

## MODELOS DE SIMULACIÓN DE FLUJO Y TRANSPORTE COMO PARÁMETROS DE TOMA DE DECISIONES PARA EL APROVECHAMIENTO DEL ACUÍFERO DE LA MESILLA, PARA LLEVAR AGUA POTABLE A CD. JUÁREZ CHIH, MÉXICO

E. Rascón M.<sup>1</sup>; G. A. Moreno M. J.<sup>1</sup>; L. Sánchez P.<sup>1</sup>; F. J. Gómez D.<sup>1</sup> & A. Aquino C.<sup>1</sup>

**Resumen** - El volumen con el cual se abastece de agua potable a Cd. Juárez actualmente es insuficiente, debido a su crecimiento acelerado y a que la única fuente que se utiliza es el acuífero del Bolsón del Hueco, el cual ya presenta problemas de fuertes abatimientos y salinización.

Con el objetivo de tener una fuente alterna de agua potable, desde 1982 se han realizado estudios exploratorios en el vecino acuífero del Bolsón de la mesilla (Zona de Conejos Médanos) cuya distancia media a la ciudad es de 40 km. Los estudios realizados permitieron delimitar las zonas más factibles de ser aprovechadas, tanto por sus propiedades hidráulicas como por las de calidad de agua.

Actualmente se proyecta la construcción, de la infraestructura necesaria para conducir el agua hasta la ciudad, desde una batería de pozos ubicada en esa zona. Estas obras tienen un costo muy elevado, y un parámetro muy importante que determina su viabilidad es el tiempo que duraría operando dicha batería antes de tener problemas de abatimientos excesivos o de salinización del acuífero. El tiempo con el cual se considera viable la inversión es de 20 años, tiempo durante el cual se buscarían otras fuentes alternas.

Como resultados de los estudios realizados en la zona, se detectó un frente salino proveniente de una laguna seca ubicada al suroeste del área y otros menores, uno al sureste y otro al noreste, así como una tendencia en las concentraciones de los solutos a aumentar conforme se profundiza en el acuífero. La modelación de la hidrodinámica y de transporte de solutos de este acuífero que actualmente se encuentra en estado

---

<sup>1</sup> Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Juárez, Departamento de Geohidrología - Pedro N. García y Eje Vial Juan Gabriel, Cd. Juárez, Chihuahua, México. Fax. (16) 86 00 19 Tel. (16) 16 91 82 email: jmasnor@infoInk.net

estacionario, permite conocer su reacción a futuro, y su resultado, es un importante parámetro de apoyo para decidir sobre la inversión que se hará en la infraestructura de conducción y bombeo.

**Palabras-clave** - simulación hidrodinámica, cuasi-estacionario, transporte de solutos.

## **INTRODUCCIÓN**

El fuerte crecimiento industrial que ha experimentado Cd. Juárez a partir de la década de los setentas, propició un acelerado aumento de su población que actualmente alcanza 1.3 millones de habitantes. El abastecimiento de agua potable se ha obtenido exclusivamente del acuífero del Bolsón del Hueco, el cual es compartido con la vecina ciudad de El Paso, Texas, provocando fuertes problemas de abatimiento y salinización en esta fuente.

Con el objeto de llevar un caudal complementario de agua potable a la ciudad, se planea iniciar el aprovechamiento del acuífero del Bolsón de la Mesilla en el área de Conejos-Médanos, el cual se localiza dentro de la zona desértica de Chihuahua, a una distancia media de 40 km al poniente de la ciudad, lo que implicaría una fuerte inversión en los sistemas de conducción del agua para esa distancia. Para que la inversión que se va a hacer se considere viable, el acuífero tendría que proveer un volumen de  $2 \text{ m}^3 / \text{s}$  durante al menos 20 años.

Este acuífero, actualmente es aprovechado por pozos de poco caudal para uso de abrevadero, por lo que se considera que el volumen que se le extrae no es significativo, considerándose en estado estable. Uno de los problemas sería la respuesta hidráulica del acuífero al esfuerzo que se le aplique, ya que la recarga por lluvia es considerada nula y el aprovechamiento sería prácticamente del almacenamiento. Otro de los problemas es las altas concentraciones de sales que en algunas zonas esta muy cerca de la norma, y en otras la supera por mucho, y se teme la rápida salinización de las baterías de pozos.

## **LOCALIZACIÓN**

La zona de estudio se ubica al norte del Estado de Chihuahua, México en la frontera con E.U.A., definida por las latitudes  $31^{\circ}51'38''$  y  $31^{\circ}20'41''$ , y por las coordenadas de longitud  $107^{\circ}15'36''$  y  $106^{\circ}31'58''$ ; abarca un superficie rectangular de 70 por 56

km para un área de 3920 km<sup>2</sup> (Figura 1). La precipitación media anual es de 230 mm y la temperatura media es de 18° C con máximas en verano de 38° C y mínimas en invierno de -12° C, con una evaporación potencial de 2400 mm.

