mexico.

The aquifer of the Sinaloa River has salt water by seawater intrusion and tectonics genesis of its geology. Brackish groundwater bodies trapped intercontinental presents. The importance of characterizing these bodies is that it´s can use for the development of various activities. As such, the objectives were: (1) submit an alternative socio-economic local development (aquaculture), disposing of groundwater; (2) generate a map of spatial variation of the bodies of brackish groundwater with exploitation potential. Magnetometer was used to calculate the total magnetic field (TMF) and locate sites with possible presence of brackish water. 5 Sites, they applied Electrical Vertical Sounds (EVS´s) to learn about salinity and groundwater depth. Drilling of 5 wells, water is sampled to validate the information of the EVS´s by the mean concentration of physical-chemical indicators. EVS 4 introduced minimum resistivity ($2.8-7.42 \text{ Ohm m}^{-1}$) and a water of very saline to saline (6780 mg L^{-1}) and EVS 5 had the highest magnitude ($7.97-16.46 \text{ Ohm m}^{-1}$) with a saline to sparsely saline water (5570 mg L^{-1}). Undeniably the feasibility of the development of fish culture systems such as tilapia (Nile, mossambica, Aurea or Red), as well as conducting fingerling or marine hatcheries, which subsequently could fatten in the Mexican Pacific because that these species can grow in brackish water features and some are adapted to seawater (Tilapia mossambica) supporting up to 36 mg L^{-1} , depending on the change gradual or sudden change in water salinity.

Key words: magnetometry, geoelectrical, concentration levels, aquaculture.

Introducción

Los Sistemas Intensivos Acuícolas (SIA´s) ampliamente conocidos en los cultivos de peces con altos flujos abiertos de agua, tienen dos principales propósitos: a) proporcionar oxígeno a los peces (elemento indispensable para su vida y bienestar) y b) retirar los productos de desechos del metabolismo de éstos, para que no se acumulen en el propio cultivo, ni en sus alrededores. En los SIA´s se utilizan cerramientos como tanques, ciertos "raceways", silos y todos aquellos sistemas donde el agua sea reutilizada. El agua de abastecimiento debe ser de excelente calidad a la entrada (previamente determinada por análisis) y con suficiente caudal para futuras ampliaciones del cultivo (Luchetti & Gray, 1988).

Para obtener producciones cercanas a los 10-15 kg m⁻³ se requiere el mantenimiento de la calidad de agua con recambios de aproximadamente tres veces por hora, por lo que el volumen para trabajar es elevado, (Spotte, 1979); y es el agua subterránea libre de contaminación, la que presenta las mejores condiciones para cumplir con las necesidades de los SIA´s, siempre que su abastecimiento sea cierto en cuanto a términos de volumen y continuidad se refiere. La ventaja principal de esta agua (además de su calidad), es que su temperatura se mantiene constante a lo largo del año (en general 18 °C en clima cálido y templado) a su salida, lo cual es ideal para los peces al ser muy sensibles a los cambios de la temperatura. Por lo general las aguas subterráneas mantienen la temperatura promedio ambiental de una región y su calidad es diferente de acuerdo a la geología (Sahuquillo y cols., 2009); puede tener altos o bajos contenidos de minerales y sales (hierro y otros elementos químicos); los cuales en exceso son dañinos para los peces -por ejemplo el hierro- pero son los análisis previos los que determinarán sus concentraciones. Otra de las desventajas del agua subterránea es la ausencia de oxígeno, sin embargo, éste se puede agregar al bombear el agua hacia la superficie y al ingresar a los cerramientos utilizados (Kirschner y Bloomsburg, 1988).

Existen muchos ejemplos de SIA´s en el Mundo, por mencionar algunos, en Kuwait, donde construyen tanques de concreto llenos de agua salobre bombeada desde pozos con recambios frecuentes del agua y alimentos balanceados, alcanzan una producción aproximada de 10 kg m⁻³. A fin de incrementar la producción con uso de aguas del subsuelo, en este lugar se brindan concesiones y subsidios hasta por 25 años a agricultores interesados (Al-Yamani y cols., 2004). Otro ejemplo, es EEUU, donde por décadas el cultivo y producción de bagre se realizaba exclusivamente por agencias pesqueras estatales y federales en estanques, lagunas, lagos, esteros, ríos y embalses de varios estados. A principios de los 60´s, cuando comenzó la acuicultura comercial, en Arkansas y Alabama, se inició el cultivo de bagre en granjas, después le siguió Mississippi por su relación directa con un buen suministro de aguas subterráneas de excelente calidad, poco profundas y localizadas en terrenos planos con suelos que retienen el agua y a su vez, es el estado con la mayor producción (Sterling y cols., 2001). Otro de los SIA´s exitosos con agua subterránea profunda (900 m) es el de peces de aguas cálidas en Israel, donde el agua drenada desde los acuíferos subterráneos del desierto sirve para cultivar róbalo en estanques alineados (Martínez, 2011).

