

Evolución de los modelos numéricos de flujo de agua subterránea en el acuífero de Ogallala en Texas

Alan R. Dutton^{1*} y Robert E. Mace²

¹ Bureau of Economic Geology, The University of Texas at Austin, University Station Box X, Austin, TX, 78713-8924, USA

² Texas Water Development Board, Capitol Station Box 13231, Austin, TX, 78711-3231, USA
*Alan.Dutton@beg.utexas.edu

RESUMEN

El acuífero de Ogallala es la fuente principal de agua para una gran parte del centro de los Estados Unidos. En Texas, por ejemplo, se bombea más agua de este acuífero con más de 70,000 pozos de irrigación, que de cualquier otro acuífero. Los niveles de agua en gran parte del acuífero en Texas declinaron en promedio más de 0.6 m/año durante el período 1950-2000.

Pocos acuíferos regionales han sido estudiados de manera tan extensa como el Ogallala, sin embargo, todavía queda mucho por aprender sobre su hidrogeología. Los modelos numéricos han sido herramientas importantes para ampliar nuestro conocimiento del acuífero, predecir de que manera pudiera responder el acuífero, identificar las necesidades de datos y determinar la política de administración del acuífero. Se han construido por lo menos 17 modelos para diferentes partes del acuífero de Ogallala en Texas. Las lecciones aprendidas de las tres décadas de modelaje del acuífero de Ogallala en Texas, pudieran tener aplicación en otras áreas que se encuentren en una etapa similar o más temprana, en la evolución del modelo de su acuífero.

Palabras clave: acuífero, modelos numéricos, acuífero de Ogallala, recursos hidrológicos

ABSTRACT

The Ogallala aquifer is the main source of water for much of the central United States. In Texas, for example, more water is pumped from this aquifer with more than 70,000 irrigation wells than from any other aquifer. Water levels in much of the aquifer in Texas declined an average of more than 0.6 m/yr during 1950-2000.

Few regional aquifers have been as extensively studied as the Ogallala yet much remains to be learned about its hydrogeology. Numerical models have been important tools for expanding our understanding of the aquifer, predicting how the aquifer might respond, identifying data needs, and supporting aquifer management policy. At least 17 models have been developed for parts of the Ogallala aquifer in Texas. Insights from three decades of modeling of the Ogallala aquifer in Texas might have application to other areas at a similar or earlier stage in aquifer model evolution.

Keywords: aquifer, numerical models, Ogallala aquifer, water resources

INTRODUCCIÓN

La Formación Ogallala de edad del Neógeno, constituye la mayor parte del acuífero de High Plains y se extiende sobre un área de más de 449,000 km² en la parte central de los Estados Unidos (Weeks y Gutentag, 1988). En Texas, esta formación cubre un área de 91,000 km² (Figura 1) y es la fuente principal de agua potable en la totalidad o parte de 46 condados de Texas

(Knowles *et al.*, 1984; Urban, 1992; Texas Water Development Board [TWDB], 1997). Del acuífero de Ogallala se extrae más agua que de cualquier otro acuífero en Texas y 96% de los aproximadamente 7,200 millones de m³ extraídos en 1994, se utilizaron para fines de irrigación (TWDB, 1997). En 1980, por ejemplo, más de 24,620 km² fueron irrigados con agua proveniente de más de 71,000 pozos de agua del Ogallala.

Como la recarga del acuífero (estimada en 540 mi-

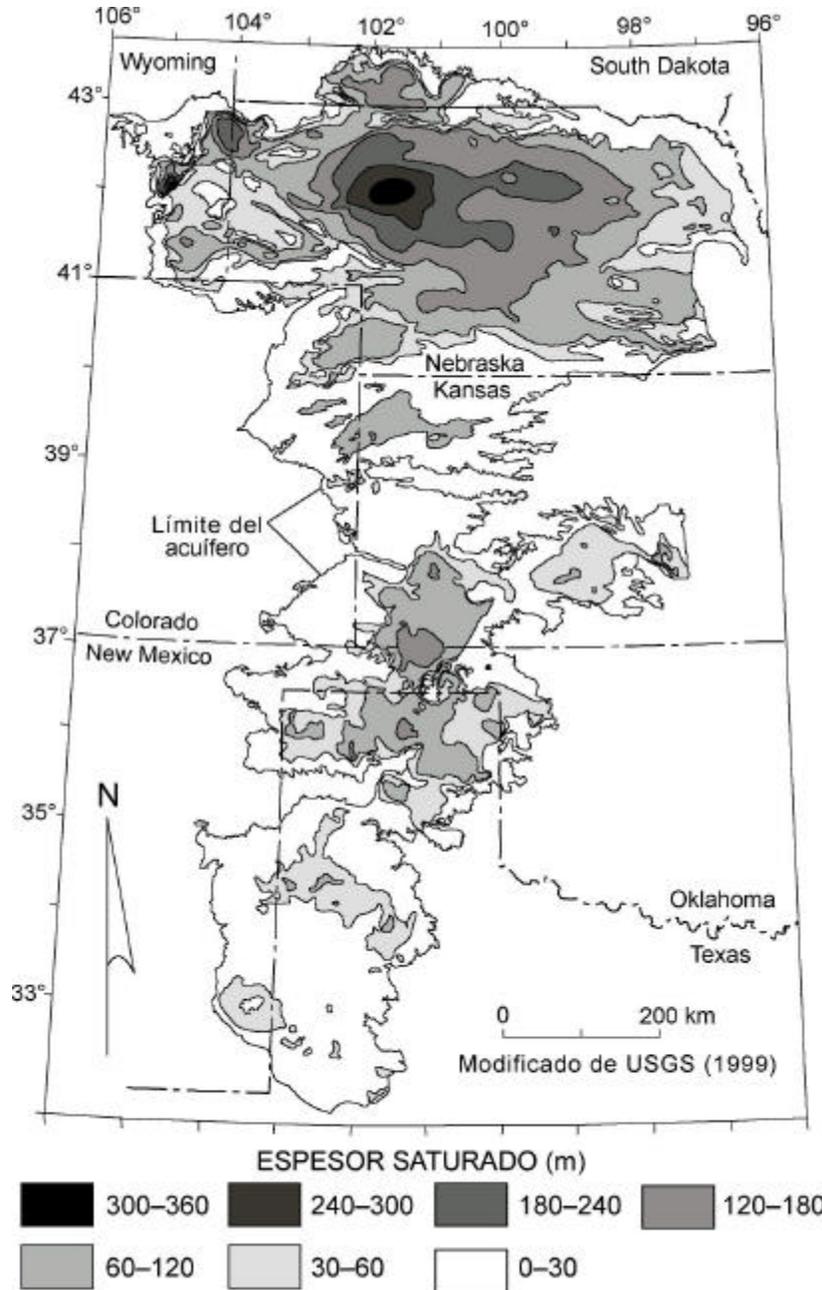


Figura 1. Extensión del acuífero de High Plains y espesor saturado del acuífero de Ogallala (modificado de Cederstrand y Becker, 1999). El límite del acuífero de Ogallala corresponde de manera general al límite del acuífero de High Plains. En 1980, el espesor saturado del acuífero de Ogallala era de más de 300 m en Nebraska y menos de 60 m en Texas.

lones de $\text{m}^3/\text{año}$ [TWDB, 1997]) es mucho menor que la descarga generada por el bombeo, los niveles freáticos en muchas partes del acuífero han declinado significativamente, lo que ha incrementado el costo de la extracción de agua y ha creado preocupaciones válidas con respecto al futuro del recurso y de la economía que depende de él. En los años de 1950 a 1980, la extracción aumentó a aproximadamente $3 \text{ km}^3/\text{año}$ (Figura 2a). Los niveles de agua en gran parte del acuífero en Texas descendieron en promedio más de 0.6 m/año durante el período 1950-2000 (Figuras 2b y 3), aunque en otras partes del acuífero se observó también una recuperación similar. Parte de esta recuperación en los niveles de agua se debió a la reducción de las extracciones impulsada por razones económicas, climatológicas y nuevas prácticas de administración de irrigación. Se pronostica que para el año 2050, el uso de agua en la región caerá en 62%, debido a la reducción en la irrigación causada por el suministro insuficiente de agua subterránea (TWDB, 1997). La reducción en el nivel freático del acuífero afecta también la descarga a los ríos y arroyos locales,

lo que a su vez pudiera conducir a conflictos de derechos de agua con los usuarios ubicados aguas abajo y amenazar las necesidades de hábitat de especies en peligro de extinción.

Pocos acuíferos regionales han sido tan extensamente estudiados como el Ogallala. Los modelos computarizados o numéricos del flujo de agua subterránea han sido herramientas importantes para administrar el recurso de agua subterránea y evaluar los cambios futuros en el nivel freático y el espesor saturado. Se han construido por lo menos 17 modelos numéricos del flujo de agua subterránea para diferentes partes del acuífero de Ogallala en Texas. Los modelos numéricos reúnen gran parte de la información conocida de un acuífero, permiten estimar de que manera las propiedades del acuífero afectan la respuesta del nivel de agua al bombeo, y ayudan a identificar aquellas ideas e interpretaciones conceptuales que necesitan un análisis más profundo. Cada uno de los modelos del Ogallala se ha hecho con un propósito específico en mente y por lo tanto, tienen fortalezas y debilidades.

