

CONSTRUCCION DE LAGOS POR BOMBEO

Ismael Herrera, IIMAS¹ e Instituto de Ingeniería,
Jesús Alberro, Instituto de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México

En el Plan Lago de Texcoco se ha previsto la construcción de cuatro lagos por medio del bombeo de aguas subterráneas. Por otra parte, el subsuelo del Lago de Texcoco al igual que el de la Ciudad de México constituyen desde el punto de vista de la hidrología subterránea, un sistema de acuíferos semiconfinados, por lo que utilizando resultados de la hidráulica de pozos, es posible predecir la evolución de la distribución de los volúmenes de agua extraídos. Es fácil deducir de estas predicciones las correspondientes a los asentamientos de la superficie del terreno, las cuales son básicas para la planeación y control del desarrollo de las obras correspondientes. En este trabajo se describen sucintamente los estudios que utilizando estos procedimientos se han llevado a cabo en Texcoco.

INTRODUCCION

En el Plan Lago de Texcoco, se ha previsto la construcción de los lagos Churubusco y Texcoco Sur en la primera etapa de su ejecución, y Texcoco Norte y Desviación Combinada en la segunda etapa. El método que se utiliza para crearlos, consiste en provocar asentamientos por medio del bombeo de aguas subterráneas de la zona, a fin de producir hundimientos hasta de 8 m, por lo que ha sido necesario realizar estudios que permitieran diseñar dicho sistema en condiciones favorables, así como prever la evolución que en el período de los trabajos tendrán los hundimientos.

Tanto el subsuelo de la Ciudad de México, como el del Lago de Texcoco constituyen desde el punto de vista de la hidrología subterránea, sistemas de acuíferos semiconfinados y los hundimientos en la superficie del terreno son sensiblemente iguales al agua extraída, ya que el material sólido que la forma es prácticamente incompresible. Es por lo mismo posible predecir los asentamientos producidos por bombeo en esta clase de sistemas utilizando resultados de la hidráulica de pozos (ref 1).

1 Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas.

Los estudios realizados en el período 1973-1975 a que se refiere este artículo, abarcaron dos aspectos:

- i Determinación de la aplicabilidad de las teorías de acuíferos; y
- ii Desarrollo de un modelo para la predicción de los asentamientos en los lagos objeto del proyecto y su aplicación.

Como resultado de la primera parte del estudio se ha descrito el estado actual del conocimiento sobre la aplicabilidad de las diversas teorías de la hidráulica de pozos (ref 2). Para desarrollar la segunda parte se contó con un número considerable de datos y observaciones que se recogieron al realizar los trabajos preliminares del Plan Lago de Texcoco (ref 3). Entre ellos, especialmente útiles han sido las mediciones de la evolución piezométrica y de los asentamientos del terreno, en el campo piloto (de 9 Ha), que se bombeó de octubre de 1967 a julio de 1968.

Existen estrechas relaciones entre el fenómeno de consolidación de los suelos y la hidráulica de pozos, las cuales se discuten en el capítulo 2. Ya que uno de los objetivos de las investigaciones era determinar la factibilidad del proyecto y detectar factores imprevistos que pudieran poner en peligro su éxito, fue necesario establecer con certidumbre la adecuación del modelo hidráulico que se proponía, aun antes de que se iniciara el bombeo en el lago de Texcoco Sur, por lo que se probó el modelo con los resultados observados en el campo piloto y luego se le modificó con base en los datos disponibles, adecuándolo a Texcoco Sur.

Se describen primero la estratigrafía y los datos geohidrológicos del subsuelo en el campo piloto; y posteriormente, el modelo hidráulico propuesto, cuya selección es resultado de tomar en cuenta la aplicabilidad de las diversas teorías de la hidráulica de pozos, que se estudió simultáneamente (refs 2 y 4). La adecuación del modelo queda demostrada fuera de toda duda razonable, por los rangos de la aplicabilidad de las teorías, las cuales se establecieron con precisión y por los resultados de la calibración del modelo, la cual se basó principalmente en la evolución piezométrica y en los asentamientos observados durante el bombeo (octubre de 1967 a julio de 1968) del campo piloto.

Algunas predicciones para Texcoco Sur se efectuaron en las condiciones de diseño antes de iniciarse el bombeo y otras se hicieron durante este en las condiciones reales de operación. Las primeras tuvieron por objeto como se mencionó anteriormente, determinar la factibilidad del proyecto y detectar factores cuyo control ameritara una atención especial durante su realización. Las segundas estuvieron orientadas a determinar oportunamente

anomalías y desviaciones al comportamiento previsto que pudieran afectar en forma importante los resultados del proyecto. Las conclusiones que se derivaron de estos estudios se presentan al final de este trabajo.