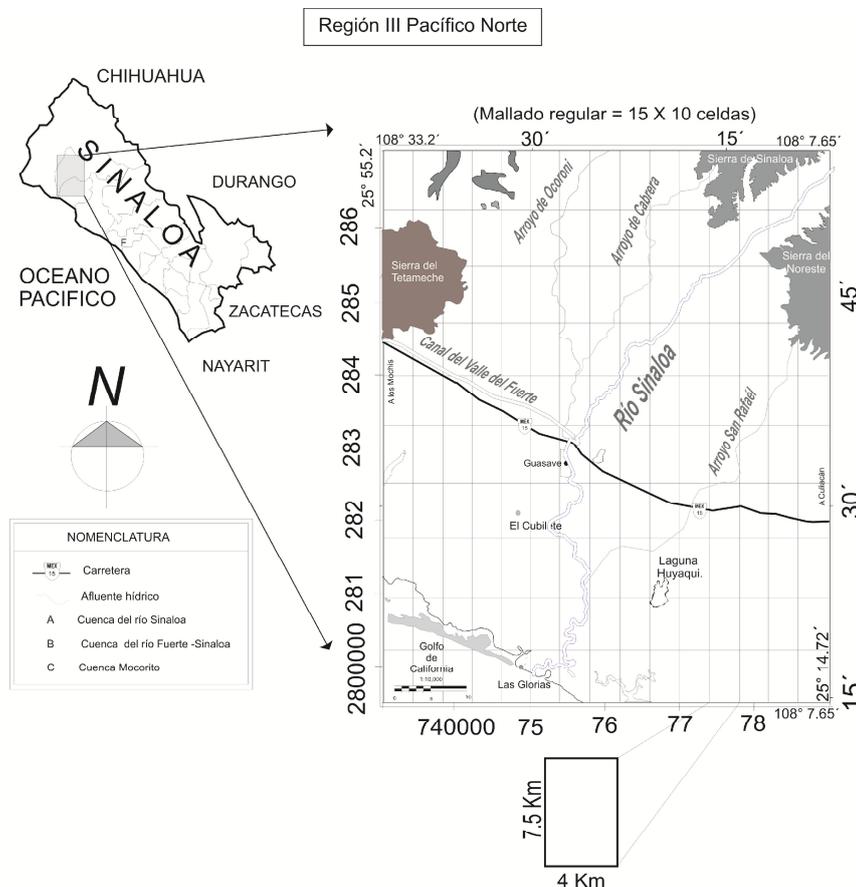
La existencia de estos SIA´s en pleno desierto, anteriormente se asociaba a una anomalía, sin embargo hoy es una realidad, ya que en la última década en Israel, esta actividad se está transformando en un negocio importante debido a que se trata de un agua geotermal, con menos de una décima parte de salinidad que la de mar, libre de contaminantes y con una temperatura promedio de 36,6 °C, que se ajusta perfectamente a las necesidades de SIA´s de peces. Por lo tanto, se debe considerar la presencia de aguas subterráneas de una región como una gran oportunidad para operar los SIA´s, principalmente en peces, sobre todo en lugares donde los niveles de calidad del suelo no

son ideales para la agricultura y pueden llegar a ser una importante alternativa en la producción de alimentos para la subsistencia de los pobladores de esas regiones. Por lo anterior el presente estudio, realizado en una zona costera del Noroeste de México, se sustenta en los siguientes objetivos: (1) Dar a conocer una alternativa de desarrollo para la acuicultura local, ecológica, sostenible y económica según la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo; (2) realizar un mapa de la variación espacial de los diferentes cuerpos de aguas subterráneas salobres con uso potencial para la acuicultura. Los resultados en una de las regiones acuícolas más importantes de México, mediante una propuesta del uso del agua subterránea salobre, se pueden traducir en un desarrollo integral de la acuicultura sin alterar las calidades del agua y del suelo en esta región donde la acuicultura de costa ha dañado severamente los “terrenos costeros”.

Materiales y métodos

La llanura costera del Pacífico Mexicano “Valle de Guasave” tiene una superficie aproximada de 4500 km², según el INEGI (2005), pertenece a la cuenca hidrológica RH10-SINALOA. Al Norte colinda con la Sierra Madre Occidental, al Sur con el Golfo de California. Su afluente principal es el Río Sinaloa hacia donde descargan tres importantes arroyos: Cabrera (20 a 25 m³ s⁻¹), Ocoroni (25 a 35 m³ s⁻¹) y San Rafael (15.2 m³ s⁻¹) (Norzagaray, 2003) (figura 1). Para identificar las aguas subterráneas saladas y salobres, se usó la magnetometría para medir en nanoteslas (nt) el campo magnético total (CMT). En el levantamiento de campo del CMT se midieron 198 estaciones remotas sustentadas en 7 bases con dos magnetómetros Geometrics G-856.

Figura 1. Localización del área de estudio y estaciones magnéticas para medir el Campo Magnético Terrestre en el Valle de Guasave, México.