RESUMEN DE LOS MODELOS APLICADOS AL ACUÍFERO DE OGALLALA

El acuífero es heterogéneo y generalmente tiene una permeabilidad alta. La parte de mayor productividad del acuífero no confinado bajo los High Plains está en un depósito de arena y grava del Neógeno que proviene de la erosión de las vecinas Rocky Mountains al oeste y constituye la parte basal de la Formación Ogallala. Estas arenas y gravas basales se depositaron en ambientes aluviales, fluviales, lacustres y eólicos. Los escarpes erosionales forman los límites del acuífero de Ogallala en la parte central de los Estados Unidos (Gustavson y Finley, 1985; Dutton, 1995) (Figura 1). La erosión de los ríos Pecos, Arkansas y South Platte dio lugar a que la mayor parte de las High Plains se separaran de las Rocky Mountains (Gustavson y Finley, 1985; Dutton, 1995). En 1980, el espesor saturado del acuífero de Ogallala era de más de 300 m en Nebraska y menos de 60 m en Texas (Figura 1). En la mayor parte del área, la precipitación anual promedio varía entre 380 y 635 mm/año .

El flujo de agua subterránea en el acuífero es generalmente de oeste a este, paralelo a la pendiente regional de la superficie topográfica (Gutentag *et al.*, 1984) (Figura 3). El acuífero tiene descargas a través de pozos emplazados en él y por filtración a manantiales localizados a lo largo de ríos principales y en el escarpe del borde de las High Plains. La recarga al acuífero es mínima, resultando en su mayor parte de la filtración de agua proveniente de cuencas de tipo playa (*playa basins*) (Nativ y Smith, 1987; Osterkamp y Wood, 1987; Nativ y Riggio, 1989; Mullican *et al.*, 1997). En la parte sur de los High Plains existen más de 20,000 cuencas de este tipo, las cuales son depresiones pequeñas ($< 1.6 \text{ km}$ de diámetro), de poca profundidad ($< 20 \text{ m}$), con drenaje interno, for-

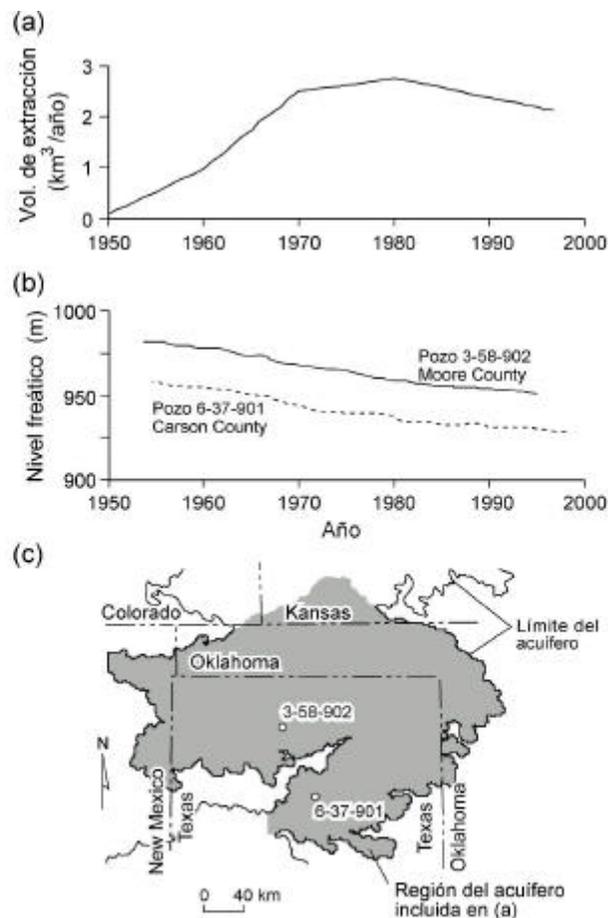


Figura 2. Cambios durante el período 1950 - 2000 en el volumen de extracción (a) y en los niveles piezométricos en dos pozos representativos (b) en el acuífero de Ogallala. La localización de los pozos se muestra en (c).

ma circular a oval, y con un lecho central plano llamado *playa*, que de forma intermitente contienen cuerpos de agua denominados *playa lakes* (Gustavson *et al.*, 1995).

La Tabla 1 muestra una lista en orden cronológico de los modelos de agua subterránea elaborados para la parte de Texas del acuífero de Ogallala. Cada uno de los modelos de recursos hidrológicos tiene sus fortalezas y debilidades específicas. Algunos de los modelos son de alcance local o subregional; cuatro de ellos (Tabla 1, modelos 1, 2, 5, 11) examinan problemas de recursos hidrológicos en uno o más condados (Figura 4a). Nueve de los modelos que aparecen en la Tabla 1 (modelos 4, 6, 9, 10, 12, 14, 15, 16, y 17) son de extensión regional (Figura 4b-f) y fueron desarrollados por universidades y agencias estatales y federales entre las que se cuentan la Comisión para el Desarrollo Hidrológico de Texas (Texas Water Development Board, TWDB), el Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. Geological Survey, USGS) y la Oficina de Geología Económica (Bureau of Economic Geology, BEG). Después de su desarrollo inicial, el modelo del TWDB (modelo 4) ha sido actualizado (modelo 10) y se ha convertido de un modelo PLASM (Prickett y Lonquist, 1971; Knowles, 1981) a un modelo MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) (Tabla 1, modelos 12, 14). MODFLOW es un código muy utilizado que incluye una variedad de preprocesadores y postprocesadores amigables para el usuario. Dos de los modelos (7, 8) se construyeron como parte de un estudio para evaluar la hidrología de formaciones más profundas (Andrews, 1984; Wirojanagud *et al.*, 1986); el

Ogallala fue incluido como una de las condiciones límite pero no fue el objetivo principal de estos estudios. El acuífero de Ogallala fue también incluido en una sección transversal del modelo (Figura 4a, modelo 3) utilizado en un estudio sobre una zona de disolución de sal (Simpkins y Fogg, 1982).

Claborn *et al.* (1970), de la Texas Tech University, en cooperación con el Distrito No. 1 de Conservación de Aguas Subterráneas de High Plains, construyeron el primer modelo del acuífero de Ogallala en Texas para ser utilizado como herramienta de administración (Figura 4a, modelo 1). Estos autores utilizaron un código poligonal de diferencias finitas, desarrollado por E. M. Weber del Departamento de Recursos Hidrológicos de California. Los autores concluyeron que los modelos numéricos podrían ser una herramienta valiosa para la administración del acuífero, pero que carecían de datos de alta calidad y, en particular, de estimaciones de descarga artificial exactas. Las debilidades de este modelo eran su extensión limitada, datos de calibración limitados, el gran tamaño de las celdas y los límites (no hidrológicos) artificiales.

Knowles (1984) y Knowles *et al.* (1982, 1984), construyeron modelos separados para las porciones norte y sur del Ogallala (Figura 4b, modelo 4) para la TWDB, utilizando un código PLASM modificado (Prickett y Lonquist, 1971). La división del Ogallala en dos modelos, permitió minimizar el número de celdas en cada modelo y de ese modo reducir el tiempo de cómputo, reflejando así las limitaciones en la capacidad de cómputo,

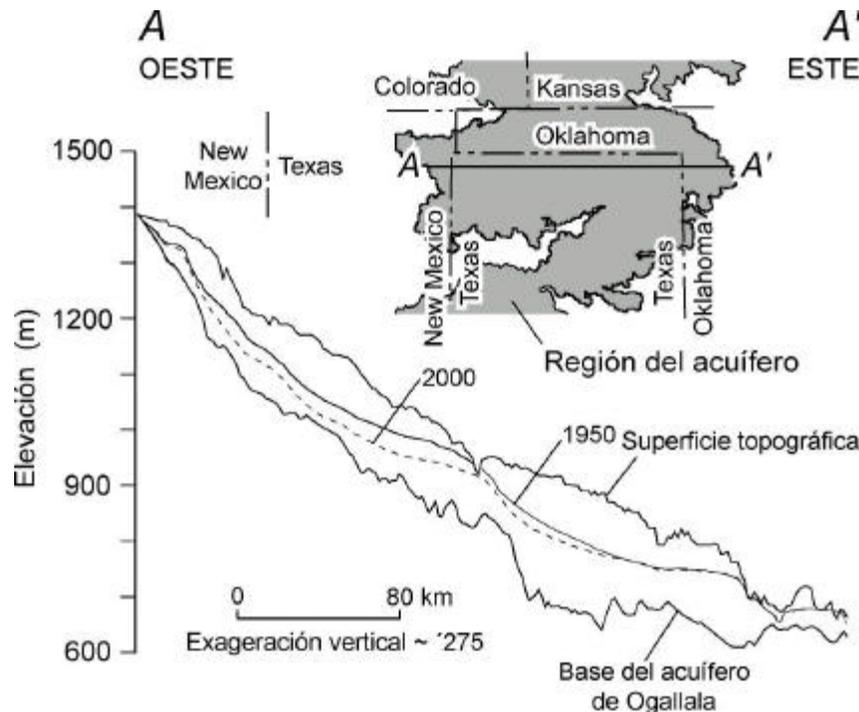


Figura 3. Sección transversal del acuífero de Ogallala. Se muestra el perfil de los niveles piezométricos en los años 1950 y 2000.