2. Relaciones entre la hidráulica de pozos y la mecánica de suelos

El problema hidrológico de la dinámica de acuíferos, es desde el punto de vista de la mecánica de suelos, un problema de consolidación y las teorías utilizadas por los hidrólogos tienen relaciones estrechas con las de Terzaghi (ref 5) y Biot (refs 6 y 7). Por lo tanto, es natural que muchas de las propiedades de interés en mecánica de suelos sean al mismo tiempo propiedades geohidrológicas importantes y que los especialistas de uno y otro campo las hayan estudiado ampliamente. Sin embargo, la nomenclatura utilizada frecuentemente no coincide y es conveniente establecer algunas equivalencias.

La relación entre el coeficiente de consolidación C_v y el de permeabilidad K , es

$$C_v = \frac{K}{M_v \gamma_w}$$

donde γ_w es el peso específico del agua y M_v el índice de compresibilidad. Resulta de aquí que

$$K = C_v M_v \gamma_w \quad (2)$$

Por otra parte

$$C_v = \alpha = \frac{K}{S_c} = \frac{T}{S}$$

o alternativamente

$$S_s = \frac{K}{C_v}$$

Aquí, S_s y S son los coeficientes de almacenamiento específico y total respectivamente, mientras que T es la transmisividad. Una estimación del tiempo de bombeo requerido para que la interacción entre dos acuíferos (tales como capas de arena) separados por un acuitardo* (posiblemente de arcilla) de espesor b' (en lo que sigue las primas se refieren a propiedades del acuitardo), empiece a ser significativa, es (ref 2)

$$t = \frac{b'^2}{6\alpha'} = \frac{b'^2 S_s'}{6K'} \quad (5)$$

Si se compara esta ecuación con la utilizada clásicamente en mecánica de suelos para determinar el tiempo t_u necesario para alcanzar un grado de consolidación ($u\%$) para un flujo unidimensional (ref 8).

*Se acostumbra llamar acuitardo a una capa poco permeable limita otras de mayor permeabilidad.

$$t_u = T_u \frac{H^2}{C_v} \quad (6)$$

resulta que $t = t_{85\%}$. En la ecuación (6), $2H = b'$ y T_u es el llamado factor tiempo de Terzaghi. Esto implica que el tiempo t que debe transcurrir para que la interacción entre dos acuíferos sea perceptible corresponde a un grado de consolidación de 85 por ciento, del estrato que los separa.

A primera vista, un grado de consolidación de 85 por ciento puede parecer muy elevado. Sin embargo, debe observarse que la presencia de los dos mantos permeables, es decir, el drenaje de la arcilla por sus extremos superior e inferior se toma en cuenta en todo momento. Lo que se desprecia es el efecto de la presencia de cualquiera de los mantos en el drenaje efectuado por el otro. El resultado anterior debe interpretarse en el sentido de que para que esta influencia sea importante, el grado de consolidación debe ser superior a 85 por ciento.

Esta equivalencia, es un caso particular de una relación de carácter mas general. La definición de tiempo adimensional dada en la primera parte es

$$t' = \alpha' t/b'^2$$

que en vista de las ecs (3) y (6) da

$$t' = C_v t/4H^2 = \frac{t_u}{4}$$

Los resultados sobre la aplicabilidad de las diversas teorías de la hidráulica de pozos, se ha dado en términos del tiempo adimensional t' ; la ecuación (8) permite ahora incorporar el factor tiempo de Terzaghi, y a través de él expresar dichas condiciones de aplicabilidad como grado de consolidación requerida.

3. Estratigrafía y propiedades geohidrológicas del subsuelo.

Para formular los modelos hidrológicos de las zonas de bombeo fue necesario estudiar la estratigrafía y las características hidrológicas del subsuelo. Se describen aquí en forma muy sucinta los resultados correspondientes al lago de prueba del Plan Texcoco y posteriormente se explican los ajustes que fue necesario efectuar al aplicar el modelo al lago Texcoco Sur.