Las estaciones y bases fueron geoposicionadas en coordenadas UTM (de las siglas en inglés Universal Transversal Mercator) con un GPS portátil "GARMIN Olathe" de 12 canales según el Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84). Para facilitar el manejo de la información de campo y los análisis numéricos en los 4,500 km², la zona fue discretizada a través de una malla regular con dimensiones de 15 x 10 (150 elementos de 30 km²). El mallado, bajo el uso de la frecuencia de Nyquist, permitió el control de la incertidumbre ante la variación espacial del CMT (al menos dos muestras en cada celda). El mapa de la variación espacial del CMT se realizó con una interpolación tipo Kriging (Emery, 2007) y la influencia de los polos de la Tierra en los datos de campo se eliminó aplicando en la malla una reducción al polo (Bhattacharya, 1964). Para la selección de los sitios con posible agua salina se utilizó un rango de variación del CMT con corrección al polo de 39000 a 65000 nt. Localizados los sitios con probable agua salina, al azar, se seleccionaron 5 de éstos para aplicar la técnica geoelectrica de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's) en su modalidad Schlumberger.

Esta actividad se justificó en el hecho que la corriente eléctrica puede dispersarse en forma esférica a través del subsuelo y al cruzar tanto las corrientes de agua salobres como las dulces se comporta como un campo potencial constante, que cumple con la ecuación de Laplace, el uso de la transformada de Hankel (1869) y el análisis armónico de Fourier (1822). La técnica SEV's con modalidad Schlumberger se seleccionó por ser el método más resolutivo para determinar la profundidad del agua subterránea y brindar facilidades en la logística de campo (Busso y Yermolin, 2007) a diferencia de los dispositivos dipolo-dipolo y Wenner, también usados en la exploración geofísica con otros fines. Una vez geoposicionados con el mismo GPS del CMT, los SEV's midieron la resistividad aparente (ρ_a) del subsuelo (Meyer, 1991). Para la obtención de la resistividad aparente del subsuelo, intervinieron la diferencia del potencial inducido y natural (mV), la intensidad de corriente inyectada en el subsuelo (mA) y la constante dieléctrica (m) (Sánchez, 1995). En los SEV's, se utilizó el dispositivo Schlumberger, el cual se fundamenta en los principios de Ghosh (1971) y la transformada de resistividad de Koefoed (1979); por lo que la curva de resistividad aparente de los SEV's fue transformada a un modelo de resistividad-profundidad.

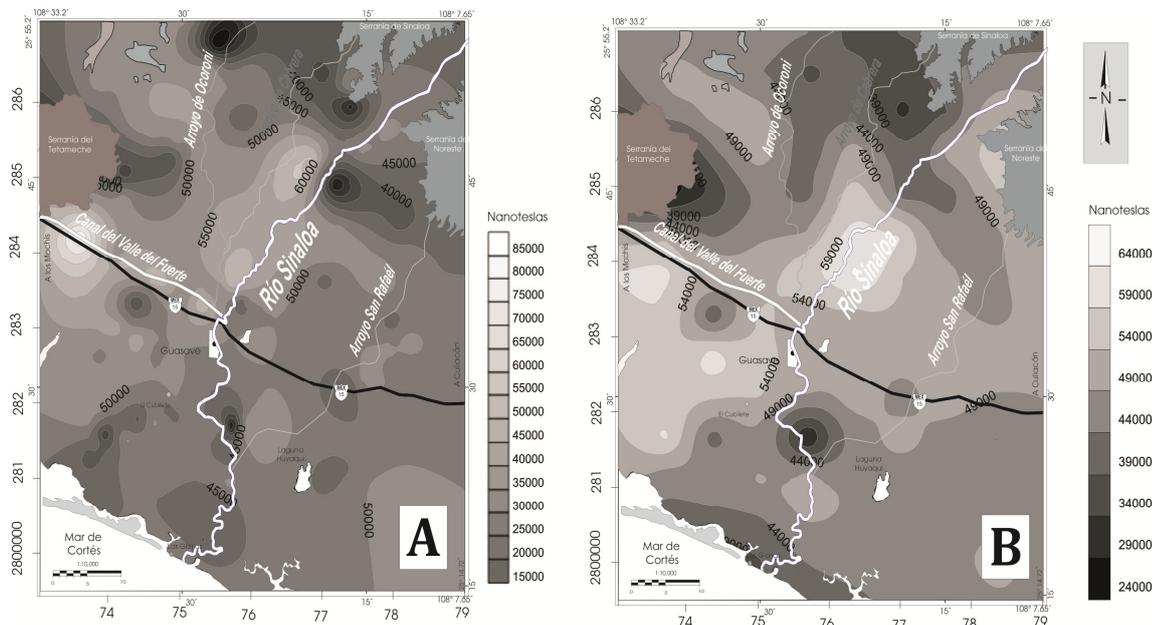
La conjunción de esta operación numérica Gosh-Koefoed se simplificó con la inversión de 7 filtros descrita por Guptasarma (1982) y Llanes (2007). Se utilizó el software de inversión IPIWIN, pues este, se alimenta con datos de SEV's. Se utilizó con penetraciones de 100 a 150 m para la obtención del modelo resistividad-profundidad realizado en las distintas capas (Bobachev y cols., 2000). También los 5 SEV's de manera indirecta, definieron los niveles de concentración de la sal (mg L⁻¹) en la vertical del medio. Para validar la concentración inferida a través de la curva de resistividad aparente, cada punto fue perforado a una profundidad de 30 m y con botellas muestreadoras tipo "Van Dorn" previamente esterilizadas y guardadas en bolsas de plástico hasta el momento de ser utilizadas; sus aguas fueron monitoreadas cada metro. Con mediciones directas con el termómetro se midió la temperatura del agua bajo los protocolos de trabajo descritos en la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2000. El pH, la conductividad eléctrica (CE) y los sólidos totales disueltos (PPM) fueron determinados bajo los criterios de la NMX-AA-008-SCFI-2000 y NMX-AA-093-SCFI-2000 con un potenciómetro HANNA-1256 (del inglés Instruments Grocheck Meter) previamente calibrado con una sustancia tampón de conductividad y pH conocido (7 unidades de pH y 1410 mS cm⁻¹). Con la integración del CMT, los SEV's y los niveles de concentración obtenidos en cada muestra, se propuso una clasificación de la calidad del agua subterránea en función de la variación de la salinidad, la cual es indirectamente proporcional a la resistividad del agua subterránea. Mediante el software SURFER 8.0 se elaboró un mapa a una escala 1:10 000 donde se ilustran los puntos aptos para el cultivo de especies de agua salada. Los detalles del mapa fueron