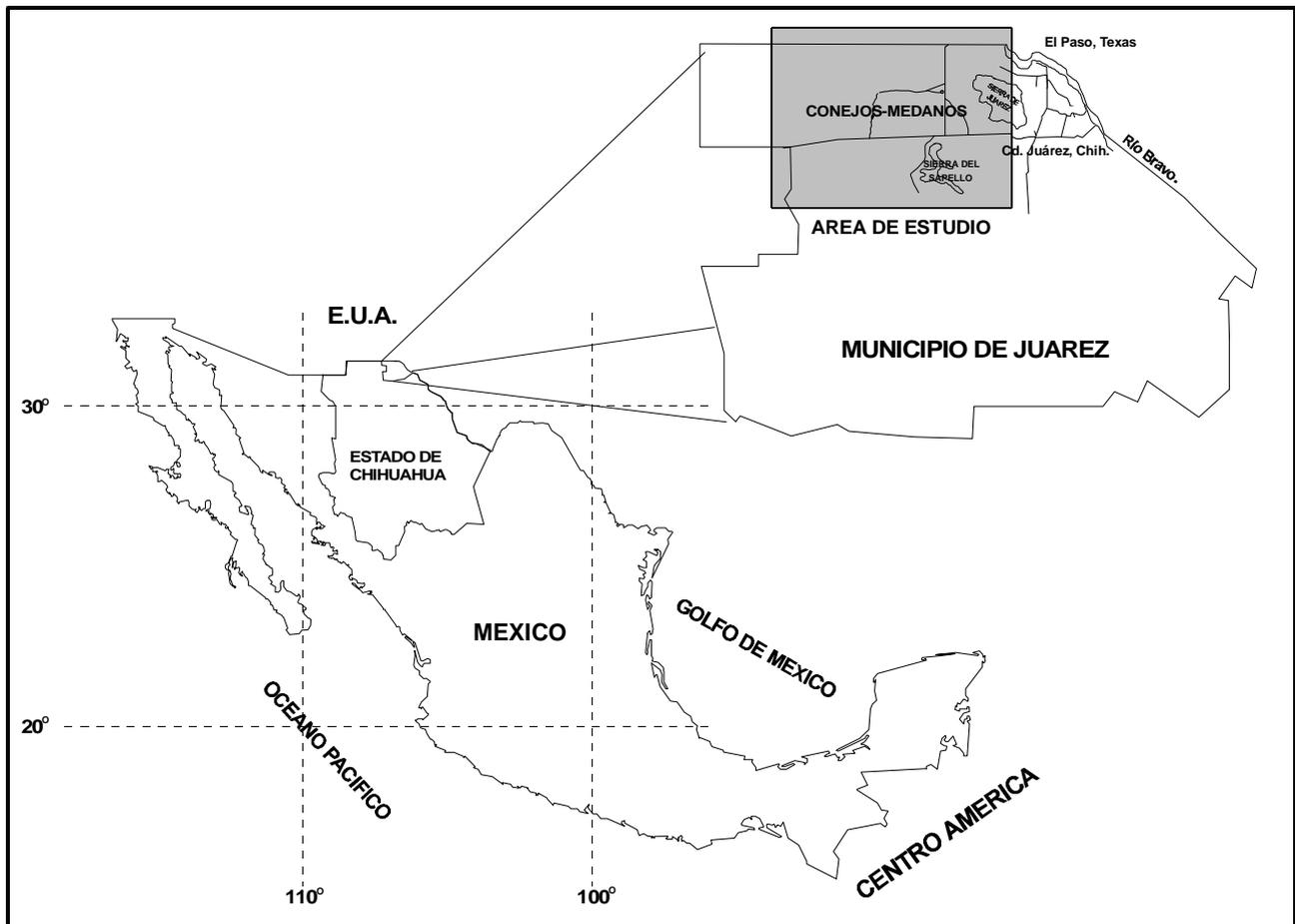


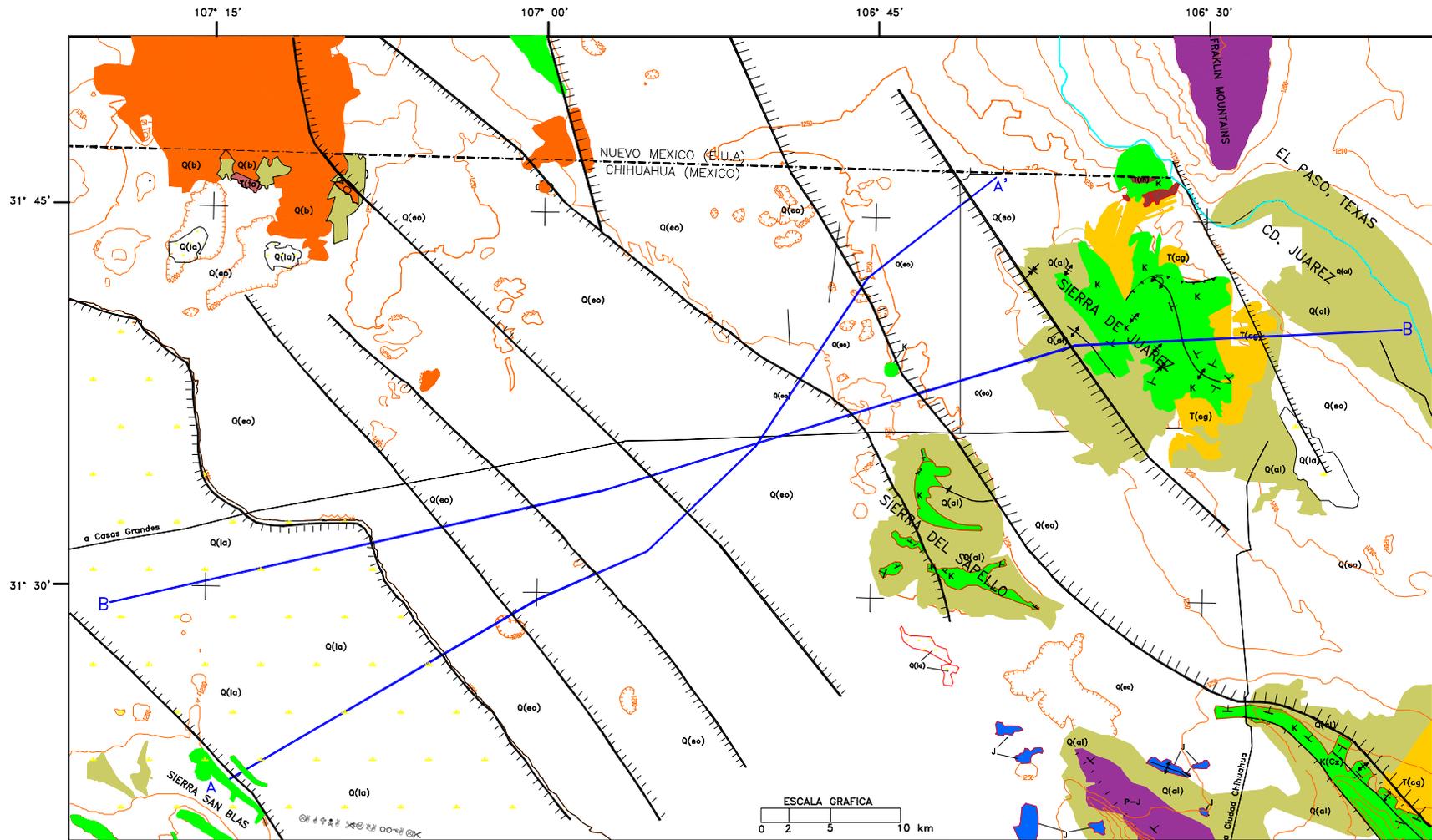
Figura 1.- Ubicación de la zona de estudio

