

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	¿Por qué ocurren variaciones de nivel en el lago de Tequesquitengo? 2. Simulación de eventos en el siglo XIX.
<i>Autor / Adscripción</i>	José Bienvenido Martínez Rodríguez Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba Carlos Gutiérrez Ojeda Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 19(4): 47-56
<i>Fecha de publicación</i>	2004
<i>Resumen</i>	El lago de Tequesquitengo (estado de Morelos, México) en el siglo XIX tenía un nivel de agua de unos veinte metros por debajo del actual; entre 1820 y 1865, el nivel subió y dejó bajo el agua al pueblo que había en sus orillas. En la primera parte de este trabajo se aborda, mediante la modelación matemática, el estudio de la interacción existente entre el lago y el acuífero subyacente. En esta segunda parte se aborda lo relacionado con los eventos del siglo XIX. Luego de construir un escenario que pudiera semejarse a las condiciones naturales de esa época, se prueban dos variantes que reflejan la acción del trasvase y el sistema de riego sobre el acuífero y el lago, obteniéndose las conclusiones pertinentes. Posteriormente se analiza la variante que se relaciona con una posible recarga natural accidental desde el acuífero profundo.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/746

¿Por qué ocurren variaciones de nivel en el lago de Tequesquitengo?

2. Simulación de eventos en el siglo XIX

José Bienvenido Martínez-Rodríguez

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba

Carlos Gutiérrez-Ojeda

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

El lago de Tequesquitengo (estado de Morelos, México) en el siglo XIX tenía un nivel de agua de unos veinte metros por debajo del actual; entre 1820 y 1865, el nivel subió y dejó bajo el agua al pueblo que había en sus orillas. La explicación que se ha dado a este fenómeno se relaciona con un trasvase y un sistema de riego construidos en esa época. En la primera parte de este trabajo se aborda, mediante la modelación matemática, el estudio de la interacción existente entre el lago y el acuífero subyacente, dada la evidente relación que existe entre ellos. Como resultado se logra una calibración de una zona del acuífero que rodea al lago, de modo que se reproducen con precisión los niveles observados en el lago y, de forma aproximada, las isolíneas del nivel del agua subterránea (manto freático). Se hacen recomendaciones sobre posibles soluciones al descenso del nivel del lago. En esta segunda parte se aborda lo relacionado con los eventos del siglo XIX. Luego de construir un escenario que pudiera semejarse a las condiciones naturales de esa época, se prueban dos variantes que reflejan la acción del trasvase y el sistema de riego sobre el acuífero y el lago, obteniéndose las conclusiones pertinentes. Posteriormente se analiza la variante que se relaciona con una posible recarga natural accidental desde el acuífero profundo.

Palabras clave: lago, modelación matemática, acuífero, agua superficial, agua subterránea, simulación conjunta.

Introducción

En la primera parte de este trabajo se mencionó lo relacionado con la situación del lago Tequesquitengo en dos aspectos: la situación actual donde aparentemente se está produciendo el descenso del nivel del lago y la sobreelevación ocurrida en el siglo XIX. El primer aspecto se abordó en la primera parte, donde se efectuó la calibración del modelo y se emitieron recomendaciones para amortiguar el posible descenso del lago.

La tecnología seleccionada (AQÚIMPE) en todo este trabajo, tal y como se describió en la primera parte, es un modelo matemático bidimensional no estacionario, basado en el método del elemento finito y que emplea triángulos cuadráticos como elemento básico para la discretización del campo de estudio. (Llanusa et al.,

1988a; Llanusa et al., 1988b; Llanusa, 1997; Llanusa y Martínez, 2002; Martínez, 1988; Martínez, 1989; Martínez y Llanusa, 1998). También está dotado de la capacidad de simular, conjuntamente, la presencia de embalses o lagos que interactúan con el acuífero (Singhofen, 1998; Llanusa y Martínez, 2002).

En la primera parte del trabajo se reporta sobre la recopilación de la información existente y su procesamiento en función de la secuencia necesaria para la calibración del modelo. La información completa puede verse en Martínez (2002). Allí también se describen los límites espaciales del área de estudio, el periodo de tiempo de calibración, el intervalo de tiempo de cálculo, y el modelo conceptual que implica decidir sobre las condiciones de frontera y la discretización del área de estudio.