3.1 Estratigrafía.

Durante las investigaciones efectuadas para el Plan Texcoco

se realizaron numerosos sondeos en la zona del lago, particularmente tres profundos, denominados BNP1, BNP2 y BNP3. En la ref 3, fig. 20, se presentan los cortes estratigráficos, la variación con la profundidad del contenido de agua natural y de la relación de vacíos de los suelos muestreados. Con objeto de verificar la estratigrafía en el área de bombeo se efectuó una exploración de penetración estándar hasta una profundidad de 60 m

A fin de calibrar el modelo mediante la comparación de los abatimientos y rendimientos, calculados y observados en el lago de prueba del Plan Texcoco, se idealizó la estratigrafía del subsuelo en esta zona en la siguiente forma (fig. 1):

- a) Formación arcillosa superior, de 35 m de espesor
- b) Capa dura, de 3 m de espesor
- c) Formación arcillosa inferior, de 15 m de espesor
- d) Depósitos profundos permeables, de 14 m de espesor

Los pozos de bombeo de 60 m de longitud atraviesan las tres primeras formaciones y penetran parcialmente en los depósitos profundos permeables.

3.2 Características geohidrológicas.

Además de la estratigrafía fue necesario determinar la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento de los diversos estratos del subsuelo, para lo cual se utilizaron los criterios que se exponen a continuación.

Las pruebas de consolidación estándar efectuadas con los materiales de ambas formaciones arcillosas proporcionaron los valores de los coeficientes de consolidación C_v y de los índices de compresibilidad m_v respectivos. A partir de ellos con la ayuda de las fórmulas del capítulo 2, es fácil obtener los demás.

Para determinar los coeficientes de permeabilidad de la capa dura y de los depósitos profundos, se tuvieron en cuenta los datos en la ref. 9. Se contó además con los resultados de las pruebas de bombeo efectuados en el campo de pozos del Plan Texcoco (ref. 3) y en el Lago de Texcoco Sur (ref. 10) las cuales asignan valores tanto a la permeabilidad como al almacenamiento específico de estos estratos.

En la tabla 1 se presentan los valores asignados en el modelo inicial a las diversas características y las modificaciones que se derivaron de su calibración.

TABLA 1 CARACTERISTICAS GEOHIDROLOGICAS DE LAS FORMACIONES DEL SUBSUELO

| Formación | Espesor, b, en m | Coef. de permeabilidad, K, en m/día | Coef. de trasmisibilidad, T, en m ² /día | Coef. de almacenamiento, S | Coeficiente $C_V = v = T/S$, en m ² /día | Coef. de almacenamiento específico, S_S , en m ⁻¹ |
|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|---|---|--|--|
| Arcillosa superior | b' = 35 | K' = 0.47 x 10 ⁻³ (1) | T' = 1.64 x 10 ⁻² | S' = 1.82 | C' _V = 9 x 10 ⁻³ (1) | S' _S = 5.2 x 10 ⁻² |
| Permeable superior (capa dura) | b ₁ = 3 | K ₁ = 6 (1) | T ₁ = 18 | S ₁ = 1.65 x 10 ⁻⁴ | C _{V1} = 1.08 x 10 ⁺⁵ | S _{S1} = 5.5 x 10 ⁻⁵ (2) |
| | | K ₁ = 8 (3) | T ₁ = 24 (3) | S ₁ = 2.65 x 10 ⁻⁴ (3) | C _{V1} = 9.05 x 10 ⁺⁴ (3) | S _{S1} = 8.83 x 10 ⁻⁵ (3) |
| Arcillosa inferior | b'' = 15 | K'' = 1.44 x 10 ⁻⁵ (1) | T'' = 2.16 x 10 ⁻⁴ | S'' = 0.24 | C'' _V = 9 x 10 ⁻⁴ (1) | S'' _S = 1.6 x 10 ⁻² |
| Permeable superior | b ₂ = 7 (2) | K ₂ = 7.8 (1) | T ₂ = 42 | S ₂ = 3.85 x 10 ⁻⁴ | C _{V2} = 1.08 x 10 ⁺⁵ | S _{S2} = 5.5 x 10 ⁻⁵ (2) |
| | b ₂ = 14 (3) | K ₂ = 7.5 (3) | T ₂ = 105 (3) | S ₂ = 1.24 x 10 ⁻³ (3) | C _{V2} = 8.47 x 10 ⁺⁴ (3) | S _{S2} = 8.83 x 10 ⁻⁵ (3) |

(1) Ref 14

(2) Ref 15

(3) Valores obtenidos en la calibración del modelo actual

4. El modelo hidráulico

Con base en la estratigrafía y propiedades del subsuelo descritas antes, se definió el modelo geohidrológico que se utilizó en el campo de pruebas del Plan Texcoco. El ajuste de los valores numéricos fue el resultado de su calibración, que se basó principalmente en la evolución piezométrica y en los asentamientos observados durante el período que se bombeó de octubre de 1967 a julio de 1968.