## MARCO GEOLÓGICO

La geología de la región esta representada por rocas que varían en edad del Cretácico al Cuaternario, compuestas por rocas sedimentarias marinas y continentales, y rocas ígneas volcánicas (Figura 2). Las rocas sedimentarias marinas corresponden a rocas del Cretácico consistentes en calizas, lutitas y areniscas, conformando generalmente sierras alargadas, angostas y de pendiente fuerte, limitadas por fallas, principalmente de tipo normal. Los principales afloramientos de estas rocas estan representados por las sierras de Juárez, Sapelló, San Blas, La Nariz y del Máurico.

Las rocas sedimentarias continentales son de edad terciaria y cuaternaria, corresponden a ambientes de depósito lacustre, pie de monte y eólico. Los sedimentos

mas antiguos corresponden a los lacustres del Terciario que se encuentran sobreyaciendo en forma discordante a las rocas cretácicas y subyacen a los sedimentos eólicos del Cuaternario (Figura 3a). Estos sedimentos presentan un espesor hasta de 3500 m (PEMEX y E. López Ramos, 1978), constituidos de arenas, limos y arcillas, depositados en estratos delgados intercalados (Moreno, G. et al, 1999).



ROCAS SEDIMENTARIAS		ROCAS IGNEAS		ESTRUCTURAS	
EOLICO Q(eo)	[Orange]	BASALTO Q(b)	[Red]	ECHADOS DE 10° A 80°	[Symbol]
ALUVIAL Q(al)	[Light Green]	TOBA ACIDA T(ta)	[Pink]	FOLIACION	[Symbol]
LACUSTRE Q(la)	[Light Blue]	TONALITA T(tr)	[Dark Red]	FALLA NORMAL	[Symbol]
CONGLOMERADO QT(cg)	[Yellow]			FALLA INVERSA	[Symbol]
CRETACICO K	[Green]			FRACTURA	[Symbol]
JURASICO J	[Blue]			ANTICLINAL	[Symbol]
PREJURASICO P-J	[Purple]			ANTICLINAL RECUMBENTE	[Symbol]
				SINCLINAL	[Symbol]

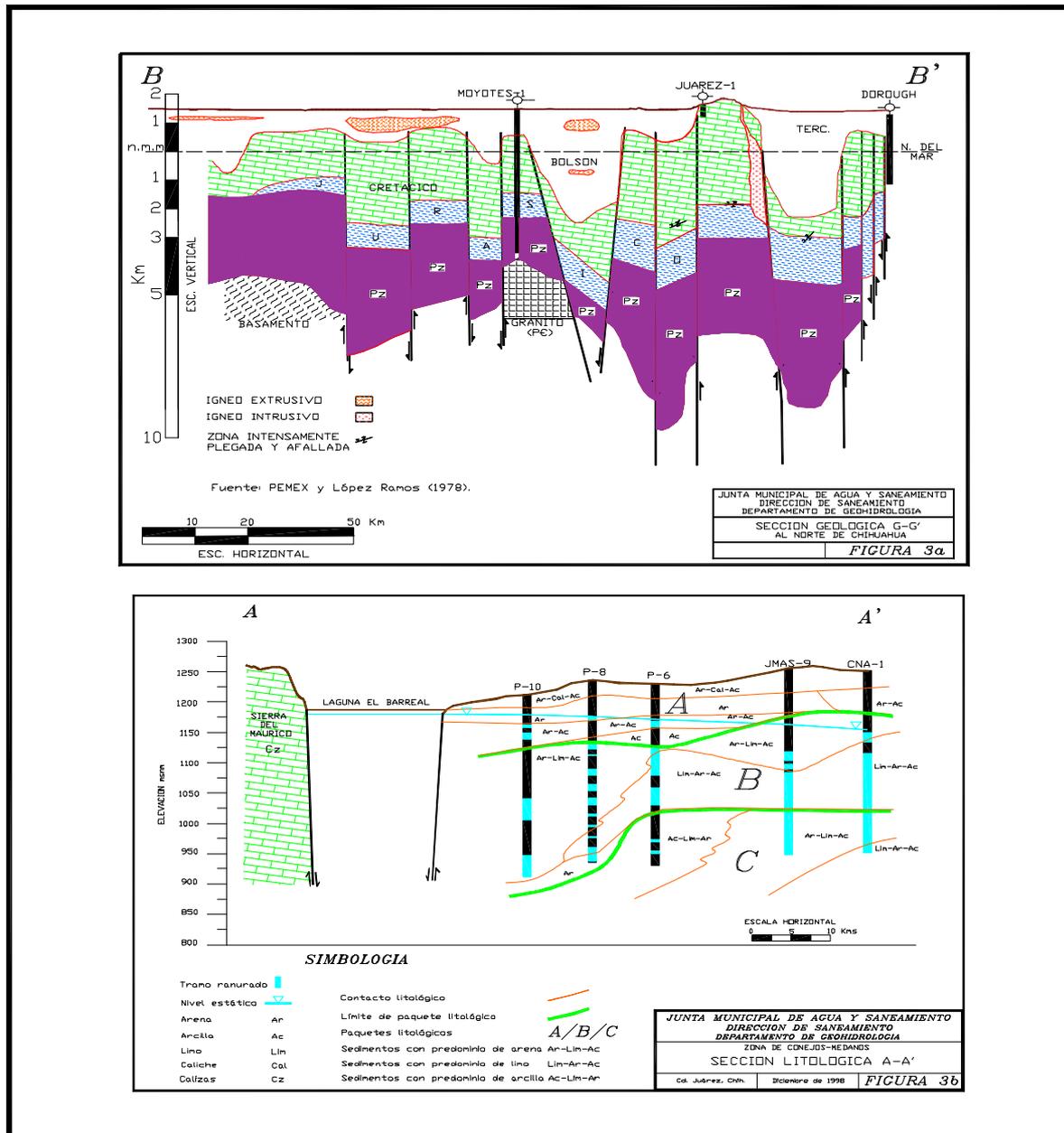
JUNTA MUNICIPAL DE AGUA Y SANEAMIENTO  
 DIRECCION DE SANEAMIENTO  
 DEPARTAMENTO DE GEOHIDROLOGIA