También en la primera parte de este trabajo se explicó el procesamiento de la información para el modelo numérico, que incluye los datos que no varían en el tiempo (estáticos), los datos variables en el tiempo y los datos del lago. La triangulación y numeración de triángulos y nodos puede verse en la ilustración 3 de la primera parte.

La calibración del modelo correspondió también a la primera parte y puede recordarse que se basó en:

- Reproducir los niveles observados mensuales en el lago.
- Estimar, mediante métodos hidrológicos convencionales, el aporte subterráneo anual de salida por las fronteras sur e interior, y lograr que el modelo los reprodujera. Lo que incluye el aporte a tres ríos: Amacuzac, Yautepec y Apatlaco.

La estrecha relación existente entre acuífero y lago ya se había puesto de manifiesto en el trabajo de Ortega *et al.*, 1998. La referida calibración reafirmó este hecho de una forma todavía más evidente, por cuanto se trabaja de forma conjunta con el acuífero y el lago, conformándose un sistema en el cual participan, además, varios ríos, y sus aportes superficiales y subterráneos. Aunque de forma aproximada, se logró una situación calibrada objetiva y consistente, que sirve de base para otros estudios.

En efecto, a partir de los resultados de esa calibración es que se formula el objetivo esencial de esta segunda parte, que consiste en investigar sobre los posibles orígenes de la sobre-elevación que experimentó el lago en el siglo XIX. En este sentido es muy importante tener en cuenta la descripción del régimen hidrológico superficial y subterráneo del sistema que aparece en la primera parte.

Situación del siglo XIX

A partir de la situación conocida actual del lago caben las siguientes preguntas:

- I. ¿Pudo el trasvase del Colotepec y su empleo en el sistema de riego de Xoxocotla ser la causa de la sobre-elevación del lago a mediados del siglo XIX?
- II. En caso negativo, ¿cuál fue la causa de dicha sobre-elevación?

Es que ciertamente resulta de interés práctico y no sólo por mera curiosidad, el darle una explicación a lo ocurrido en el siglo XIX, ya que las causas pueden revelar mecanismos regionales existentes que pudieran aprovecharse en diversos sentidos.

En Aguilar (1999) (página 176, último párrafo) se refiere textualmente:

"En un estudio de la Subsecretaría de Turismo del Gobierno del Estado de Morelos (1987), referente a los balnearios de la entidad, se menciona cómo, en 1820, los señores Monssó, propietarios de la hacienda San José Vista Hermosa (hoy hotel de cinco estrellas), al construir la presa de Alpuyecá y un canal al río Apatlaco, transformaron sus tierras de temporal en tierras de riego, a fin de sembrar caña. Los excedentes de agua aumentaron el tamaño del lago de Tequesquitengo, ya que no tenía salida. Poco a poco el líquido invadió el pueblo de San Juan Tequesquitengo y en 1856 llegó al atrio de la iglesia de San Juan Evangelista. En 1865 se veía la extremidad superior de la torre. En fecha reciente, un grupo de aficionados al deporte acuático encontró en el sudeste del lago, a unos dos metros de la superficie del agua, la torre del templo que todavía está en pie, y a la cual le han amarrado una boya para definir su ubicación. Ver croquis del lago de Tequesquitengo.

"Bloomgarden (1973) comenta que en 1957 el lago presentó un proceso de desecación que se ha detenido, y advierte aumentos y decrementos en el nivel del agua de un año para otro. El Comité Ejecutivo de Planificación de Tequesquitengo, Morelos, presenta en 1962 un informe de la obra de un túnel de desagüe, realizado para salvar de inundaciones a los asentamientos humanos establecidos en las inmediaciones del cuerpo de agua en cuestión."

Confrontando el croquis mencionado con el gráfico del sondeo presentado en Ortega *et al.* (1998) se puede estimar, aunque no con mucha precisión, que el lago se encontraba unos veinte metros por debajo de los niveles actuales.

En el presente trabajo se ha incluido la tarea de simular un período histórico de sesenta años, tratando de que la situación simulada refleje, de forma fundamentalmente cualitativa, los aspectos esenciales de lo ocurrido a partir de 1820. En esa situación se supone que no hay bombeo en pozos y que, con semejanza a la situación actual, el acuífero y el lago mantienen una estrecha relación. Por lo tanto, tanto el acuífero como el lago deben tener elevaciones del agua unos veinte metros por debajo de los niveles actuales. Esta condición del acuífero corresponde más bien a la parte oeste del modelo, ya que, como se ha dicho, hay casi total independencia entre los flujos que provienen del oeste y del norte del modelo.