Tabla 1. Lista en orden cronológico de modelos del acuífero de Ogallala en Texas

Número de referencia	Autor(es)	Área de estudio	Propósito del modelo	Entidad	Código numérico
1	Claborn <i>et al.</i> (1970)	Condados en el sur de High Plains	Primer modelado del Ogallala	Universidad de Texas Tech	Modelo de poligonal de diferencias finitas (E.M. Weber, Dpto. de Recursos Hidrológicos de California)
2	Bell y Morrison (1979)	Condado Carson	Recurso hidrológico	Departamento de Recursos Hidrológicos de Texas ¹	Desconocido
3	Simpkins y Fogg (1982)	Modelo transversal	Evaluar una zona de disolución de sal	Oficina de Geología Económica	FLUMP, elementos finitos (Neuman y Narasimhan, 1977)
4	Knowles <i>et al.</i> (1982, 1984); Knowles (1984)	La parte del Ogallala en Texas	Recurso hidrológico	Departamento de Recursos Hidrológicos de Texas ¹	PLASM modificado (Knowles, 1981)
5	McAda (1984)	Partes del sur de High Plains	Recurso hidrológico	Servicio Geológico de los Estados Unidos	Modelo de diferencias finitas (Trescott <i>et al.</i> , 1976)
6	Luckey (1984); Luckey <i>et al.</i> (1986)	Centro de los Estados Unidos	Recurso hidrológico	Servicio Geológico de los Estados Unidos	Modelo de diferencias finitas construido para el estudio (Luckey <i>et al.</i> , 1986, p. 8)
7	Andrews (1984)	Cuenca de Palo Duro	Análisis del sistema de flujo regional en la parte profunda de la cuenca	INTERA, Inc., Houston, Texas	SWENT, modelo de diferencias finitas (INTERA, 1983)
8	Wirojanagud <i>et al.</i> (1986)	Parte central del sur de High Plains	Evaluar el flujo entre formaciones y en la parte profunda de la cuenca	Oficina de Geología Económica	TRAVEL (Charbeneau y Street, 1978)
9	Luckey y Stephens (1987)	Parte sur del High Plains	Sensibilidad del tamaño de la malla	Servicio Geológico de los Estados Unidos	Modelo de diferencias finitas construido para el estudio (Luckey <i>et al.</i> , 1986)
10	Peckham y Ashworth (1993)	La parte del Ogallala en Texas	Recurso hidrológico (modificación del modelo de Knowles [1984] y Knowles <i>et al.</i> [1984])	Comisión para el Desarrollo Hidrológico de Texas	PLASM modificado (Knowles, 1981)
11	Mullican (1995)	Dos condados	Impacto de un campo de pozo propuesto	Distrito No. 3 de Conservación de Aguas Subterráneas en el Panhandle	MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988)
12	Dorman (1996)	Parte sur del High Plains	Recurso hidrológico (conversión del modelo de Knowles [1984] y Knowles <i>et al.</i> [1984] a MODFLOW)	Universidad de Texas Tech (Tesis de Maestría)	MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988)
13	Mullican <i>et al.</i> (1997)	Norte del Arroyo Palo Duro y sur del Río Canadian, Texas	Evaluar las tasas de recarga y el transporte advectivo	Oficina de Geología Económica	MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988)
14	Harkins (1998)	La parte del Ogallala en Texas	Recurso hidrológico (conversión del modelo de Knowles [1984] y Knowles <i>et al.</i> [1984] a MODFLOW)	Universidad de Texas Tech (Tesis de Doctorado)	Versión modificada de MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988)
15	Luckey y Becker (1999)	La parte del Ogallala en Oklahoma (norte del Río Canadian y sur del Río Cimarron)	Recurso hidrológico	Servicio Geológico de los Estados Unidos	MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988)
16	Dutton <i>et al.</i> (2000)	Parte central de High Plains (norte del Cañón Palo Duro y sur del Río Cimarron)	Recurso hidrológico	Oficina de Geología Económica	MODFLOW (Harbaugh y McDonald, 1996); Processing Modflow (Chiang y Kinzelbach, 2001)
17	Stovall <i>et al.</i> (2001)	Parte sur de High Plains	Recurso hidrológico	Universidad de Texas Tech	MODFLOW (Harbaugh y McDonald, 1996); Ground-water Vistas (Environmental Solutions, Inc., 1998)

¹Predecesor de lo que hoy es la Comisión para el Desarrollo Hidrológico de Texas.

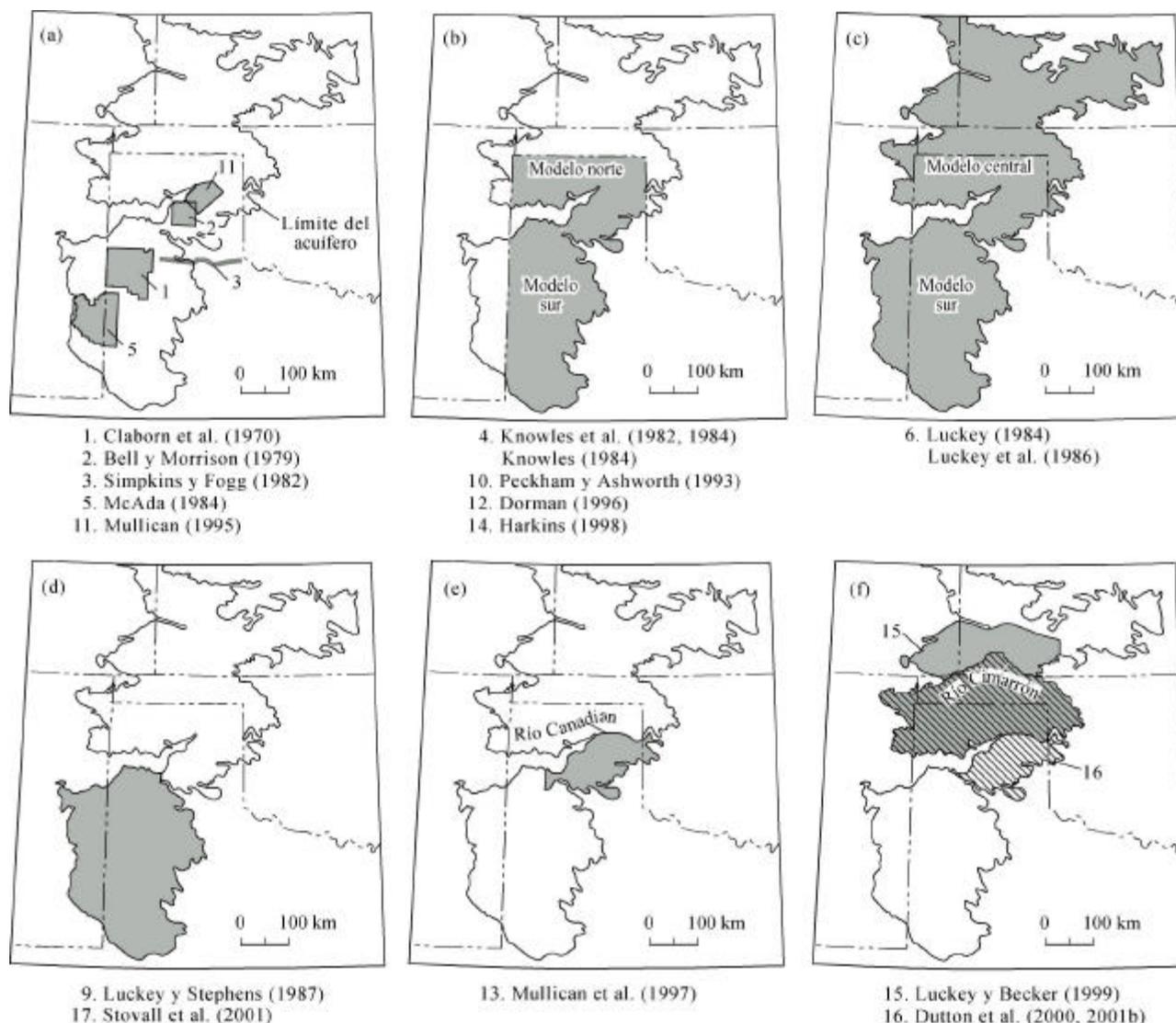


Figura 4. Ubicación de los modelos (sombreado) del acuífero de Ogallala en Texas y estados contiguos. Los modelos se resumen en la Tabla 1.

que era mucho menor en 1984 de lo que es ahora. Los resultados de los modelos indicaron que, de mantenerse las proyecciones de la demanda, el suministro de agua subterránea sería insuficiente para el año 2030. Después de una vida de diez años de los modelos, Peckham y Ashworth (1993) auditaron los resultados de los modelos, ajustaron las tasas de recarga y actualizaron las tasas de extracción. Dorman (1996) y Harkins (1998), convirtieron los modelos para que éstos puedan utilizar MODFLOW. Se hicieron otros cambios para poder calcular internamente los ajustes a la tasa de extracción con base en la transmisividad y el espesor saturado. Los modelos modificados mostraron un ligero aumento en la disponibilidad de agua, relacionados tal vez con algunos cambios en las proyecciones de la demanda, pero continuaron pronosticando una reducción general en el nivel freá-

tico de 1990 a 2040. Harkins (1998) señaló que, incluso si la extracción para irrigación se redujera a la mitad, diez condados en el área del modelo sur se encontrarían en peligro de agotar severamente el acuífero.