refinados en Corell Draw 12.0. Se llevó a cabo el estudio de aforo en los cinco pozos, mediante el método de Theis simplificado, para conocer el caudal explotable que cada pozo para la acuicultura.

Resultados

La variación del CMT fue de 24066.04 a 71834.46 nt, su media de 47398.06 nt y la desviación estándar de 6779.02 nt. En la parte A de la figura 2, aparece la variación espacial del CMT sin ninguna corrección y en la parte B, los mismos datos ya corregidos (corrección al polo y secular).

Figura 2. Variación espacial de la Magnetometría sin correcciones (A) y con corrección al polo y secular (B) para el Valle de Guasave (nt).



Las mayores magnitudes del CMT se presentaron en la zona serrana debido a la influencia que tienen las grandes masas locales (montaña) y los valores menores estuvieron presentes en la zona centro debido al contenido de grandes paquetes sedimentarios (valle) (figura 2). Obsérvese en las partes A y B de la figura 2, que a diferencia de otras regiones específicas en el mundo, donde el polo magnético de la tierra afecta demasiado al CMT, en la zona de estudio, existe poca influencia ejercida por los polos de la Tierra, esto debido a la escasa presencia de grandes cuerpos de masa rocosa -zona serrana-, por lo que se trata de grandes paquetes sedimentarios no consolidados en su mayoría.

El comparativo de la figura 2, muestra las zonas donde los polos ejercen su mayor influencia las cuales son: la serranía de Tetameche, de Sinaloa y del Noroeste; así como en parte de la zona costera debido a su cercanía al mar. Las correcciones (reducción al polo y secular) del CMT arrojaron magnitudes que van de 24681.58 a 64495.70 nt, con una media de 47390.59 nt, una mediana de 47776.09 nt, una media geométrica de 46944.32 nt y una desviación estándar fue de 6262.78 nt. Por lo que la parte B de la figura 2, representa las condiciones reales y continuas, o sin ruidos interferentes en el CMT local. Para la selección de los sitios con posible agua salina se utilizó un rango de variación del CMT de 42580 a 42980 nt. Por lo anterior, de la parte B de la figura 2 se obtuvieron los puntos para realización de SEV's; es decir, de los resultados de CMT con una magnitud de 48457.11 y 39051.4 nt se seleccionaron dos puntos en la zona serrana y se les denominó respectivamente sondeo 1 y 5, uno con

valor de 49838.6 nt en la zona de transición entre la zona serrana y la agrícola y se le denominó sondeo 2, otro con magnitud de 51489.23 nt se identificó en la zona agrícola y se llamó sondeo 4 y por último en la zona costera con un valor de 48929.78 nt se identificó un sondeo más y se le asignó el número 3 (véase tabla 1).