Bajo estas condiciones, sobre el modelo actúan las mismas acciones que antes, pero descontando la extracción en los pozos. Sobre el embalse se descuenta la entrega y se modifica la cota superior de vertimiento, que ahora es mucho más alta. Se utilizan los mismos

datos de geometría y propiedades que se obtuvieron en la calibración, excepto el estado inicial. Para lograr esta nueva situación del estado inicial requerido se hizo una corrida hipotética, dejando "drenar" el modelo por los contornos sur e interior con los contornos norte y oeste como impermeables. También se utilizan las mismas proporciones que se usaron como infiltración a partir de la lluvia, pero considerando que no hay riego. Las condiciones de contorno de la modelación se mantuvieron iguales que en la calibración.

Todo esto significa que el modelo conceptual en ambas partes de este trabajo es el mismo. Lo que cambia aquí en relación con la primera parte es lo que tiene que modificarse, o sea, el estado inicial y las acciones exteriores.

En una primera corrida de sesenta años no se considera el trasvase del Apatlaco (realmente es el Colotepec). Sería como contemplar el sistema acuífero-lago antes de que existiera dicha obra. Esta corrida se denomina condiciones naturales.

Para efectuar esta corrida se procesaron las series mensuales de lluvia y evaporación (1953-1985) tomadas de Ortega *et al.*, 1998, y se obtuvieron sus parámetros estadísticos anuales. Ajustando la distribución log-normal de probabilidades se generó una serie sintética de sesenta años por semestres para la lluvia y para la evaporación. El modelo se corrió esta vez con un periodo semestral, o sea, que las corridas tuvieron 120 intervalos de tiempo. El escurrimiento hacia el lago se calculó de la misma forma que antes (a partir de la serie generada de lluvia), pero excluyendo los aportes de Barranca Honda.

La ilustración 5 muestra los resultados de condiciones naturales. En ella se observan tres gráficos: el primero es la variación semestral del nivel del lago y del nivel medio del acuífero (bajo el lago) durante sesenta años. Se observan fluctuaciones anuales normales con periodos de elevación y descenso de carácter hiperanual (multianual). El segundo gráfico es el de la recarga al lago, véase que fluctúan valores positivos y negativos, indicando recarga en ambos sentidos. El tercer gráfico ilustra la variación del volumen total del acuífero. Puede verse que, en general y como tendencia, el acuífero y el lago suben y bajan "juntos" (primer gráfico), que la recarga es negativa cuando el lago está más alto (primero y segundo gráficos) y que el almacenamiento total del acuífero muestra un estado de "equilibrio" (tercer gráfico).

El trasvase

Para simular el efecto del trasvase se utilizaron los mismos datos de la corrida de condiciones naturales, pero con la adición del riego en la zona de Xoxocotla y un aporte directo al lago a través del canal.

El área de riego de Xoxocotla está representada en el modelo por el grupo cinco de triángulos (ver ilustración 3 de la primera parte), que está formado por los triángulos 20, 21, 29, 33, 35 y 36. Este grupo en total tiene un área de 1,902 ha=19.02 km².

Según Solórzano (2002), la capacidad de derivación de la presa de Alpuyecá es de unos 1500 l/s. Para simular las consecuencias del trasvase se formularon dos variantes:

- I. Derivación completa: se riega con 1,000 l/s, y se envía al lago, por el canal, el resto: 500 l/s. Este riego en toda el área representa 1,658 mm/año de los cuales se supone una evapotranspiración de 1,050 mm (estimado mediante fórmula empírica, TACSA, 1981a) y el resto (608 mm) penetra al acuífero. Como se está usando un intervalo semestral, el acuífero recibe 304 mm por semestre en toda esta área. Esta variante se denomina Riego500.
- II. Derivación parcial: se riega igual que en el caso anterior, pero lo que se envía al lago por el canal es menor. Se toma un valor semejante al usado en la calibración: 100 l/s. Esta variante se denomina Riego100.

Los resultados para estas dos variantes (Riego500 y Riego100) se muestran en la ilustración 6, que presenta los gráficos de la variación del nivel del lago y de la recarga en el periodo simulado, y también en la ilustración 7, que presenta los gráficos de la variación del nivel medio del acuífero bajo el lago y el volumen total de almacenamiento del acuífero.

En las propias ilustraciones se incluyen los resultados de las condiciones naturales para permitir la comparación y los resultados de otra variante que se explica más adelante.