PLANO GEOLOGICO **Figura 2**

ESCALA : IND.	DICIEMBRE DE 1998	FIGURA 2
---------------	-------------------	----------

Los depósitos lacustres actuales se ubican en la zona de la Laguna El Barreal formando una delgada capa de arena fina, arcilla y limo; mientras que los depósitos eólicos son arenas bien clasificadas que se encuentran formando médanos con espesores generalmente delgados, pero que pueden llegar hasta los 15 o 20 m cuando existen médanos muy altos (Figura 3b).

Las rocas volcánicas de edad cuaternaria están representadas por basaltos fracturados y en forma de escoria que rodean a los conductos de emisión de lava. Estas rocas se encuentran en su mayor parte en la porción estadounidense conformando las Potrillo Mountains del este y oeste, ubicadas inmediatamente al norte de la línea fronteriza.



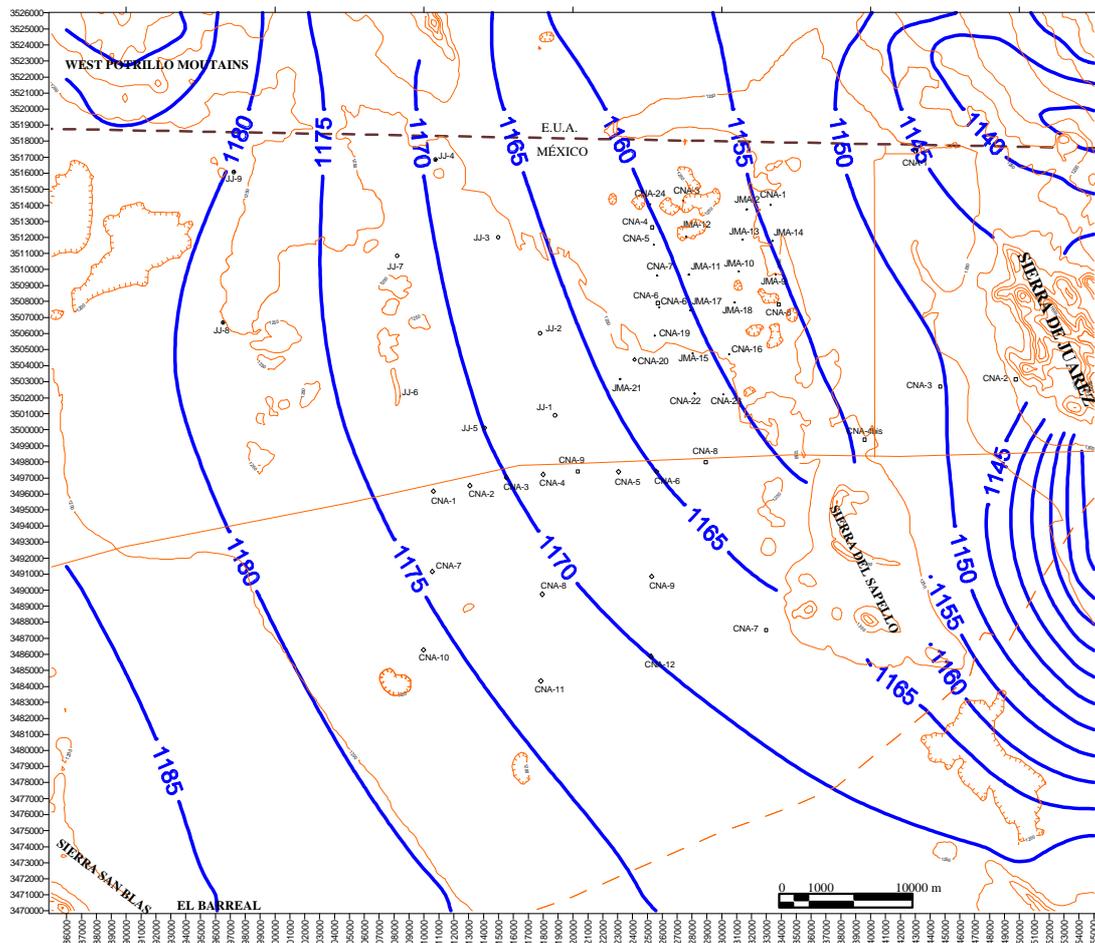
## HIDROGEOLOGÍA

La dirección de flujo es de Oeste-Este y Suroeste-Noreste (Figura 4), ubicándose las zonas de recarga en las West Potrillo Mountains (Nuevo México, U.S.A.) para el sistema Oeste-Este, mientras que para el sistema Suroeste-Noreste, la recarga se presenta en la sierras del Máurico, San Blas y La Nariz; pasando por la Laguna de El Barreal, ubicadas en la porción Suroeste del área.

El Acuífero de la Mesilla en la Zona de Conejos-Médanos presenta dos zonas de descarga: 1) el puerto que forman la Sierra de Juárez y las Montañas Franklin, para pasar posteriormente al Bolsón del Huevo y una componente del sistema de flujo Suroeste-Noreste, cambia su dirección en la zona norte de la Sierra de Sapello para descargar al Bolsón del Huevo por el sur de la Sierra de Juárez con dirección Oeste-Este (Moreno, G. et al, 1999).