Las dos ventajas de los modelos del TWDB son que utilizan parámetros basados en datos hidrogeológicos y estimaciones actualizadas de las tasas de recarga y descarga artificial. El modelo de Harkins (1998) sigue siendo la actualización más reciente del modelo del TWDB y es reconocido como el modelo de administración de agua más apropiado para el área. Sus debilidades son las limitaciones continuas en los datos de entrada, los límites artificiales al oeste y al norte, las proporciones no realistas entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas, y el mallado relativamente grueso (el ancho de la celda es de 4.66 km). Además, la conversión

entre las versiones PLASM y MODFLOW de los modelos es cuestionable, debido a la forma en que es tratada la frontera artificial en el límite de Estado.

Luckey (1984) y Luckey *et al.* (1986), construyeron unos modelos del acuífero de Ogallala como parte del programa de Análisis de Sistemas de Acuíferos Regionales (RASA) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Estos modelos del sur y centro del acuífero de High Plains incluye al acuífero de Ogallala en Texas (Figura 4c, modelo 6). Los modelos utilizan el código de Trescott *et al.* (1976), modificado por Larson (1978) y Luckey *et al.* (1986), para mejorar el control de los parámetros de iteración, restringir la variación en la transmisividad (esto es, el espesor saturado) entre iteraciones y considerar condiciones de frontera de gradiente constante para un acuífero ilimitado. El modelo por Luckey y Becker (1999) cubre una parte del área incluida en el modelo RASA central (comparar Figuras 4c y 4f, modelo 15). Este nuevo modelo con celdas de 1.8 km de ancho, consiste de una sola capa y está actualizado con datos hidrogeológicos recolectados en la década de los ochenta. Los modelos incluyen también estimaciones de los flujos de retorno de riego y están corregidos por bombeo (Luckey y Becker, 1999). El análisis de sensibilidad demostró que las estimaciones de la descarga eran sumamente dependientes de los valores asignados a la conductividad hidráulica. Se pronosticaron reducciones de nivel freático de más de 33 m entre 1980 y 2020.

Luckey y Stephens (1987) reexaminaron el modelo sur de Luckey *et al.* (1986) (Figuras 4c y 4d) para determinar el efecto de reducir el ancho de celda de 16 km a 8 km. El tamaño de celda más pequeño produjo unas pequeñas diferencias en los niveles de agua pronosticados, pero se llegó a las mismas conclusiones generales. Los modelos del USGS incluyen datos basados en estudios hidrogeológicos y consideran el flujo de retorno y los límites naturales del acuífero. Entre sus debilidades se cuentan la manera en que determinan la proporción entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas, así como el mallado extremadamente grueso. Luckey y Becker (1999) redujeron el ancho de celda a 1.8 km. Su modelo fue calibrado utilizando el nivel freático observado y la descarga de ríos a partir de 1998 para predecir los cambios en el nivel freático hasta el año 2020. Stovall *et al.* (2001) desarrollaron su modelo de recursos de agua combinando los modelos de Harkins (1998) y Luckey *et al.* (1986) con celdas de 1.6 km y recalibrando los parámetros.

Mullican *et al.* (1997) investigaron tanto el papel del agua de las lagunas intermitentes de tipo playa (*playa lakes*) en la recarga del acuífero de Ogallala como el movimiento advectivo de los iones solubles en el agua subterránea. El modelo de estos autores estaba limitado por un río importante (Figura 4e, modelo 13). El ancho de las celdas era variable y oscilaba entre 0.4 km y 1.6 km. El modelo se calibró primero para condiciones de estado estacionario y luego para condiciones transitorias hasta 1990. Los resultados indicaron que el nivel freático si-

mulado era independiente de la distribución espacial de la recarga en el modelo, ya sea que ésta estuviera concentrada en las lagunas intermitentes, distribuida de manera discrecional entre zonas o distribuida de manera uniforme sobre toda la superficie. El modelo de Mullican *et al.* (1997) incluye un tratamiento más realista de los límites del acuífero. Las limitaciones en los datos, especialmente en los datos correspondientes a transmisividad, es una debilidad inherente de este modelo así como de otros. Como el objetivo del modelo era evaluar los diferentes escenarios de recarga y el transporte de contaminantes, no se pueden hacer predicciones de los niveles de agua en respuesta al bombeo en el futuro. Sin embargo, dicho modelo tuvo que asignar tasas de extracción más bajas que las utilizadas por Knowles *et al.* (1984), lo que ocasionó una reducción excesiva en los niveles de agua.

Dutton *et al.* (2000, 2001a, 2001b) desarrollaron su modelo regional (Figura 4f, modelo 16) utilizando los resultados obtenidos por Mullican *et al.* (1997) y Luckey y Becker (1999). Dutton *et al.* (2000, 2001a, 2001b) determinaron la distribución de la conductividad hidráulica (Figura 5), la recarga y otros parámetros hidrogeológicos que varían en espacio y tiempo. Estos autores asignaron los volúmenes de extracción con base en un estudio de irrigación y otros datos complementarios. El flujo de retorno por irrigación fué sumado a la recarga ambiental en función del volumen de irrigación, tipo de suelo, eficiencia de la irrigación, profundidad del nivel freático y tiempo de viaje desde la zona vadosa hasta el nivel freático. Se utilizó un ancho de celda de 1.6 km en todo el modelo. El modelo de estado estacionario fue calibrado para simular el acuífero durante un período de 6,000 años sin extracción de agua. Los niveles freáticos simulados durante ese período fueron comparados con los niveles piezométricos en el año 1950. El modelo fue calibrado utilizando datos de 1950 a 1998 para predecir cambios del nivel del agua hasta el año 2050.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS, PARÁMETROS Y CONDICIONES DE LOS LÍMITES DEL ACUÍFERO

Los modelos son, por definición, aproximaciones y simplificaciones de un sistema natural. Las suposiciones y las soluciones de compromiso debidas a las limitaciones en la capacidad de cómputo, la precisión limitada del proceso de solución, la escasez de fondos y la insuficiencia de los datos de entrada, pueden matizar los resultados y las predicciones.

Las cuatro categorías de información de entrada necesarias para la construcción de un modelo son 1) las condiciones iniciales y de frontera; 2) la geometría del acuífero; 3) los parámetros del acuífero; y 4) la historia de recarga y descarga en el acuífero (Luckey *et al.*, 1986). Las limitaciones en los datos de entrada afectan la precisión y aplicabilidad de los modelos. Una quinta ca-

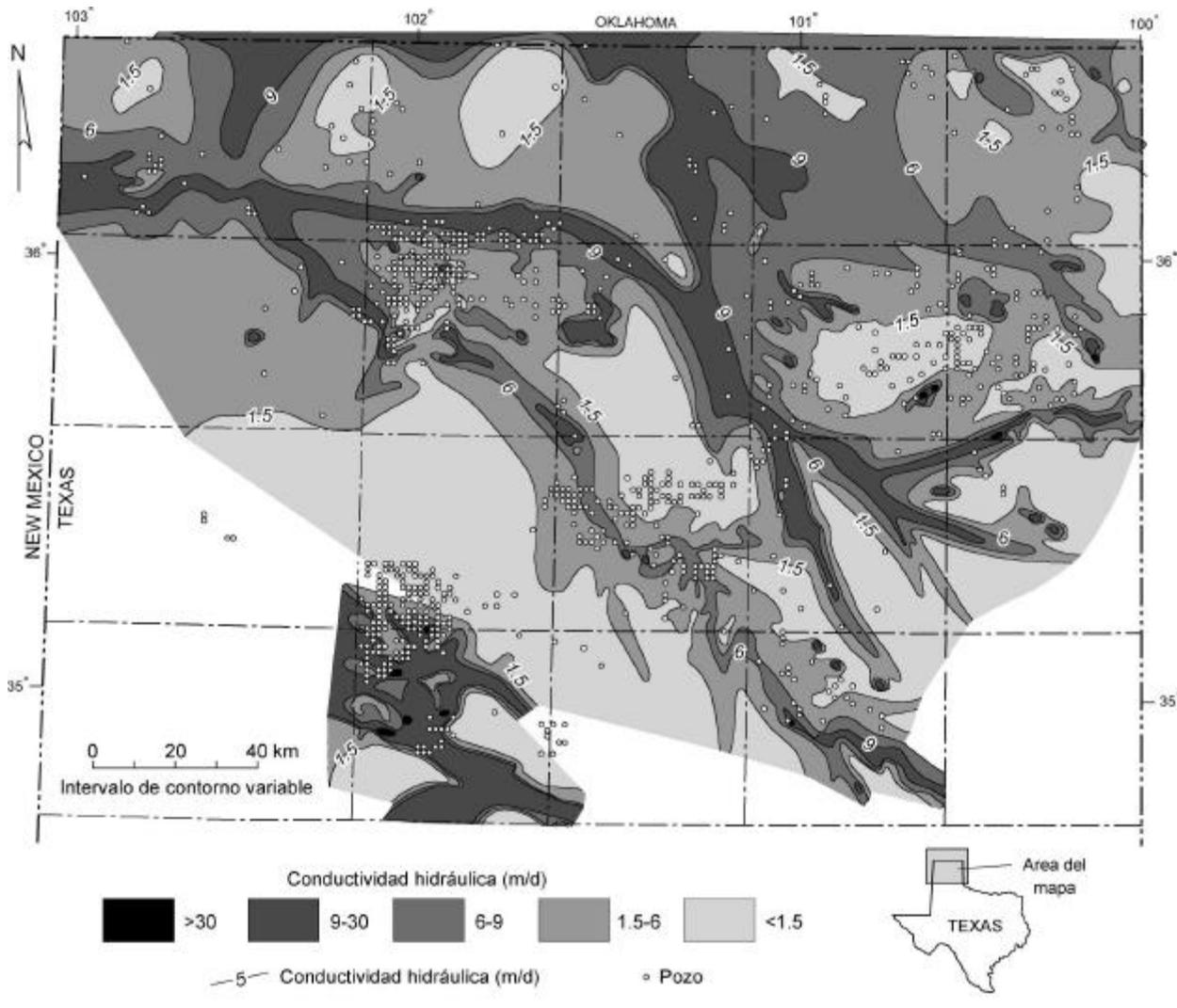


Figura 5. Mapa de conductividad hidráulica en el acuífero de Ogallala en el parte norte de Texas. La conductividad hidráulica fue calculada con base en la capacidad específica. Las curvas de nivel se trazaron con base en los sistemas sedimentarios en la Formación Ogallala (Seni, 1980).