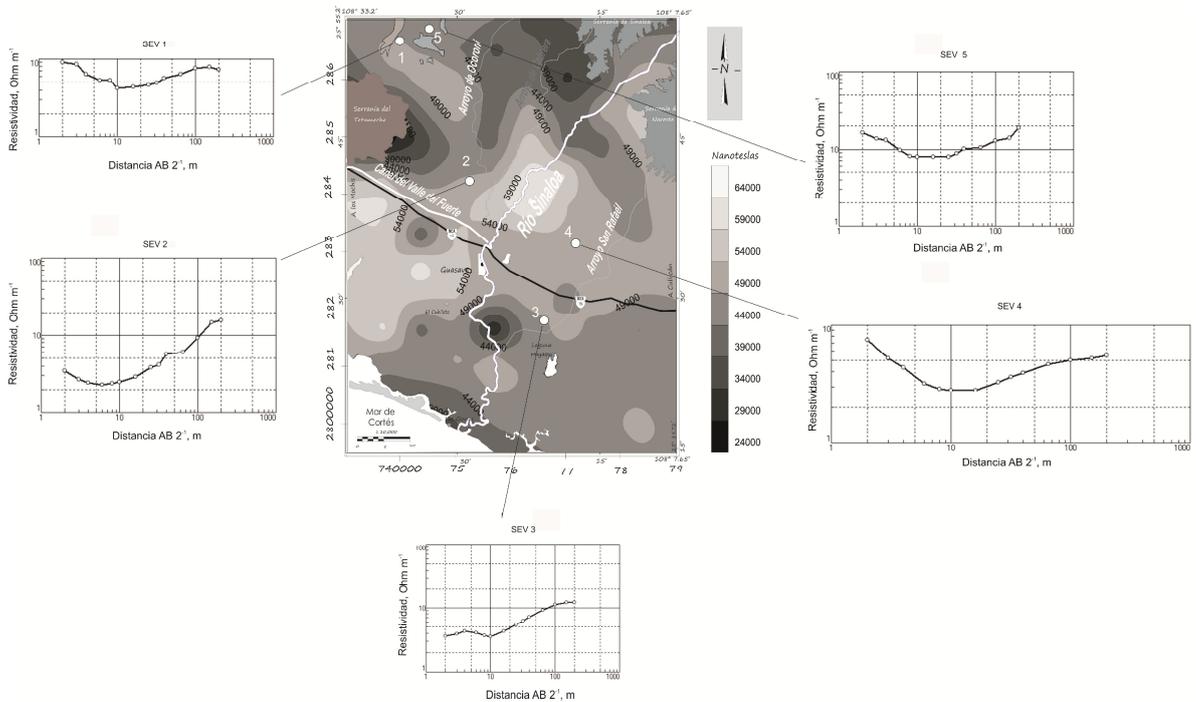
Tabla 1. Indicadores fisicoquímicos de las aguas subterráneas en los puntos de muestreo.

No.	Coordenadas (UTM WGS84)		CMT* nt*	Resistividad		Nivel estático m	Temperatura °C	pH	CE* mS/cm	PPM* mg/l
	x m*	y m*		min* ohm-m	max* ohm-m					
SEV 1	739596	2867269	48457.11	4.16	9.09	5.07	20	7.5	9.3	5950
SEV 2	752118	2842200	49838.6	2.28	15.7	1.66	21	8.5	9.7	6210
SEV 3	766719	2817687	48929.78	3.53	12.26	7.21	24	7.2	10.2	6530
SEV 4	772114	2831100	51489.23	2.8	7.42	11.91	21	8.3	10.6	6780
SEV 5	745167	2868525	39051.4	7.97	16.46	8.19	23	8.1	8.7	5570

CMT = campo magnético terrestre, m = metros, nt = nanoteslas, min = mínimo, max = máximo,
 x = latitud, y = longitudud, CE = conductividad eléctrica y PPM = partes por millón

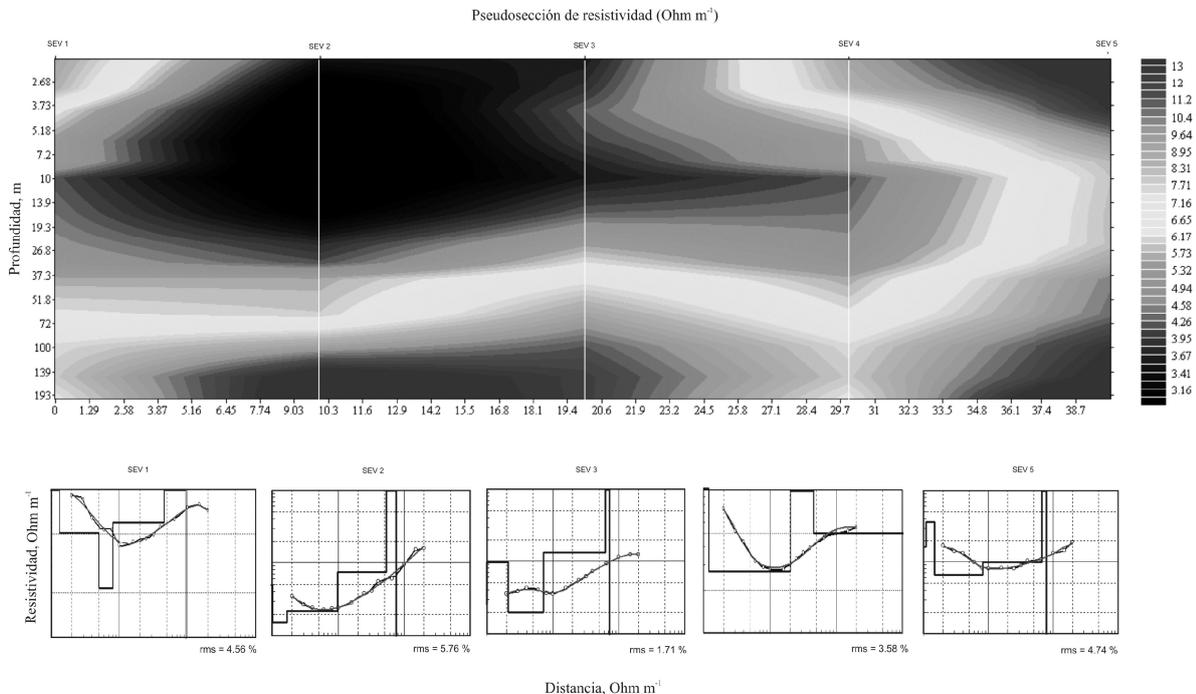
La tabla 1 muestra las coordenadas UTM (x, y), las magnitudes del CMT, el valor mínimo y máximo de resistividad aparente, y en cuanto a cada pozo, los resultados de la temperatura, pH, conductividad eléctrica y la clasificación de la salinidad del agua según la conductividad eléctrica. La figura 3 presenta el lugar donde se realizaron los 5 SEV's, sus respectivas curvas de resistividad aparente (campo), real (calculada) y los errores cuadráticos medios (rms) con los que fueron ajustadas las curvas de resistividad aparente y real. Las resistividades aparentes en el sondeo 1 tienen valores que van de 4.16 a 9.09, en el 2 de 2.28 a 15.7, en el 3 de 3.53 a 12.26, en el 4 de 2.8 a 7.42 y en el 5 de 7.97 a 16.46 ohm-m.