**Figura 4.- ELEVACION DEL NIVEL ESTÁTICO (msnm)**

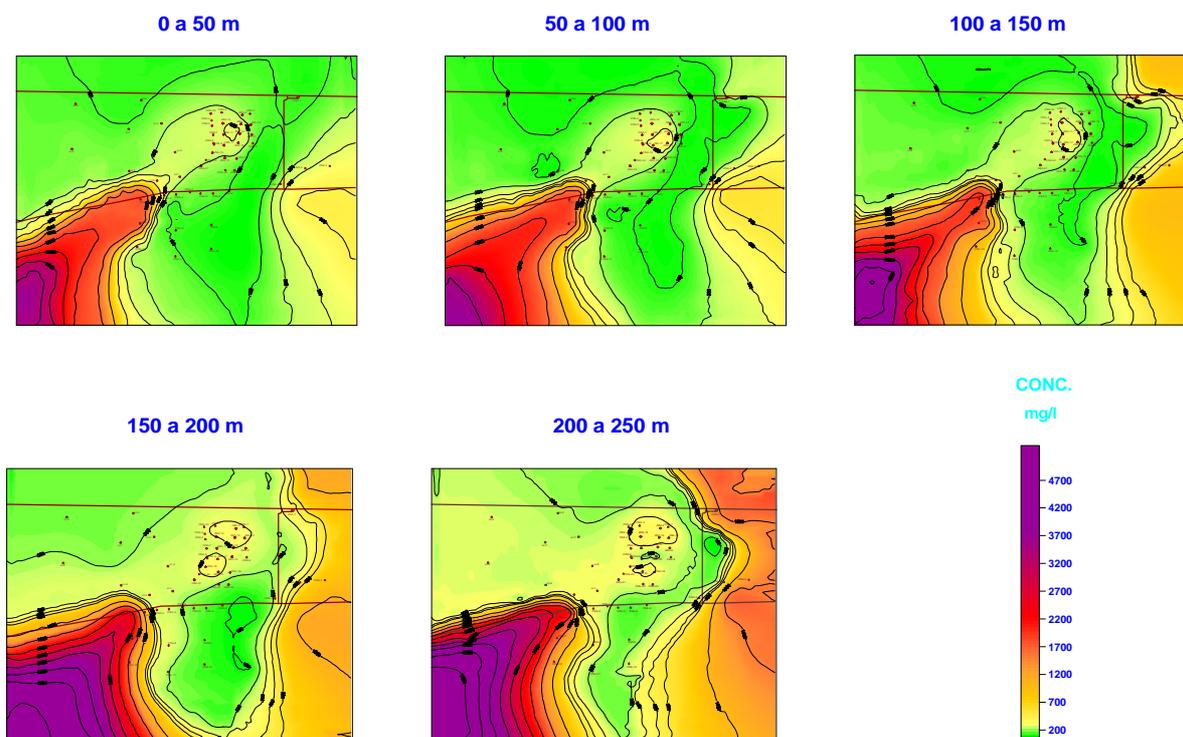
**ESTADO ESTACIONARIO**



La configuración de la elevación del nivel estático nos muestran que existen pendientes ( $dh/dx$ ) muy suaves de alrededor de 0.00058 en prácticamente toda la zona, excepto en la zona sur de la Sierra de Juárez donde existe un abrupto cambio de pendiente debido a un cambio en la permeabilidad de los sedimentos, reduciendo drásticamente las propiedades hidráulicas del acuífero y a la influencia del bombeo de los pozos de agua potable de la zona sur de Cd. Juárez.

En cuanto a la calidad del agua en este acuífero, se hicieron muestreos a diferentes profundidades en 23 pozos, lo cual arrojó información de la distribución de las concentraciones de algunos aniones y cationes, tanto en la horizontal como en la vertical. Como se muestra en la Figura 5, la tendencia de los cloruros es de incrementarse a profundidad, mientras que horizontalmente existen algunas zonificaciones de altas concentraciones, destacando el frente de altas concentraciones en la porción suroeste del área, en donde se nota la influencia de la Laguna el Barreal en donde se da el proceso de concentración de sales por la alta evaporación de las delgadas láminas de agua que se llegan a acumular de manera efímera. Los demás iones mayores obedecen al mismo patrón de distribución de los cloruros.