tegoría importante de información pudiera ser la arquitectura del modelo: el código, el tamaño de la malla y el número de capas. El modelo de Claborn *et al.* (1970), que fue el pionero en el uso del modelado numérico en la parte de Texas del acuífero de Ogallala, es muy limitado porque su código es desconocido. Los primeros modelos regionales estaban limitados por la capacidad de cómputo y la poca disponibilidad de información hidrogeológica; el tamaño de la malla era grueso y los datos eran limitados. Hoy en día, el tamaño de las celdas puede ser mucho más pequeño debido a que el costo de la memoria de las computadoras se ha reducido considerablemente. Sin embargo, la información hidrogeológica no ha aumentado a la misma velocidad que la capacidad de simular la presencia y el movimiento del agua subterránea utilizando celdas muy pequeñas. Hoy en día, el tamaño de la celda está limitado más bien por el objetivo

del modelo y los datos hidrogeológicos, y no por el tiempo de cómputo.

Los parámetros utilizados por diferentes modelos en el acuífero de Ogallala se describen a continuación:

Condiciones de Frontera

Los modelos numéricos resuelven la ecuación general del flujo de aguas subterráneas utilizando condiciones de frontera y condiciones iniciales específicas (una condición de frontera en un tiempo específico). Las condiciones de frontera incluyen los seis lados o flancos del acuífero modelado, aunque también se pueden aplicar límites internos como ríos o drenajes. Todos los modelos regionales consideran la base del Ogallala como un límite a través del cual no hay flujo. Algunos estudios ante-

riores (Simpkins y Fogg, 1982; Andrews, 1984; Wirojanagud *et al.*, 1986; Dutton, 1995) sugieren que una cantidad limitada de agua fluye a través de la base del acuífero, sin embargo, el análisis de sensibilidad realizado por Luckey *et al.* (1986) mostró que las simulaciones de recursos hidrológicos del acuífero de Ogallala son insensibles a esos flujos, debido a que son pequeños en comparación con los volúmenes de recarga y descarga artificial y, por lo tanto, pueden ser ignorados.

Las diferencias más importantes entre los modelos son las condiciones de frontera laterales. Los límites laterales pueden colocarse en tres lugares: 1) en límites físicos, como el borde de una formación o un río; 2) en límites hidráulicos como parteaguas y cauces de aguas subterráneas; y 3) en límites artificiales arbitrariamente colocados lejos del área de interés, al otro lado de cauces. Las fronteras físicas pueden ser representadas por una variedad de condiciones, dependiendo del tipo de límite. Los límites hidráulicos son representados por fronteras a través de las cuales no hay flujo, mientras que los límites artificiales generalmente son representados por fronteras de carga constante.

De los tres tipos de límites, los límites físicos e hidráulicos son preferibles porque son los que representan de manera más fiel los límites verdaderos en un sistema natural. Los límites artificiales se usan generalmente para delimitar el área aguas arriba o aguas abajo del modelo en función del área de interés y son más apropiados para modelos de estado estacionario. Son apropiados también para modelos transitorios, pero solamente cuando la variación de los niveles de agua en el límite sea mínima en el tiempo y el área de interés se encuentre a una distancia suficiente del límite.

La mayoría de las fronteras laterales en los modelos del USGS son físicas y se localizan en el borde de la Formación Ogallala (Figura 4c, modelo 6; Figura 4d, modelo 9; Figura 4f, modelo 15). En estos modelos, la frontera en el flanco oriental del afloramiento fue designada como de carga constante, para simular la descarga natural del acuífero en el afloramiento. Los otros límites fueron asignados sin flujos (Luckey *et al.*, 1986; Stovall *et al.*, 2001). Esto asume que el parteaguas subterráneo se localiza cerca de la frontera occidental y que la descarga en esta frontera representa solamente una fracción menor de la descarga de agua subterránea en el acuífero del Ogallala.

Los modelos del USGS y otros modelos utilizan una frontera artificial al sur del Río Canadian, donde el acuífero es estrecho (~50 km) y donde el espesor saturado es menor que 30 m, para dividir el modelo regional en submodelos (Figura 4b; modelos 4, 10, 12, y 14; Figura 4c, modelo 6; Figura 4d, modelo 9) o limitar la extensión del modelo subregional (Figura 4d, modelos 9 y 17; Figura 4e, modelo 13; Figura 4f, modelo 16). La frontera artificial es representada por las condiciones de gradiente constante de la frontera definida por Luckey *et al.* (1986, modelo 6) y esta representada por la frontera de carga general (*general-head boundary*) de Mullican *et al.*

(1997) y Dutton *et al.* (2000, 2001b). Los límites físicos de los modelos del BEG (modelos 13, 16, Tabla 1) fueron representados por drenes que simulan filtraciones y manantiales en el flanco del acuífero. Mullican *et al.* (1997) representan las fronteras artificiales en los flancos oriental y occidental del modelo utilizando la opción MODFLOW que permite una frontera de carga general (*general-head boundary*), es decir, un límite de carga constante cuya conductancia controla la cantidad de flujo que entra o sale por ese límite. En el flanco noreste del modelo se utilizó un límite de río para simular la descarga del acuífero al Río Canadian y se considera que todas las descargas al río emanan del Ogallala al sur del río. La carga hidráulica en los límites artificiales se estableció con base en los niveles de agua en 1960. Al comparar los niveles de agua medidos en 1960 y 1990, se observa un cambio considerable en el flanco Oeste del modelo, mientras que en el límite Este el cambio es pequeño. Las simulaciones transitorias hasta 1990, indican que el modelo no produce un buen cotejamiento de la carga hidráulica cerca de la frontera artificial oeste. Como no se observó una reducción significativa del nivel cerca de la frontera artificial Este, se concluyó que este límite probablemente no tenía mucho efecto en los resultados.

El perímetro del modelo regional de Dutton *et al.* (2000, 2001b) está definido principalmente por los límites de la Formación Ogallala (Figura 4f, modelo 16). La frontera en el flanco norte del modelo es un río principal (Río Cimarrón) y la frontera al suroeste es la carga hidrostática utilizada en el modelo norte de Knowles *et al.* (1982, 1984), en el modelo central de Luckey (1984) y Luckey *et al.* (1986), y en el modelo de Mullican *et al.* (1997).

Los modelos del TWDB tienen límites físicos para los flancos del acuífero que caen dentro de los límites del Estado y límites artificiales en aquellos casos en que el acuífero entra en un Estado limítrofe y en la intersección entre los modelos norte y sur cerca de Palo Duro Creek (Figura 4b). En el flanco Este del modelo sur se colocó una frontera de carga constante para simular la descarga del acuífero por filtraciones y manantiales. El código que se utilizó inicialmente en los modelos del TWDB fue modificado para corregir la carga hidráulica en el límite artificial en función del tiempo. Posteriormente, Dorman (1996) y Harkins (1998) trataron a los límites artificiales como límites de carga constante, con valores de carga hidráulica basados en los niveles de agua de 1990. Esta es una decisión problemática, ya que a medida que los niveles de agua descienden en el acuífero, se sobrevalora la aportación de agua al acuífero por las fronteras artificiales. Por lo tanto, los niveles de agua cerca de los límites artificiales resultan sobreestimados y el error se incrementa con el tiempo. Los modelos desarrollados por Luckey (1984), Luckey *et al.* (1986), Luckey y Stephens (1987), Luckey y Becker (1999), Dutton *et al.* (2000, 2001b), y Stovall *et al.* (2001) evitaron este problema al utilizar límites físicos en lugar de límites artificiales.

Geometría del Acuífero

La geometría del acuífero consiste en las dimensiones físicas del acuífero: la topografía de la cima y la base, así como la localización de los flancos del acuífero. De todos los datos de entrada, la geometría del acuífero se puede probablemente caracterizar de la mejor manera cuando: la estructura de la cima y la base del acuífero están definidas por un gran número de pozos (y por la topografía del terreno donde el Ogallala está expuesto), los niveles de agua son medidos regularmente por los distritos de aguas subterráneas para definir la cima del acuífero y los mapas geológicos muestran la extensión lateral del acuífero. Aunque el espesor de la formación no está definido con precisión en cada punto del acuífero, esa incertidumbre es aceptable y no se espera que afecte significativamente los resultados de un modelo. La mayor incertidumbre reside en la distribución de los niveles freáticos en el acuífero antes del inicio de su explotación.