Figura 3. Curvas de resistividad aparente y real de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's) en sitios donde la intensidad magnética localizó agua subterránea salada (Ohm m⁻¹).



Obsérvese que el resultado de la interpretación entre la resistividad del campo y la real que se visualiza a través del modelo numérico de capas, presentó buenos ajustes con valores del rms < 10 %. El rms del sondeo 1 fue de 4.56 %, el del 2 de 5.76 %, el del 3 de 1.71 %, el del 4 de 3.58 % y el del 5 de 4.74 %. El promedio del rms fue de 4.07 % y de acuerdo a los antecedentes de la geología local, la interpretación se ajusta a la realidad. Según los resultados de los modelos numéricos, a excepción del sondeo 1 que manifiesta una profundidad de 49.6 m, los sondeos 2, 3, 4 y 5 presentan por abajo de los 70 m una capa impermeable donde descansan los cuerpos de agua salina: sondeo 2 = 75.5 m, sondeo 3 = 72.2 m, sondeo 4 = 42.87 m y sondeo 5 = 79.25 m. El nivel estático presenta un promedio de 6.8 m: sondeo 1 = 5.07, sondeo 2 = 1.66, sondeo 3 = 7.21, sondeo 4 = 11.91 y sondeo 5 = 8.19 m. En la figura 4, se muestra la pseudosección de resistividad aparente para los 5 SEV's. Obsérvese en las curvas reales y aparentes de resistividad (parte inferior) que los 5 sondeos manifiestan valores de resistividad por abajo de los 10 Ohm-m, por lo que para lograr obtener un agua salada o salobre para el cultivo de peces en esta región, los valores de resistividad a obtener cuando opera la técnica SEV's deben ser menor a los 10 ohm m.

Figura 4. Pseudosección de resistividad aparente y curvas de resistividad aparente y real de los 5 SEV's donde se localizó agua salada mediante magnetometría en el Valle de Guasave, México (Ohm m^{-1}).



En cuanto al agua muestreada de cada pozo perforado, la temperatura varió de 20 a 24 °C y presentó un promedio de temperatura ambiental de 21.8 °C. La CE presentó valores de 8.7 a 10.6 mS cm^{-1} que se asocian a magnitudes de PPM de 5570 a 6780 mg L^{-1} . El pH varió de 7.2 a 8.5 y el sondeo 2 fue el de mayor magnitud, no obstante, todas las aguas analizadas manifestaron una tendencia por arriba del valor neutro (7), situación que se asoció a la disolución del agua con las formaciones de sedimentos no consolidados sobre las que circula el agua en el Valle; principalmente por los suelos limosos y arcillosos que caracterizan a toda la zona de estudio. Se propone para la zona de estudio una clasificación del agua de escasamente salina a extremadamente salina, de acuerdo a su resistividad (Tabla 2), la cual se realiza tomando en cuenta la variación de la salinidad en función de la resistividad real del agua. La resistividad real oscila en el intervalo de 0 a 4 hasta el intervalo >20 Ohm-m.

Tabla 2. Salinidad del agua en función de su resistividad real en el Valle de Guasave, Sinaloa, México.

Resistividad (Ohm-m)	Salinidad
0 a 4	Extremadamente salina
4 a 8	Muy salina
8 a 12	Salobre
12 a 16	Salina
16 a 20	Ligeramente salina
>20	Escasamente salina

De acuerdo al estudio de aforo realizado para los cinco pozos, se obtuvo un caudal promedio de 2.7 lps, lo cual, permite garantizar el desarrollo de actividades de acuicultura en la región, sin poner en riesgo la limitación o presencia del recurso hídrico subterráneo.