**FIGURA 5.- DISTRIBUCION DE CLORUROS A PROFUNDIDAD  
A PARTIR DEL NIVEL ESTATICO**



## ANÁLISIS Y CONCEPTUALIZACIÓN

Las conductividades hidráulicas (K) varían desde 6 a 0.1 m/d teniendo los valores mas altos hacia la porción noreste del área de estudio y los valores mas bajos hacia el sureste de la zona. Los valores hacia la zona central del área de estudio quedan dentro del rango de 2 y 3.5 m/d mientras que en el suroeste los valores varían alrededor de 1m/d. De la ecuación  $v=(K/n_e)(dh/dx)$  se obtuvieron velocidades de 0.00036 a 0.0216 m/d considerando una porosidad efectiva ( $n_e$ ) de 0.15.

Las velocidades obtenidas son para el estado cuasi-estacionario en el que actualmente se encuentra el acuífero, por lo cual no sería válido considerarlas para calcular distancias de recorrido a futuro de algun soluto, ya estando en funcionamiento las baterías de pozos de extracción, aunque se espera que en las áreas lejanas a las baterías no se afecten significativamente esos valores.

Dado que el objetivo principal del estudio es conocer el movimiento del agua de mala calidad como efecto de la extracción, se seleccionó el Cl<sup>-</sup> como soluto índice del movimiento de los frentes salinos, ya que su escasa reactividad con el medio poroso y fluido le dan buena movilidad y lo hacen menos complejo y con menos grado de incertidumbre para realizar una simulación de transporte de solutos dominada por el movimiento advectivo.

## INSTRUMENTACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO

La simulación de flujo se realizó mediante el código MODFLOW desarrollado por Michael G. McDonald y Alen W. Harbaugh, el cual es un modelo en tres dimensiones y utiliza el método numérico de diferencias finitas centrado en el bloque.

Este modelo resuelve la ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Donde:

$K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  y  $K_{zz}$  ( $Lt^{-1}$ ) Son las conductividades hidráulicas a lo largo de los ejes x, y, z respectivamente

$h$  Es la carga potenciométrica (L)

$W$  Es el término fuente-sumidero ( $t^{-1}$ )

$S_s$  Es el almacenamiento específico del medio poroso ( $L^{-1}$ )

$t$  Es el tiempo (t)

Se realizó la calibración del modelo para un estado estacionario, considerándose el lado derecho de la ecuación (1) como cero (no hay cambio en el almacenamiento), mientras que el termino fuente-sumidero (W) se utilizó para algunos pozos ubicados hacia la zona noreste del área.

En el plano horizontal se discretizó el área en celdas cuadradas de 1000 m de lado, mientras que en la vertical se discretizó en cinco capas de 50 m de espesor, tomando como referencia el nivel estático, siendo el espesor saturado a simular de 250 m. Se consideraron todas las fronteras imaginarias (límites arbitrarios) y físicas (sierras) como de carga constante, con el propósito de que el modelo evalúe las entradas y salidas de flujos laterales a través de las fronteras.

Las simulaciones a futuro se hicieron en un estado transitorio, es decir intervienen ambos lados de la ecuación (1). Como condiciones iniciales se tomó la distribución de cargas hidráulicas obtenidas de la simulación en estado estacionario así como la distribución de parámetros. Las condiciones de frontera se cambiaron a flujo prescrito con los valores de entradas y salidas obtenidos en estado estacionario, con lo cual se evita entradas excesivas de recarga lateral y se obtiene un margen de seguridad, sobre todo en aquellas fronteras cercanas a las baterías de pozos de extracción.

## **INSTRUMENTACIÓN DEL MODELO DE TRANSPORTE DE SOLUTOS**

La simulación de transporte de solutos fué realizado mediante el código MT3DMS desarrollado por Chunmiao Zheng y P. Patrick Wang y documentado por U.S. Environmental Protection Agency, es tridimensional capaz de simular advección, dispersión/difusión y reacciones químicas de contaminantes en sistemas de flujo de agua subterránea bajo condiciones geohidrológicas generales, además tiene una estructura multi-especies (MS) para acoplarse al paquete de reacciones. Este modelo toma la información hidrodinámica requerida, del archivo de salida de las simulaciones realizadas por el simulador MODFLOW.

De la ecuación de transporte:

$$\frac{c(\theta C^k)}{ct} = \frac{ct}{cX_i} \theta D_{ij} \frac{cC^k}{cX_j} - \frac{c}{cX_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + nR_n \quad \text{se tiene que:}$$

$C^k$  Es la concentración de la especie k en fase disuelta,  $ML^{-3}$  ;

$\theta$	Es la porosidad del medio poroso, adimensional;
$t$	Es el tiempo, $t$ ;
$x_i$	Es la distancia a lo largo del eje de las respectivas coordenadas, $L$ ;
$D_{ij}$	Coeficiente de dispersión hidrodinámica, $L^2T^{-1}$ ;
$v_i$	Es la velocidad lineal de poro, $L T^{-1}$ ; relacionada a la ecuación $v_i=q_i/\theta$ ;
$q_s$	Es el flujo volumétrico por volumen unitario de acuífero siendo fuentes de fluido positivo y los sumideros negativos, $T^{-1}$ ;
$C_s^k$	Es la concentración de la fuente o sumidero para la especie $k$ , $ML^{-3}$ ;
$nR_n$	Es el término de reacciones químicas, $ML^{-3}T^{-1}$ .

Específicamente para este modelo, el término de reacciones ( $nR_n$ ) se iguala a cero, ya que se considera al cloro como un ión estable. El término fuente-sumidero ( $q_s C^k$ ) es aplicado a los pozos de extracción, tanto de las baterías como a los ya existentes.