Parámetros del Acuífero

La conductividad hidráulica (o la transmisividad) y el coeficiente de almacenamiento, son parámetros que se deben incluir en los modelos utilizados para simulaciones transitorias. Los datos para estos parámetros siempre son escasos y por eso, en grandes áreas de los modelos se estiman sus valores. Los modelos del USGS utilizaban conductividades hidráulicas y coeficientes de almacenamiento basadas en registros de pozos (Gutentag *et al.*, 1984), y valores corregidos durante la calibración para cotejar los niveles de agua simulados y observados. La conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento en los modelos del TWDB estaban basadas en mediciones de testigos de 41 pozos de prueba en el acuífero y en pruebas geofísicas de superficie. El modelo de Mullican *et al.* (1997) utilizó datos de pruebas de capacidad específica de 70 pozos para definir la conductividad hidráulica en el acuífero. Muchas de las pruebas estaban concentradas en pocas áreas y después de obtener los promedios de las áreas de concentración de datos, sólo quedaron 14 puntos para estimar la conductividad hidráulica en todo el acuífero. Dutton *et al.* (2000, 2001a, 2001b) incorporaron datos adicionales de 1270 pruebas de capacidad específica (Figura 5) utilizando una técnica analítica desarrollada por Theis (1963) y descrita por Mace (2001).

De manera general, se puede decir que la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento no varían mucho en el acuífero de Ogallala. Mullican *et al.* (1997), demostraron, con base en 70 pruebas, que la conductividad hidráulica varía en menos de 2 órdenes de magnitud, desde un mínimo de 0.5 m/d hasta un máximo de 33 m/d. La abundante información de Dutton *et al.* (2000, 2001b) mostró un rango de casi 4 órdenes de magnitud de 0.06 hasta aproximadamente 300 m/d. Los

modelos del USGS y del TWDB utilizaban valores de conductividad hidráulica que variaban en aproximadamente un orden de magnitud (la variabilidad disminuía cuando el tamaño de celda era más grande). Knowles *et al.* (1984), calcularon la conductividad hidráulica promedio en cada celda de los modelos TWDB, y luego suavizaron los valores para asegurar una solución estable en el modelo. Ashworth (1980, p. 20), no logró identificar, con base en los registros de pozos, ninguna relación entre la permeabilidad, el coeficiente de almacenamiento y la profundidad. El coeficiente de almacenamiento (*specific yield*) en el acuífero varía de 0.8 a 0.20.

Aunque la conductividad hidráulica no varía mucho, sigue siendo importante tener valores estimados bien fundamentados. El USGS observó que la recarga podía determinarse con precisión, únicamente si se conocía la conductividad hidráulica (Luckey *et al.*, 1986). Las celdas de tamaño grande (especialmente las que se utilizaban en el modelo del USGS) no permiten una representación detallada de la distribución de la conductividad hidráulica. Para los problemas regionales a gran escala, esta aproximación general de la conductividad hidráulica pudiera ser suficiente. Sin embargo, a medida que la escala de interés se hace más pequeña (por ejemplo, alrededor de un campo de pozos), las variaciones en la conductividad hidráulica se hacen más importantes, especialmente en los acuíferos más heterogéneos (Fogg *et al.*, 1998).

Dutton *et al.* (2000, 2001a, 2001b) determinaron la distribución de la conductividad hidráulica (Figura 5) con base en los patrones de sistemas de depósito y porcentajes de arena y grava en la Formación Ogallala (Seni, 1980). En las áreas ricas en información se descubrió que las zonas de alta conductividad hidráulica corresponden a canales de depósito. En áreas con pocos datos, la localización de angostos canales de alta conductividad hidráulica no fué precisada.

Stovall *et al.* (2001) utilizaron la autocalibración de Groundwater Vistas (Environmental Solutions, Inc., 1998) para estimar secuencialmente la conductividad hidráulica y la recarga. Debido a que la calibración del modelo depende tanto de la conductividad hidráulica como de la recarga, estos dos parámetros son ajustados conjuntamente.

Recarga

La cima de un modelo es tratado generalmente como un límite de volumen de flujo especificado para representar la recarga al acuífero. La mayoría de los autores consideran un volumen de flujo uniforme o un volumen de flujo zonificado hacia el acuífero. Mullican *et al.* (1997), demostraron que el hecho de distribuir la recarga de manera discrecional, zonificada o uniforme tenía poco impacto en las predicciones numéricas de los niveles de agua en el modelo a escala regional. La verdadera cantidad de recarga que se aplica al límite de volumen de flu-

jo especificado es importante, porque afecta los niveles de agua y la calibración del modelo. Si bien es cierto que la recarga es un volumen pequeño en comparación con el volumen que se bombea actualmente, constituye un volumen grande cuando se suma de manera incremental durante los próximos 50 años. Los niveles de agua en algunas áreas del acuífero se han recuperado con respecto a sus mínimos históricos. Existen algunas diferencias entre las tasas de recarga utilizadas en estos modelos. Los modelos del TWDB originales (Knowles *et al.*, 1984) utilizaban una tasa de recarga de 1.5 a 6.3 mm/año. El modelo del TWDB modificado (Harkins, 1988; Dorman, 1996) y el modelo del USGS (Luckey *et al.*, 1986) utilizaron tasas de 1.4 a 9.9 mm/año para la mayor parte del área y en forma localizada 21.3 a 26.2 mm/año. Luckey *et al.* (1999) consideraron la precipitación y dos tipos de suelo al asignar escalas de recarga. En el modelo de Mullican *et al.* (1997), las tasas de recarga efectivas fueron de 6 a 9 mm/año. En el modelo de Dutton *et al.* (2000, 2001a, 2001b), las tasas de recarga fueron de 4 a 42 mm/año, variando con la precipitación en 3 grupos de tipos de suelo. Estas tasas de precipitación fueron de 0.7 a 6.2 % anual. La mayoría de los modelos incluyen el flujo de retorno de riego. En el modelo de Dutton *et al.* (2000, 2001b), la diferencia entre cero y el máximo flujo de retorno de riego resultó en una diferencia en los niveles de agua menor a 6 m entre 1950 y 1998, y no mayor a 6 m para 2050.

El bombeo y otros esfuerzos en el acuífero

Las estimaciones de la extracción de agua por bombeo han resultado ser datos muy importantes para el modelado, especialmente para las predicciones de la reducción de nivel (Konikow, 1986). Otros esfuerzos potenciales en el acuífero incluyen el flujo de retorno por irrigación, la recarga artificial y la descarga por manantiales. El bombeo afecta la calibración del modelo y las predicciones de los niveles de agua en el futuro. Como no existen mediciones directas del régimen histórico de extracciones para irrigación, éste debe estimarse indirectamente y pudiera ser una fuente importante de errores de calibración en los modelos numéricos.

Para los modelos del TWDB, la extracción con fines agrícolas se estimó con base en la cantidad de tierras irrigadas y la cantidad de agua necesaria para cultivar una cosecha determinada. El bombeo fue corregido cada año para incluir la precipitación anual. Las extracciones municipales e industriales fueron estimadas con base en los estimados de población y del consumo per cápita de agua. La extracción para cría de ganado se determinó con base en las estadísticas del ganado. El modelo corrige internamente la tasa de extracción en función del espesor saturado y la transmisividad, ya que a medida que los niveles de agua descienden y el espesor saturado disminuye, la producción típicamente disminuye.

Los modelos del USGS utilizaban estimaciones de

extracción tomadas de Heimes y Luckey (1982), que se basaron en la extensión de las superficies irrigadas, los rendimientos combinados de la demanda de cosechas y los factores de eficiencia de la irrigación para estimar el bombeo. Los modelos también tomaron en cuenta el flujo de retorno de riego así como los incrementos en la recarga causados por cultivos.

El modelo de Mullican *et al.* (1997) utilizó las estimaciones de descarga artificial de Knowles *et al.* (1984), así como también información local. Para los modelos del TWDB y del USGS, la extracción fue distribuida uniformemente sobre la superficie del condado para el que se estaba haciendo la estimación y fue inicialmente distribuida entre pozos de agua conocidos en la región. Sin embargo, después de observar que posiblemente solo 20% de los pozos de la región estaban registrados, se distribuyó la extracción entre un número de pozos "suplementarios" seleccionados aleatoriamente en el área modelada. Las tasas de extracción en los modelos del TWDB tuvieron que ser reducidas para calibrar el modelo. Dutton *et al.* (2000, 2001b) cartografiaron la disminución de irrigación basándose en las observaciones obtenidas en formato GIS del Sistema de Información de Recursos Naturales de Texas (Texas Natural Resources Information System [TNRIS]).

Stovall *et al.* (2001) de nuevo usó procedimientos de autocalibración para ajustar la extracción, la recarga y el flujo de retorno de riego. Ajustes secuenciales permitieron compensar entre valores simulados de extracción y recarga. Por ejemplo, áreas con excesiva recarga calibrada fueron inicialmente áreas con excesiva extracción para riego. Para mejorar la calibración, la extracción fue redistribuida entre las celdas del modelo y se permitió que la recarga excediera la estimación de máxima recarga generalmente aceptada (Stovall *et al.*, 2001, p. 87-88).