Discusión

La figura 2, muestra mayores magnitudes de magnetometría cercanos a la serranía del Tetameche en la dirección Noroeste y menores en la costa y parte central del valle. En los 5 SEV´s localizados tanto en la sierra como en la parte central del Valle, se encontró agua subterránea de características salinas menores a 10 Ohm-m, pues según Keller y Frischknecht (1966); el agua se presenta en el intervalo de resistividad de 10 a 100 Ohm-m, dependiendo de la cantidad de sales disueltas que contengan, a su vez las rocas sedimentarias comúnmente son más porosas y tienen un alto contenido de agua, lo que normalmente hace disminuir los valores de resistividad, por tal, en los 5 puntos donde se desarrollaron los SEV´s, existen volúmenes de agua subterránea salada atrapados en cuerpos rocosos, y éstos, han permanecido inalterados durante años.

El punto con mayor cantidad de agua salada es el SEV 4 ya que se aprecia en la figura 3 que la curva real presenta resistividades de 2.8 a 7.42 Ohm-m con un promedio de 4.17 Ohm- m siguiéndole el SEV 3 que presenta un intervalo de variación de 2.28 a 3.07 Ohm-m con un promedio de 4.27 Ohm-m. Todos los puntos de estudio son viables para el desarrollo de actividades de cultivo de peces como: Tilapia (del Nilo, Mossambica, Aurea y Roja), así como también se pueden realizar alevinajes, o criaderos marinos, que posteriormente se podrían engordar en el Pacífico mexicano, debido a la salinidad y características fisicoquímicas de sus aguas. El SEV 4 presenta resistividades menores, pues la curva de resistividad cae por abajo de los 10 Ohm-m en todos los puntos de medición. Por otra parte, la profundidad a la que se encuentra el nivel freático es de 3.45 m y el error de ajuste entre las curvas de campo y real es de 3.58 %, es decir, las curvas se parecen en un 96.42 %.

Los análisis de aguas, muestran que las aguas subterráneas son de tendencia salina de acuerdo a su valor de conductividad eléctrica, pues en 4 sitios de los 5 en totalidad manifiestan esta característica. De acuerdo a los resultados de la conductividad eléctrica y PPM de las aguas subterráneas y los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV´s), se puede decir que los SEV´s son una técnica de campo sencilla, confiable y práctica para conocer la salinidad de las aguas subterráneas sin la necesidad de llevar a cabo perforaciones (Timmons y cols., 2002).

Conclusión

De acuerdo a los resultados mostrados en este trabajo, es innegable la factibilidad del desarrollo de sistemas de cultivo de peces como la tilapia (del Nilo, Mossambica, Aurea y Roja), así como también la realización de alevinajes, o criaderos marinos, que posteriormente se podrían engordar en el Pacífico mexicano, debido a que estas especies pueden crecer en aguas con características salobres y algunas se adaptan al agua de mar (Tilapia Mossambica) soportando hasta 36 mg L^{-1} , dependiendo del cambio gradual o brusco en el cambio de salinidades del agua. Además, el agua desechada por el uso de actividades de acuicultura que aquí se propone, se podría reutilizar para labores agrícolas, sin causar un impacto ambiental adverso, pues los desechos orgánicos producidos por los peces cultivados, hacen el agua útil como un fertilizante natural (Siriwardena, 2001).

Por lo anterior, se sugiere la construcción de complejos acuícolas, capaces de captar aguas producto del cultivo de peces, para su reutilización en actividades agrícolas, pues estas aguas, son comúnmente limpias, no tienen patógenos, depredadores, contaminantes, algas no deseadas, así como también son estables y sus características fisicoquímicas no varían constantemente con la frecuencia de las aguas superficiales (Hellegers, 2002). Por tanto, la explotación de estas aguas subterráneas, permitirá, por ejemplo, que las granjas camaroneras se construyan en sitios alejados de las costas o estuarios otorgando un ahorro a los inversionistas, debido al bajo precio de los predios, los cuales, no tienen ningún uso, así como también contribuir a la disminución del impacto ambiental que se genera con el desarrollo de la acuicultura convencional en la costas del pacífico mexicano (Al-Yamani y cols., 2004; Martínez, 2011). El siguiente paso en México, donde el agua escasea y es costosa, es mostrar e interesar a los acuicultores, que podrían usar una fuente de agua alterna, la cual, tiene las condiciones para el cultivo de ciertas especies de peces y alevinajes, y la misma agua podría reutilizarse, posteriormente, para irrigación de tierras de cultivo.

Este modelo de uso del agua subterránea, podría copiarse potencialmente, especialmente en países áridos del tercer mundo, donde los agricultores se esfuerzan por producir sus cultivos. Este trabajo, ofrece una alternativa de desarrollo socioeconómico en sitios donde la acuicultura tradicional, no es viable, debido principalmente a la inexistencia del recurso hídrico y de la calidad requerida (Camacho y cols., 2000).

Agradecimientos

Al CIIDIR-IPN-SINALOA por la facilitación del laboratorio para desarrollar los análisis de aguas.

Bibliografía

1. Al-Yamani, F.; J. Bishop; E. Ramadhan; M. Al-Husaini y A. N. Al-Ghadban. (2004). Oceanographic Atlas of Kuwait waters. KISR Publication, 203 pp.
2. Bhattacharyya, B.K. (1964). Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization: Geophysics, Vol. 29: 517-53.
3. Bobachev, A.; I. N. Modin; y V. Shevnin. (2000). Department of Geophysics. Geological Faculty. Moscow State University y Geoscan-M.Ltd.