Para la simulación de transporte, se cerró la malla a celdas cuadradas de 500 m de lado y a capas de 25 m de espesor, las fronteras se asignaron como de concentración prescrita, según los valores que se tenían en la frontera dada la distribución de cloruros. Como condiciones iniciales se asignaron las distribuciones de cloruros obtenida de los muestreos verticales y mostradas en la figura 5.

Se simularon dos escenarios, el primero operando la batería que está en proyecto con un volumen de extracción de  $1m^3/s$ , un segundo escenario considerando  $1m^3/s$  adicional de extracción mediante otra batería ubicada aproximadamente a 10 km al oeste de la primera. De acuerdo con la distribución vertical de concentraciones de cloruros, los pozos de estas baterías se simularon con profundidad de doscientos metros, alcanzando en general a captar los primeros 120 m de espesor saturado que son los de mejor calidad.

De los resultados de las simulaciones (figuras 6 y 7), se puede observar que para el primer escenario la influencia del volumen extraído por la batería en los 20 años, no impacta significativamente a zonas tan lejanas como la del frente salino del suroeste y sureste.

Figura 6a.- ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO (msnm)  
1 m<sup>3</sup>/s A 20 AÑOS

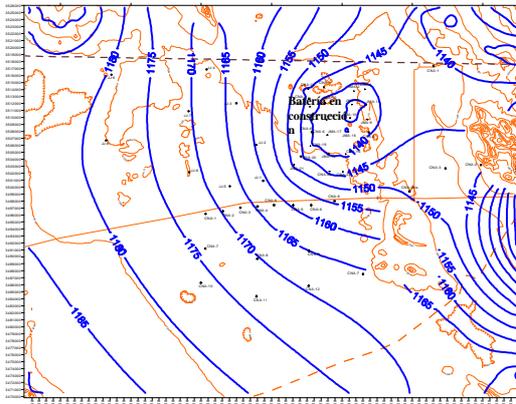


Figura 6b.- ABATIMIENTOS (m)  
1 m<sup>3</sup>/s A 20 AÑOS

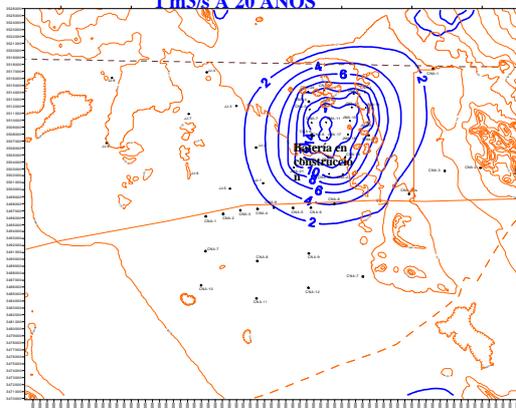


Figura 7a.- ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO (msnm)  
2 m<sup>3</sup>/s A 20 AÑOS

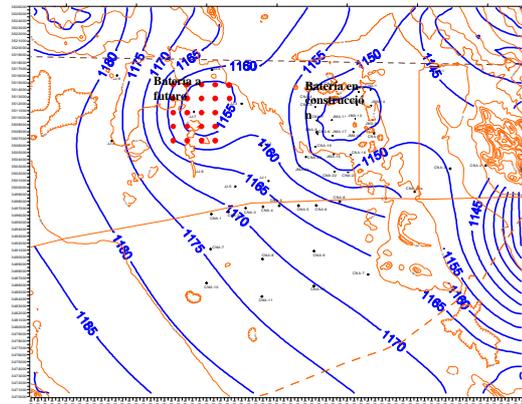
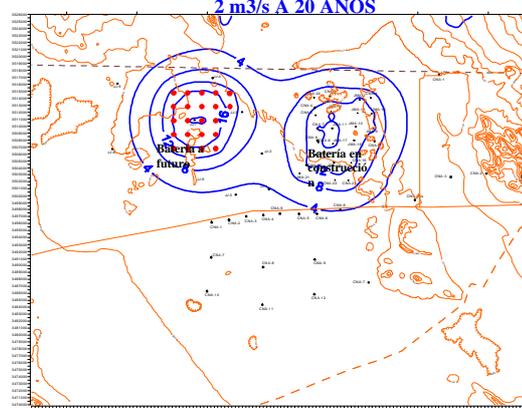


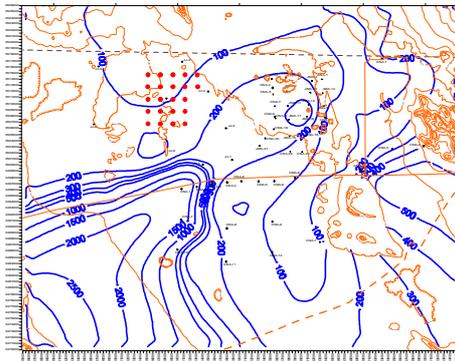
Figura 7b.- ABATIMIENTOS (m)  
2 m<sup>3</sup>/s A 20 AÑOS



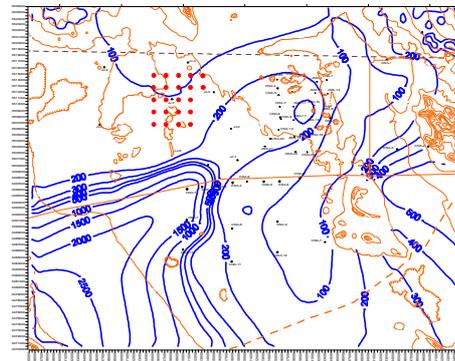
Para el segundo escenario se puede observar una respuesta más sensible, hacia la zona norte del acuífero, esto como resultado de las conductividades hidráulicas más altas, además de su cercanía a las baterías. Esta respuesta es positiva, ya que el agua de mejor calidad se encuentra ahí.