Arquitectura del modelo

La arquitectura del modelo incluye: el código, el tamaño de las celdas y el número de capas utilizadas en el modelo. La selección del código es importante para asegurar que todos los procesos importantes en el acuífero sean representados de manera adecuada. Una limitación de MODFLOW es que no permite que un límite de altura especificada, dependiente del tiempo e internamente ajustable, maneje de manera apropiada los límites artificiales del modelo TWDB (aunque el código pudiera ser modificado para considerar este tipo de límite). Sin embargo, esta limitación es superada mediante el uso de límites físicos e hidráulicos bien ubicados.

El tamaño de las celdas afecta el modelado debido a que es necesario suavizar o promediar los parámetros de entrada y, además, determina a qué nivel de detalle el modelo va a ser útil. El tamaño grande de las celdas en el modelo del USGS limita su uso a aspectos regionales de las aguas subterráneas (que había sido después de todo, el propósito del modelo). Este modelo no se podía utili-

zar para predecir de qué manera el bombeo en el campo de un pozo municipal iba a afectar los niveles de agua en los pozos vecinos. Los parámetros de entrada del acuífero son promediados en cada celda, de manera que las variaciones internas quedan ignoradas, lo que pudiera o no pudiera afectar los resultados del modelo. La extracción se promedia en la totalidad de la celda, de manera que los efectos de menor escala en los niveles de agua no son bien representados (aunque el impacto regional lo es). En general, los modelos a escala regional no se pueden utilizar para predecir las reducciones de nivel en pozos específicos o en áreas pequeñas, debido a la suavización y promediación de los datos. En el caso de los modelos más antiguos, se necesitaban celdas más grandes con el fin de minimizar el número de cómputos, para que las computadoras de la época pudieran producir soluciones en un tiempo razonable. Dutton *et al.* (2000, 2001b) y Stovall *et al.* (2001) utilizaron el ancho de celda de 1.6 km especificada por el TWDB en el año 2000 como un estándar de los modelos sobre recursos de agua.

Todos los modelos regionales del Ogallala tratan al acuífero como una sola capa. El hecho de tratarlo como una sola capa presupone que las propiedades hidráulicas son uniformes en todo el espesor del acuífero. Ashworth (1980, p. 20), no logró identificar ninguna relación entre la permeabilidad y la profundidad, ni entre el coeficiente de almacenamiento y la profundidad en el acuífero, justificando así el enfoque de una sola capa utilizado por todos los modelos regionales construidos. Sin embargo, existen variaciones verticales en las distribuciones de la arena y la grava, que pudieran afectar de manera localizada la producción de agua subterránea. Los modelos de una sola capa simplifican el proceso de modelado numérico porque tienen menos celdas, lo que permite que los modelos sean resueltos más rápido. A menos que existan variaciones sistemáticas que sean uniformes en todo el acuífero, probablemente no habrá suficiente información para justificar un enfoque de modelo multicapa.

CONCLUSIONES

Los modelos numéricos del flujo de agua subterránea son importantes para integrar los datos hidrológicos y predecir de qué manera los niveles de agua en un acuífero responderán a la extracción. Los modelos regionales del acuífero de Ogallala en Texas nos han permitido aumentar nuestros conocimientos del acuífero, predecir los cambios en el espesor saturado e identificar los datos de entrada cuya calidad debe ser mejorada. Las lecciones aprendidas de tres décadas de modelado del acuífero de Ogallala, pudieran tener aplicación en otras áreas que se encuentren en una etapa similar o anterior en el desarrollo del modelo del acuífero.

En décadas recientes, los modelos del Ogallala han seguido una secuencia típica desde su desarrollo y aplicación inicial hasta su modificación y refinamiento, algunas veces como resultado de una auditoría posterior.

Los primeros modelos fueron desechados y reemplazados por modelos nuevos que utilizaban un código de aceptación más universal y una discretización mucho más fina, gracias al abaratamiento del costo de la memoria de las computadoras. Estos modelos superiores han sido construidos con base en los mejores atributos de los modelos anteriores, pero reconociendo límites físicos e hidráulicos cuando ha sido posible; utilizando la mejor información disponible sobre la conductividad hidráulica, la recarga y la extracción; y empleando una discretización más fina para incluir datos de entrada más detallados y permitir predicciones más detalladas de la reducción en los niveles freáticos.

Una mejor descripción de los límites físicos significa que los límites del acuífero, así como sus ríos y arroyos, son tratados de manera más realista en el modelo. Los datos de entrada de mejor calidad, como por ejemplo la conductividad hidráulica, la recarga y la extracción, son importantes para mejorar el comportamiento del modelo, especialmente cuando se necesitan predicciones detalladas en pequeñas subregiones. Las estimaciones de la conductividad hidráulica a una escala más fina, pueden ser mejores si se relacionan las mediciones existentes con las variaciones geológicas dentro del acuífero. Los datos de mejor calidad se pueden obtener al implementar un programa regional de pruebas, aunque un esfuerzo de esa naturaleza es costoso. Se puede también mejorar significativamente la cantidad de datos, si en pozos nuevos se comienza a exigir pruebas de reducción de nivel contra tiempo o pruebas de capacidad específica. La administración de una base de datos grande o creciente, utilizando un sistema de información geográfica (GIS), puede ser importante para el control de calidad y el acceso eficiente a la información.

Existen aun aspectos hidrogeológicos conceptuales típicos que todavía quedan por resolver en el acuífero de Ogallala. La magnitud de la recarga es todavía objeto de debate. Los estudios de campo adicionales podrán ayudar a entender mejor los procesos físicos que controlan la recarga y el flujo de retorno por irrigación. Un mejor entendimiento de los otros aspectos hidrogeológicos conceptuales pudiera ser crucial para desarrollar modelos de calidad en otros sistemas de acuíferos.

Una de las mayores incógnitas es la magnitud y la localización de las extracciones. Este parámetro afecta al modelo calibrado y es muy importante para predecir los niveles de agua. Los programas de administración de acuíferos han identificado a la medición de la tasa de extracción como uno de los componentes críticos para la conservación del acuífero. El bombeo histórico está destinado a seguir siendo una estimación, aunque las técnicas existentes pueden ser perfeccionadas.

MODFLOW es la opción prevalente y lógica para la mayoría de las situaciones de modelado. Las ventajas de MODFLOW incluyen 1) sus antecedentes comprobados como código de modelado para la administración de aguas subterráneas, 2) su popularidad entre la mayoría de los profesionales en aguas subterráneas, 3) el perfec-