La definición geohidrológica del sistema es la siguiente:

a) Durante el bombeo para inducir asentamientos de la superficie, el subsuelo del campo de pruebas se comporta como un sistema de acuíferos semiconfinados. Es decir, se concibe al subsuelo como formado por acuíferos separados entre sí por estratos de permeabilidad mucho menor (acuitardos).

b) El sistema de acuíferos (fig. 1) está formado por dos acuíferos principales: el superior denominado capa dura y el inferior comunmente llamado depósitos profundos. La capa dura está limitada superiormente por un acuitardo denominado formación arcillosa superior, los acuíferos principales están separados entre sí por un acuitardo denominado formación arcillosa inferior y los depósitos profundos están limitados inferiormente por un estrato impermeable. Todos ellos se consideran homogéneos.

c) En los acuíferos principales el abatimiento es sensiblemente igual a su promedio a través del espesor.

d) En los acuitardos el flujo es esencialmente vertical.

e) La interacción entre los acuíferos es imperceptible; es decir, trabajan en forma independiente.

f) El nivel piezométrico en el límite superior de la formación arcillosa superior permanece sensiblemente constante.

g) El comportamiento de cada uno de los acuíferos está gobernado por la teoría de tiempos pequeños.

h) Los diversos estratos son de extensión ilimitada en todas las direcciones horizontales.

i) El asentamiento de la superficie del terreno por consolidación de los estratos semi-permeables, crea un lago cuyo volumen es igual al agua extraída de las arcillas.

Como se ha observado en la introducción, el hecho de disponer del estudio sobre la aplicabilidad de las diversas teorías utilizadas en hidráulica de pozos que se hizo en la primera parte, además de facilitar la justificación del modelo adoptado, permitió mantener un control muy efectivo de las posibles fuentes de error, lo que le dió confiabilidad a los resultados.

En relación con la hipótesis i), es pertinente hacer una aclaración que se puso en evidencia como resultado de la cali-

bración del modelo. En el campo experimental, se encontró que una parte considerable del gasto proviene del exterior de la zona de interés donde se intentaban generar los asentamientos para construir el lago. Consecuentemente, el volumen de agua extraído de las arcillas no coincidió con el volumen asentado en la zona de interés a pesar de cumplirse la hipótesis i) y fue necesario multiplicarlo por un factor de eficiencia (que se llamó factor geométrico), que fue también posible deducir de la teoría. En el caso del Lago de Texcoco Sur, debido a sus dimensiones mucho mayores, se encontró que este efecto no tiene importancia, a pesar de que el período de bombeo es mucho más prolongado.

5. Calibración del modelo

Los resultados del estudio sobre la aplicabilidad de las diversas teorías, fueron sumamente útiles al efectuar la calibración (ref 11), ya que permitieron mantener un control efectivo de las diversas fuentes de error, lo que a su vez hizo posible localizarlas cuando surgieron discrepancias y efectuar ajustes del modelo para corregirlas.

La calibración se basó en la comparación de los abatimientos y asentamientos calculados, con los observados.

5.1 Abatimientos piezométricos

La comparación de los abatimientos piezométricos calculados, se hizo con los observados en la estación EP1 que fue la que trabajó en condiciones normales durante todo el período de bombeo. El abatimiento total es la suma de los debidos a cada uno de los 16 pozos que trabajaron durante el período de bombeo y los detalles de los cálculos se dan en las refs. 11 y 12. Las etapas de bombeo consideradas se muestran en la tabla 2.

Para ajustar los valores de los coeficientes de permeabilidad K_1 y K_2 de la capa dura y los depósitos profundos, se calcularon los abatimientos inducidos en los acuíferos correspondientes a la estación piezométrica EP1 para el 31 de octubre, 30 de noviembre y 28 de diciembre de 1967. Se encontró una concordancia satisfactoria entre los abatimientos calculados y observados con los valores indicados en la tabla 1 y una distribución del gasto de 18% en la capa dura y 82% en los depósitos profundos. Posteriormente se procedió en la misma forma para las fechas 31 de enero, 29 de febrero, 31 de marzo, 30 de abril, 31 de mayo y 4 de julio de 1968. Para esas fechas la distribución de gastos obtenida fue del 20 por ciento en la capa dura y 80 por ciento en los depósitos profundos. El cambio en la distribución de gastos aparentemente se debió a que en diciembre se cerraron muchos pozos (ref. 12). Los valores calculados de los