En las figuras 8 y 9 se observa que para ambos escenarios, el movimiento de cloruros es apreciable en el área de baterías, con una tendencia a la homogenización en las concentraciones de cloruros en el agua, principalmente en los 100 m de espesor saturado más somero. Sin embargo, en la zona de los frentes salinos, el movimiento de cloruros apenas se aprecia, principalmente en el segundo escenario en donde su escaso movimiento va en dirección a la segunda batería.

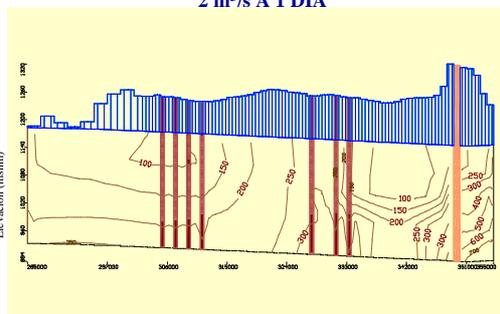
**Figura 8a.- DISTRIBUCION DE CLORUROS CAPA 2 (mg/l)**  
2 m<sup>3</sup>/s A 1 día



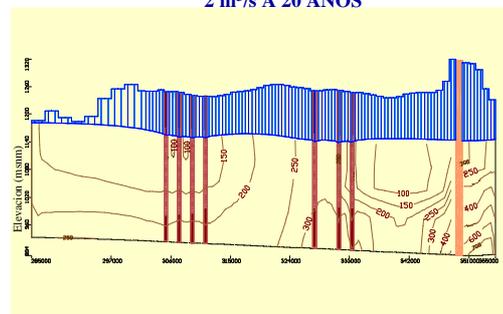
**Figura 9a.- DISTRIBUCION DE CLORUROS CAPA 2 (mg/l)**  
2 m<sup>3</sup>/s A 20 AÑOS



**Figura 8b.- DISTRIBUCION DE CLORUROS EN SECCION (mg/l)**  
2 m<sup>3</sup>/s A 1 DIA



2 m<sup>3</sup>/s A 20 AÑOS



## CONCLUSIONES

Para un periodo de 20 años, la velocidad del agua subterránea en la zona de batería, aumentó de 0.013 m/d para el estacionario, a 0.062 para el transitorio, lo que equivale a un incremento de 4.77 veces.

Dado que el movimiento de los cloruros en el acuífero está determinado por el movimiento del agua subterránea, los desplazamientos máximos de cloruros que se tienen a 20 años son de 500 m.

El frente salino más cercano a la batería se ubica entre las sierras de Juárez y Sapelló, a una distancia aproximada de 6 km. Por lo anterior, a corto plazo (20 años) los frentes salinos importantes en la zona no representan peligro para la batería de pozos, aunque hay la posibilidad de que existan cuerpos salinos pequeños, cercanos a la zona de explotación no detectados, asociados a estratos arcillosos.

El frente salino principal está directamente relacionado con ambiente lacustre (láminas delgadas de inundación efímeras y alta evaporación).

La calidad del agua en los primeros 100 m del acuífero, no cambiará significativamente y se mantendrá en general dentro de norma durante los primeros 20

años, solamente habrá mezclas de aguas en las capas más someras, que son las que poseen mejor calidad de agua.

Las conductividades hidráulicas más altas en la porción norte del área del modelo, permiten que la respuesta del acuífero sea más rápida en esa zona, lo cual es positivo, ya que ahí la calidad de agua es buena, y es la que se movería más rápido hacia la zona de baterías, mientras que las bajas conductividades de la zona sur no permiten un flujo muy rápido.

Los abatimientos simulados en el primer escenario ( $1\text{m}^3$ ) a 20 años son de alrededor de 14 metros en la zona de la batería, mientras que para el segundo escenario ( $2\text{m}^3$ ) llegan a ser de hasta 18 m en la zona de la segunda batería.

La inversión proyectada en obra de conducción es viable, ya que el aprovechamiento de este acuífero suplirá el déficit actual en la ciudad, lo cual permitirá hacer un manejo de la actual fuente, que ya presenta abatimientos importantes y degradación de la calidad del agua.

## REFERENCIAS

- Mary P. Anderson and William W. Woessner, 1992.- Applied Groundwater Modeling, Simulation of Flow and Advective Transport.
- López Ramos, E., 1982.- Geología de México 3<sup>a</sup> Edición, Tomo I
- McDonald M. G. and Harbaugh A. W. 1988 .- A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model.
- Moreno, G., Kretschmar, T., Sanchez, R. y Rascón, E., 1999a .- Calidad del Agua en la Zona Sur del Acuífero de Conejos-Médanos, Juárez, Chih. (Bolsón de la Mesilla), JMAS, Reporte Técnico No. DSGEO-10/99.
- Moreno, G., Rascón, E., Sánchez, L., y Gómez, J., 1999b.- Prospección Hidrogeológica e Hidrogeoquímica en el Bolsón de la Mesilla en la Zona de Conejos-Médanos, Chih., JMAS, Reporte Técnico No. DSGEO-11/99.
- SARH, 1982.- Servicios de Prospección Geohidrológica en la Zona de la Estación Conejos-Medanos, en el Estado de Chihuahua, Dirección General de Aprovechamientos Hidráulicos, Subdirección de Geohidrología.
- Zheng, Ch. and Wang P. P., 1998.- A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model, The Hydrogeology Group The University of Alabama.