4. Busso, A. y E. Yermolin. (2007). Métodos geofísicos en investigaciones geotécnicas en el permafrost antártico. VI Simposio Argentino y III Latinoamericano sobre Investigaciones antárticas.
5. Camacho, B. E; R. C. Luna y R. M. A. Moreno. (2000). Guía para el cultivo de Tilapia. Ed. SEMARNAP. México. 136 pp.
6. Emery, X. (2007). Conditioning simulations of Gaussian random fields by ordinary kriging. *Mathematical Geology*. 39(6): 607-623.
7. Fourier, J. (1822). *Théorie analytique de la chaleur*, Didot, Paris; Jacques Gabay, París, 115-128 pp.
8. Ghosh, D. P. (1971). Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for a horizontally stratified earth. *Geophysical Prospecting*, 19: 769-775.
9. Guptasarma, D. (1982). Optimization of short digital linear filters for increased accuracy, *Geophysical prospecting* 30, 501-514.
10. Hankel, H. (1869). "Die Cylinderfunctionen erster und zweiter Art." *Math. Ann.* 1, 467-501.
11. Hellegers, J. G. J. (2002). Treating water in irrigated agriculture as an economic good. Paper submitted for the conference on Irrigation Water Policies, 15–17 June 2002, Agadir, Morocco.
12. INEGI (Instituto Nacional de Estadísticas Geografía e Informática). (2005). Anuario Estadístico del Estado de Sinaloa. Gobierno del Estado de Sinaloa, México, 321 pp.
13. Keller, G. and F. Frischknecht (1966). *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*, Pergamon Press, Londres, Inglaterra.
14. KIRSCHNER, F. E. Jr. y G. L. BLOOMSBURG. (1988). Vadose zone monitoring - an early warning system. *Ground Water Monitoring Review* 8: 49.
15. Koefoed, O. (1979). *Geosounding principles. 1. Resistivity sounding measurements*, Vol. 14A in *methods in Geochemistry and Geophysics*, Elsevier, Amsterdam, 214-229 pp.
16. Llanes, C. O. (2007). Evaluación espacio-temporal de la pérdida de suelo: indicadores de erosión hídrica y eólica para el valle de Guasave, Sinaloa. Tesis de Maestría. CIIDIR-IPN-Sinaloa. Guasave, Sinaloa, México 137 pp.
17. Luchetti, G. L. y G. A. Gray. (1988). Prototype water reuse system. *Progressive fish-culturist* 50: 46-49.
18. Martínez, R. R. (2011). Israel logra cultivar peces. 43 pp.
19. Meyer, C. (1991). *Applications de la Géophysique aux recherches d'eau*. Lavoisier. 183 pp.
20. Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2000. (2000). Análisis de agua: determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas (métodos de prueba) (CANCELA A LA NMX-AA-007-1980). 28 pp.
21. Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2000. (2000). Análisis de agua: determinación del pH (método de prueba) (CANCELA A LA NMX-AA-008-1980). 38 pp.
22. Norma Mexicana NMX-AA-093-SCFI-2000. (2000). Análisis de agua: determinación de la conductividad electrolítica (método de prueba) (CANCELA A LA NMX-AA-093-1984). 27 pp.

23. Norzagaray, C. M. (2003). Flujo regional en acuíferos, sus causas y efectos en la dispersividad hidrodinámica: Un caso de estudio. Tesis Doctoral. Centro de Investigaciones y de Estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Mérida Yucatán, México. 250 pp.
24. Sahuquillo, A.; E. Custodio y M. R.Llamas. (2009). La gestión de las aguas subterráneas. Tecnología del Agua, primera parte: febrero, 60-67 pp.; segunda parte: marzo, 54-67 pp.
25. Sánchez, F. J. (1985). Prospección hidrogeológica en rocas metamórficas mediante geofísica eléctrica. *Studia Geol. Salm.* 20(1):127-136.
26. Siriwardena, P. P. G. S. N. (2001b). Shrimp farming and associated problems. In N. Farmer (ed.). Report of the Workshop on Effective Management for Biodiversity Conservation in Sri Lankan Coastal Wetlands: Muturaawela Marsh, Negombo Lagoon and Chilaw Lagoon (MMNCL), Centre for the Economics and Management of Aquatic Resources, University of Portsmouth. Report No. 55: 55–66 pp.
27. Spotte, S. (1979). Fish and invertebrate culture. Water management in closed systems. N.York, London, Sidney, Toronto; Willey-Interscience. 145 pp.
28. Sterling, P.; E. Bessy y V. H. Eduardo. (2001). "Geografía, un enfoque constructivista". Ed. Esfinge.
29. Timmons, M; J. Ebeling; F. Wheaton; Summerfelt y B. Vinci. (2002). Sistemas de recirculación para la acuicultura. Edición en español de la fundación Chile, Santiago, Chile, 748 pp.