TABLA 2. ETAPAS DE BOMBEO CONSIDERADAS

| Etapa | Fecha inicial | | | Fecha final | | | Duración, en días | Días ac <u>u</u> mulados |
|-------|---------------|-----------|------|-------------|-----------|------|----------------------|-----------------------------|
| | Día | Mes | Año | Día | Mes | Año | | |
| 1 | 21 | Octubre | 1967 | 30 | Noviembre | 1967 | 41 | 41 |
| 2 | 1 | Diciembre | 1967 | 28 | Diciembre | 1967 | 28 | 69 |
| 3 | 29 | Diciembre | 1967 | 31 | Enero | 1968 | 34 | 103 |
| 4 | 1 | Febrero | 1968 | 29 | Febrero | 1968 | 29 | 132 |
| 5 | 1 | Marzo | 1968 | 31 | Marzo | 1968 | 31 | 163 |
| 6 | 1 | Abril | 1968 | 30 | Abril | 1968 | 30 | 193 |
| 7 | 1 | Mayo | 1968 | 31 | Mayo | 1968 | 31 | 224 |
| 8 | 1 | Junio | 1968 | 4 | Julio | 1968 | 34 | 258 |

abatimientos piezométricos s'_C y s'_D , concuerdan satisfactoriamente con los observados (fig. 2).

5.2 Asentamientos

Para verificar si el modelo con los ajustes hechos en la calibración basada en los abatimientos piezométricos, predecía satisfactoriamente los asentamientos del terreno se llevaron a cabo comparaciones globales entre los que se calcularon y los que se midieron mediante nivelaciones que se efectuaron en diversas fechas (ref. 3). Para el período de bombeo tan prolongado que se llevó a cabo en el campo experimental, se demostró (refs. 11 y 12) que el agua bombeada la proporciona casi en su totalidad la arcilla, por lo que el rendimiento sería sensiblemente igual al ciento por ciento y consecuentemente, los volúmenes de agua extraída iguales a los volúmenes asentados. Sin embargo, al efectuar la comparación se observó una diferencia grande entre estos volúmenes. Posteriormente, se encontró que estas diferencias son debidas a que una parte considerable del gasto proviene del exterior de la zona de interés y donde no se efectuó nivelación. Limitando la predicción de los asentamientos a la zona de interés, se obtuvo la tabla 3.

TABLA 3. COMPARACION DEL RENDIMIENTO TEORICO
CON EL OBSERVADO

| Días | Rendimiento, en porcentaje | |
|-------|----------------------------|-----------|
| | Calculado | Observado |
| 69 | 24.8 | 28.0 |
| 150 | 21.1 | 26.5 |
| 224 | 20.5 | 14.0 |
| 270 | 19.4 | -- |
| 1 800 | 13.0 | -- |

La concordancia entre los rendimientos calculados y los observados resultó satisfactoria, porque las discrepancias que se muestran en la tabla 3 eran previsibles, debido a que para el cálculo de los rendimientos la extracción total se supuso con-

centrada en el centro geométrico del campo experimental. Ya que muchos de los pozos se encuentran mas cercanos de los límites del campo que su centro geométrico es natural que el rendimiento observado sea menor que el calculado.

Al concluir esta fase del estudio las limitaciones más importantes que se preveían para el éxito del proyecto estribaban en una posible reducción del rendimiento más allá de lo permisible y también la producción de abatimientos excesivos, que pudieran impedir la obtención de los gastos previstos. Para un período de bombeo tan prolongado como el que se contempla en el proyecto, los abatimientos máximos permisibles (35 m para la capa permeable superior y 53 m para la capa permeable inferior) pueden ser insuficientes para producir los gastos requeridos, por lo que se puso especial atención a estos aspectos en las fases ulteriores del estudio. Debe añadirse que inicialmente se pensó que debido a que los períodos previstos de bombeo en la construcción de los lagos, son mucho mayores que los que tuvieron lugar en el campo de prueba, una proporción mayor de los asentamientos del terreno podrían producirse fuera de la zona de interés. De ser correcta esta conjetura, se tendría un obstáculo adicional para el éxito del proyecto. Afortunadamente, como consecuencia de las grandes dimensiones del lago Texcoco Sur, el efecto correspondiente resultó ser de mucho menor importancia.