cionamiento continuo del código y sus capacidades, 4) el soporte técnico de parte de los proveedores externos de preprocesadores y postprocesadores, 5) su versatilidad y capacidad de expansión por el usuario; y 6) las oportunidades de capacitación. Las limitaciones de MODFLOW en cuanto al tratamiento de fronteras artificiales, son superadas mediante el uso de fronteras naturales o hidráulicas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue presentado originalmente en inglés en Castellanos, J.Z., Carrillo, J.J., y Yañez, C.H. (eds.), Memoria del Simposio Internacional de Aguas Subterráneas, León, Guanajuato, México, 7 al 9 de Dic. 1998: Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, p. 98–109. Traducido con ayuda de Mario Zielinski, Luis Sánchez-Barreda y Edgar Guevara. Agradecemos también al Dr. Marcos Adrián Ortega Guerrero y al Dr. Dirk Masuch Oesterreich, cuyas críticas mejoraron el contenido de este artículo. Las ilustraciones fueron preparadas por Jana Robinson, Patricia Alfano y John Ames bajo la supervisión de Joel Lardon.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrews, R., 1984, First status report of regional ground water modeling of the Palo Duro Basin: Houston, Texas, INTERA Environmental Consultants, 252 p.
- Ashworth, J.B., 1980, Evaluating the ground-water resources of the High Plains of Texas, results of test hole drilling: Texas Department of Water Resources, LP-129, 41 p.
- Bell, A.E., Morrison, S., 1979, Analytical study of the Ogallala aquifer in Carson County, Texas, projections of saturated thickness, volume of water in storage, pumpage rates, pumping lifts, and well yields: Texas Department of Water Resources Report, 242, 64 p.
- Cederstrand, J.R., Becker, M.F., 1999, Digital map of saturated thickness in 1980 for the High Plains aquifer in parts of Colorado, Kansas, Nebraska, New Mexico, Oklahoma, South Dakota, Texas, and Wyoming: U.S. Geological Survey, <http://water.usgs.gov/GIS/metadata/usgswrd/ofr99-262.htm>.
- Claborn, B.J., Austin, T.A., Wells, D.M., 1970, Numerical model of the Ogallala as a management tool, in Mattox, R.B., Miller, W.D. (eds.), Ogallala aquifer symposium: Texas Tech University, International Center for Arid and Semi-Arid Land Studies, Special Report, 39, 89-110.
- Charbeneau, R.J., Street, R.L., 1978, Finite element modeling of ground-water injection-abstraction systems: Stanford University, Department of Civil Engineering, Technical Report, 231, 118 p.
- Chiang, W.-H., Kinzelbach, W., 2001, 3D-Groundwater modeling with PMWIN—A simulation system for modeling groundwater flow and pollution: Berlin, Springer-Verlag, 346 p.
- Dorman, T.M., 1996, The Texas High Plains Aquifer System— modeling and projections for the southern region: Lubbock, Texas, Civil Engineering Department, Texas Tech University, Tesis de maestría, 354 p.
- Dutton, A.R., 1995, Groundwater isotopic evidence for paleorecharge in U.S. High Plains aquifers: Quaternary Research, 43, 221–231.
- Dutton, A.R., Reedy, R.C., Mace, R.E., 2000, Saturated thickness in the Ogallala aquifer in the Panhandle Water Planning Area— simulation of 2000 through 2050 withdrawal projections: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Topical Report prepared for the Region A Panhandle Water Planning Group, Panhandle Regional Planning Commission under Contract number UTA99-0230, 75 p.
- Dutton, A.R., Mace, R.E., Reedy, R.C., 2001a, Quantification of spatially varying hydrogeologic properties for a predictive model of groundwater flow in the Ogallala aquifer, northern Texas Panhandle, in Lucas, S.G., Ulmer-Scholle, D.S. (eds.), Geology of the Llano Estacado: New Mexico Geological Society Guidebook, 52nd Field Conference, 297–307.
- Dutton, A.R., Reedy, R.C., Mace, R.E., 2001b, Saturated thickness in the Ogallala aquifer in the Panhandle Water Planning Area— Simulation of 2000 through 2050 withdrawal projections: Austin, Texas, The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Final Contract Report prepared for Panhandle Water Planning Group, Panhandle Regional Planning Commission under Contract number UTA01-462, 62 p.
- Environmental Solutions, Inc., 1998, Groundwater Vistas: Herndon, Virginia, Version 2.30.
- Fogg, G.E., Noyes, C.D., Carle, S.F., 1998, Geologically based model of heterogeneous hydraulic conductivity in an alluvial setting: Hydrogeology Journal, 6 (1), 131-143.
- Gustavson, T.C., Finley, R.J., 1985, Late Cenozoic geomorphic evolution of the Texas Panhandle and Northeastern New Mexico— case studies of structural controls on regional drainage development: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology Report of Investigations, 148, 42 p.
- Gustavson, T.C., Holliday, V.T., Hovorka, S.D., 1995, Origin and development of playa basins, sources of recharge to the Ogallala aquifer, Southern High Plains, Texas and New Mexico: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology Report of Investigations, 242, 72 p.
- Gutentag, E.D., Heimes, F.J., Krothe, N.C., Luckey, R.R., Weeks, J.B., 1984, Geohydrology of the High Plains aquifer in parts of Colorado, Kansas, Nebraska, New Mexico, Oklahoma, South Dakota, Texas, and Wyoming: U.S. Geological Survey, Professional Paper, 1400-B, 63 p.
- Harbaugh, A.W., McDonald, M.G., 1996, User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference groundwater flow model: U.S. Geological Survey, Open-File Report, 96-485, 220 p.
- Harkins, D., 1998, The future of the Texas High Plains aquifer system— modeling and projections: Lubbock, Texas, Texas Tech University, Tesis de doctorado, 278 p.
- Heimes, F.J., Luckey, R.R., 1982, Method for estimating historical irrigation requirements from ground water in the High Plains in parts of Colorado, Kansas, Nebraska, New Mexico, Oklahoma, South Dakota, Texas, and Wyoming: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations, 82-40, 64 p.
- INTERA, 1983, SWENT: A three-dimensional finite difference code for the simulation of waste, energy, and nuclide transport: prepared for Office of Nuclear Waste Isolation, Batelle Memorial Institute, Columbus, Ohio, Report ONWI-457.
- Knowles, T.R., 1981, Evaluating the ground-water resources of the High Plains of Texas, ground-water simulation program GWSIM-III: Dallas, Texas, Texas Department of Water Resources, UM-36, 84 p.
- Knowles, T.R., 1984, Assessment of the ground-water resources of the Texas High Plains, in Whetstone, G.A. (ed.), Proceedings, Ogallala Aquifer Symposium II: Lubbock, Texas, Texas Tech University Water Resources Center, 217-237
- Knowles, T.R., Nordstrom, P., Klemm, W.B., 1982, Evaluating the ground-water resources of the High Plains of Texas: Texas Department of Water Resources, Final Report, LP-173(1), 174 p.
- Knowles, T.R., Nordstrom, P., Klemm, W.B., 1984, Evaluating the ground-water resources of the High Plains of Texas: Texas Department of Water Resources, Report 288, 1, 119 p.
- Konikow, L.F., 1986, Predictive accuracy of a ground-water model - lessons from a postaudit: Ground Water, 24(2), 173-184.
- Larson, S.P., 1978, Direct solution algorithm for the two-dimensional

- ground-water flow model: U.S. Geological Survey, Open-File Report 79-202, 25 p.
- Luckey, R.R., 1984, The High Plains regional aquifer- flow system simulation of the Central and Northern High Plains, *in* Whetsstone, G.A. (ed.), Proceedings, Ogallala Aquifer Symposium II: Lubbock, Texas, Texas Tech University Water Resources Center, 48-66.
- Luckey, R.R., Becker, M.F., 1999, Hydrogeology, water use, and simulation of flow in the High Plains aquifer in northwestern Oklahoma, southeastern Colorado, southwestern Kansas, northeastern New Mexico, and northwestern Texas: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4104, 68 p.
- Luckey, R.R., Stephens, D.M., 1987, Effect of grid size on digital simulation of ground-water flow in the southern High Plains of Texas and New Mexico: U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 87-4085, 32 p.
- Luckey, R.R., Gutentag, E.D., Heimes, F.J., Weeks, J.B., 1986, Digital simulation of ground-water flow in the High Plains aquifer in parts of Colorado, Kansas, Nebraska, New Mexico, Oklahoma, South Dakota, Texas, and Wyoming: U.S. Geological Survey, Professional Paper, 1400-D, 57 p.
- Mace, R.E., 2001, Estimating transmissivity using specific-capacity data: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Geological Circular 01-2, 44 p.
- McAda, D.P., 1984, Projected water-level declines in the Ogallala aquifer in Lea County, New Mexico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 84-4062, 84 p.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, 6, variously paginated.
- Mullican, W.F., 1995, A technical review of the Canadian River Municipal Water Authority application for permit to transport water from Roberts and Hutchinson Counties: Panhandle Ground Water Conservation District, variously paginated.
- Mullican, W.F., Johns, N.D., Fryar, A.E., 1997, Playas and recharge of the Ogallala aquifer on the Southern High Plains of Texas—an examination using numerical techniques: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Report of Investigations, 242, 72 p.
- Nativ, R., Riggio, R., 1989, Meteorologic and isotopic characteristics of precipitation events with implications for ground-water recharge, southern High Plains: Atmospheric Research, 23, 51-82.
- Nativ, R., Smith, D.A., 1987, Hydrogeology and geochemistry of the Ogallala aquifer, southern High Plains: Journal of Hydrology, 91, 217-253.
- Neuman, S.P., Narasimhan, T.N., 1977, Mixed explicit-implicit iterative finite element scheme for diffusion-type problems, I, theory: International Journal of Numerical Methods Engineering, 11, 309-323.
- Osterkamp, W.R., Wood, W.W., 1987, Playa-lake basins on the southern High Plains of Texas and New Mexico: part I. Hydrologic, geomorphic, and geologic evidence for their development: Geological Society of America Bulletin, 99, 215-223.
- Peckham, D.S., Ashworth, J.B., 1993, The High Plains aquifer system of Texas; 1980 to 1990 overview and projections: Lubbock, Texas, Texas Water Development Board, 341, 1-13.
- Prickett, T.A., Lonquist, C.G., 1971, Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation: Illinois State Water Survey, Report of Investigation, 55, 62 p.
- Seni, S.J., 1980, Sand-body geometry and depositional systems, Ogallala Formation, Texas: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Report of Investigations, 105, 36 p.
- Simpkins, W.W., Fogg, G.E., 1982, Preliminary modeling of ground-water flow near salt-dissolution zones, Texas Panhandle, *in* Geology and geohydrology of the Palo Duro Basin, Texas: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Geological Circular 82-7, 130-137.
- Stovall, J., Rainwater, K., Frailey, S., 2001, Groundwater modeling for the Southern High Plains: Lubbock, Texas, Water Resources Center, Texas Tech University, Topical Report prepared for the Llano Estacado Regional Water Planning Group, 298 p.
- Theis, C. V., 1963, Estimating the transmissivity of a water-table aquifer from the specific capacity of a well: U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper, 1536-I, 332-336.
- Trescott, P.C., Pinder, G.F., Larson, S.P., 1976, Finite-difference model for aquifer simulation in two dimensions with results of numerical experiments: U.S. Geological Survey, Techniques of Water Resources Investigations, 7, C1, 115 p.
- Texas Water Development Board (TWDB), 1997, Water for Texas- A consensus-based update to the State water plan- Volume II, technical planning appendix: Austin, Texas Water Development Board, variously paginated.
- Urban, L., 1992, Texas High Plains, *in* Knommm, D.E., White, S.E. (eds.), Groundwater exploitation in the High Plains: Lawrence, Kansas, University Press of Kansas, 205-223.
- Weeks, J.B., Gutentag, E.D., 1988, High Plains, Region 17, *in* Back, W., Rosenshein, J.S., Seaber, P.R. (eds.), Hydrogeology: Boulder, Co., Geological Society of America, The Geology of North America, O-2, 157-164.
- Wirojanagud, P., Kreitler, C.W., Smith, D.A., 1986, Numerical modeling of regional ground-water flow in the Deep-Basin Brine aquifer of the Palo Duro Basin, Texas Panhandle: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Report of Investigations, 159, 68 p.

Manuscrito recibido: Marzo 15, 2001

Manuscrito corregido recibido: Enero 23, 2002

Manuscrito aceptado: Febrero 1, 2002