6. Aplicación a Texcoco Sur

La aplicación del modelo hidrológico anterior, en la construcción del lago de Texcoco Sur, se efectuó en dos etapas sucesivas. En la primera se realizaron predicciones de los asentamientos con base en los gastos y otras condiciones de diseño. La segunda se llevó a cabo después de iniciado el bombeo en dicho lago e incluyó la predicción de abatimientos piezométricos y de asentamientos del terreno, en las condiciones reales de bombeo.

A la estratigrafía se le hicieron los ajustes implicados por la fig. 3. Dichas modificaciones implicaron una complicación considerable en el manejo numérico del problema. Otro hecho que también complicó los cálculos fué que se alcanzaron los abatimientos máximos permisibles, lo que requirió calcular los abatimientos a nivel piezométrico constante en lugar de a gasto constante como se había hecho con anterioridad. Cierta incertidumbre en el conocimiento estratigráfico de la zona (ref. 12), hizo temer que hubiera una zona de espesor estratigráfico ilimitado en el área de pozos, como se indica en la fig. 4; sin embargo, los resultados del bombeo una vez que se inició, hicieron ver que esta sospecha era infundada. Los cálculos realizados se describen con detalle en la ref 13.

Con el modelo hidráulico adoptado, las velocidades de asentamiento para las secciones 1, 2 y 3 (fig. 4) del campo de Texcoco Sur coinciden satisfactoriamente con las observadas durante el bombeo que actualmente se lleva a cabo. Resulta por tanto que las características estratigráficas y geohidrológicas elegidas permiten explicar satisfactoriamente el comportamiento de los asentamientos en este campo, en sus secciones 1, 2 y 3. Sin embargo, en las secciones 4 y 5 la influencia de las intercalaciones permeables en la formación arcillosa inferior da lugar a discrepancias entre cálculos y observaciones.

Se llegó a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1) El modelo hidráulico adoptado es satisfactorio para describir el comportamiento de los asentamientos en las secciones 1, 2 y 3.

2) En las secciones 4 y 5 se detectó la presencia de formaciones no previstas, las cuales consisten probablemente, de estratos permeables delgados intercalados en la formación arcillosa inferior. Sin embargo, estas formaciones no ponen en peligro el éxito del proyecto ya que contribuyen a aumentar notablemente la velocidad de los asentamientos y el rendimiento del bombeo.

3) Para evitar hundimientos diferenciales de gran magnitud, se recomendó extraer tres veces más agua de la sección 2 que de la 4.

REFERENCIAS

- 1 Walton, C.W., Groundwater Resources Evaluation, McGraw-Hill, 1970.
- 2 Herrera, I., Aplicabilidad de teorías de acuíferos semiconfinados, Instituto de Ingeniería, UNAM, 318, 1973.
- 3 Proyecto Texcoco, Memoria de los trabajos realizados y conclusiones, Secretaría de Hacienda y Crédito Público, México, D.F. (1969).
- 4 Herrera, I., Integro-differential equations for systems of leaky aquifers and applications. Part 2. Error analysis of approximate theories, Water Resources Research. 10 (4), 1974.
- 5 Terzaghi, K., Theoretical Soil Mechanics, John Wiley, 1956.
- 6 Biot, M.A., General theory of three-dimensional consolidation, Jour. of Applied Physics, 12, Feb. 1941.

- 7 Biot, M.A., Theory of elasticity and consolidation of a porous anisotropic solid, Jour. of Applied Physics. 26, 1955.
- 8 Juárez B. E, y A. Rico R., Mecánica de Suelos. Tomo I, Editorial Limusa, 1975.
- 9 Marsal, R.J., Desarrollo de un lago por la consolidación de arcillas blandas, inducida con bombeo, Volumen Nabor Carrillo, Secretaría de Hacienda y Crédito Público, México, D.F., (1969), pp. 229-266.
- 10 Sainz Ortiz, I., Análisis de interferencia entre los pozos construidos en el denominado Lago de Texcoco Sur, Secretaría de Recursos Hidráulicos, México, D. F.
- 11 Herrera, I., J. Alberro y J.L. León, Análisis de asentamientos y optimización del sistema de bombeo para la construcción de los Lagos del Proyecto Texcoco México, Informe del Instituto de Ingeniería, Noviembre 1972.
- 12 Herrera, I., J. Alberro, J.L. León y B. Chen, Análisis de asentamientos para la construcción de los Lagos del Plan Texcoco, Instituto de Ingeniería, 340, Junio 1974.
- 13 Alberro, J., y B. Chen, Análisis de los asentamientos y abatimientos generados en Texcoco Sur por bombeo, Informe Instituto de Ingeniería, 1975.