Del análisis de los gráficos presentados en las ilustraciones 6 y 7 se desprende lo siguiente:

- La variante Riego500 logra elevar el nivel del lago en casi veinte metros en un periodo de unos veinte años. Sin embargo, se observa que la recarga es negativa todo el tiempo (ilustración 6, segundo gráfico), indicando que el lago está más alto, tal como se observa si se compara la ilustración 6 (primer gráfico) con la ilustración 7 (primer gráfico). De hecho, la elevación general del agua en el acuífero no sobrepasa los tres metros por encima del nivel de condiciones naturales. Esta variante conduce a una situación que no puede considerarse reflejo de lo que realmente sucedió, tanto porque la diferencia de niveles entre el lago

Ilustración 5. Simulación de condiciones naturales en el siglo XIX (cota en metros).

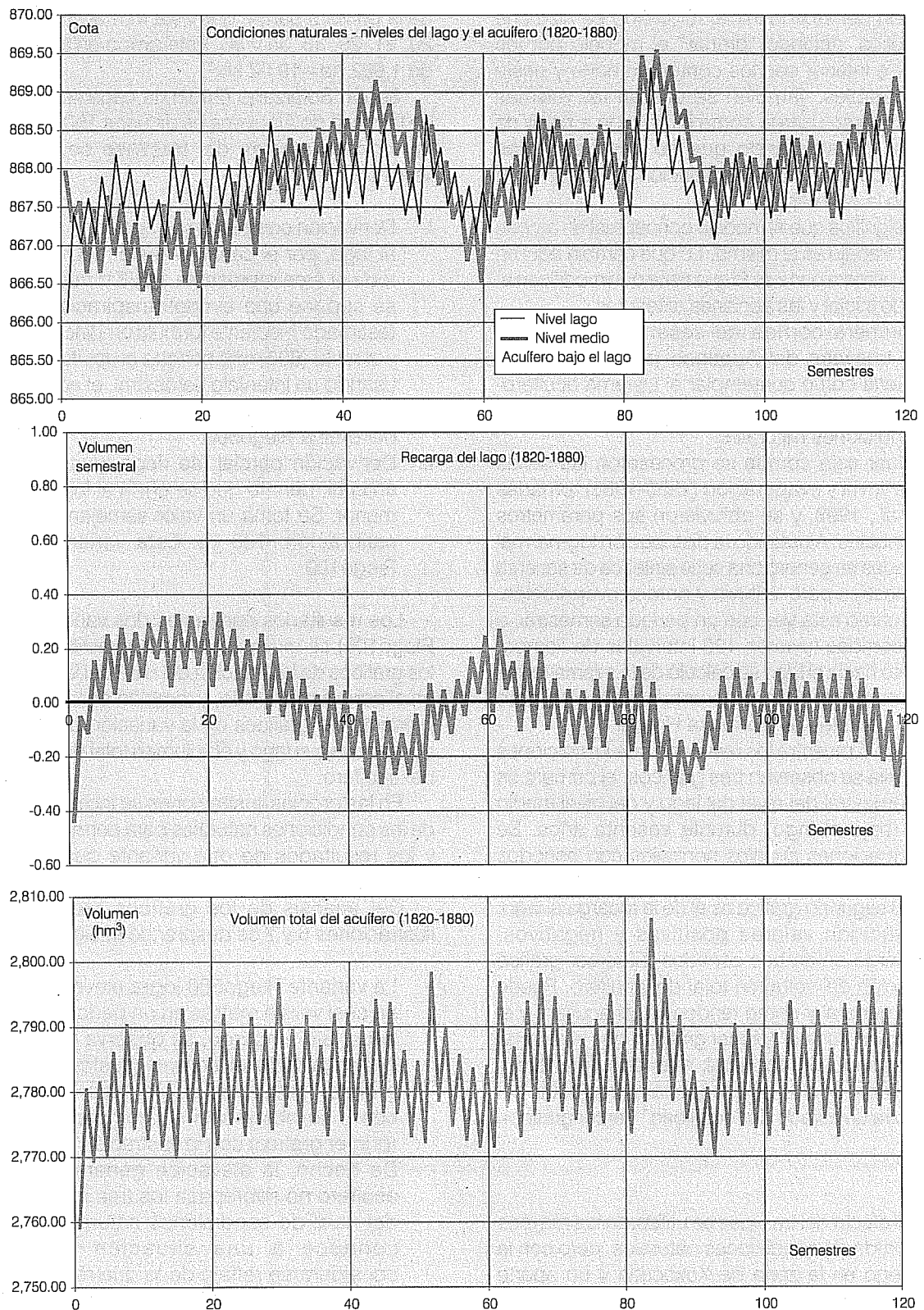
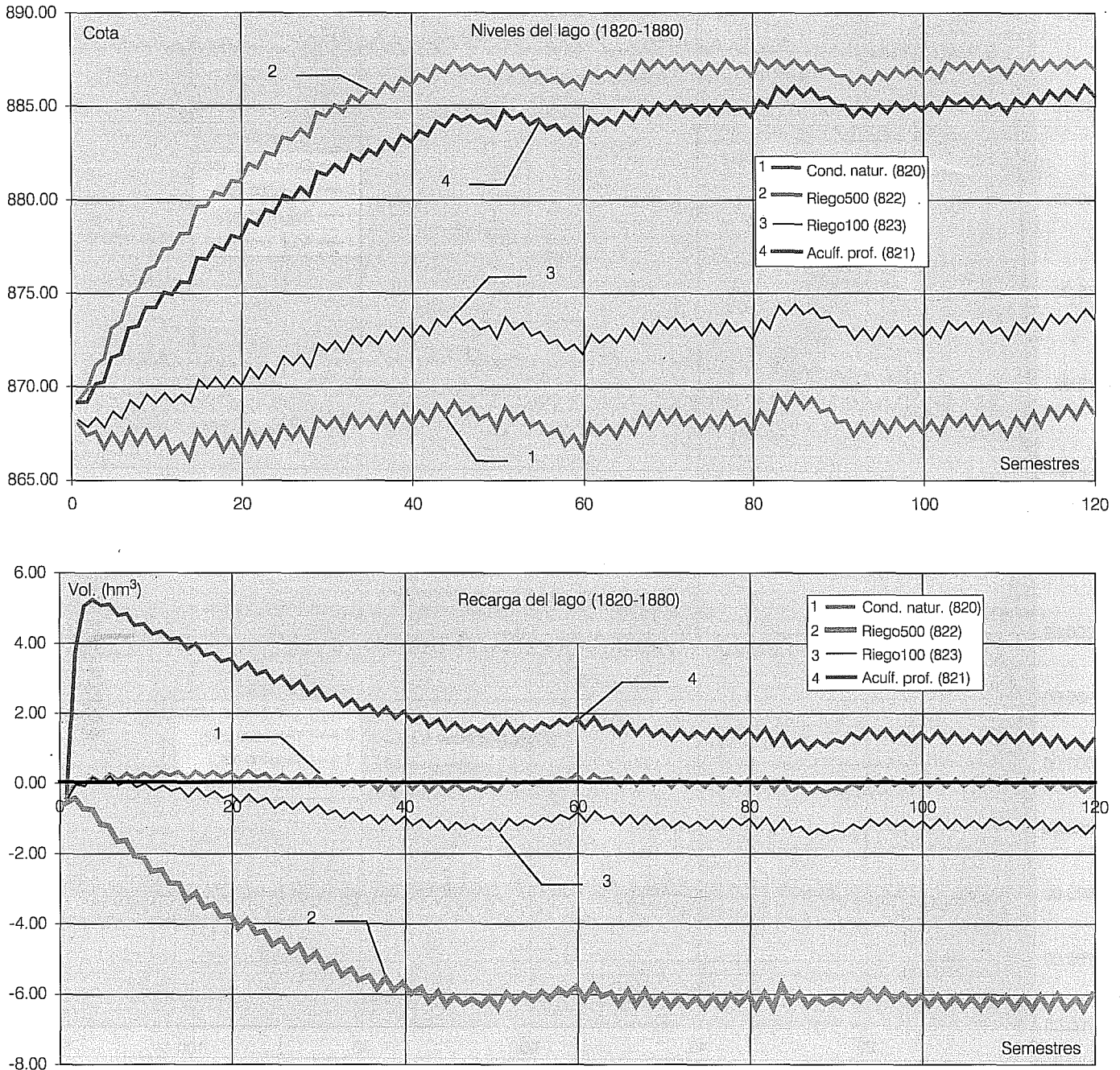


Ilustración 6. Simulación del nivel del lago y recarga en variantes riego500, riego100 y acuífero profundo (cota en metros).

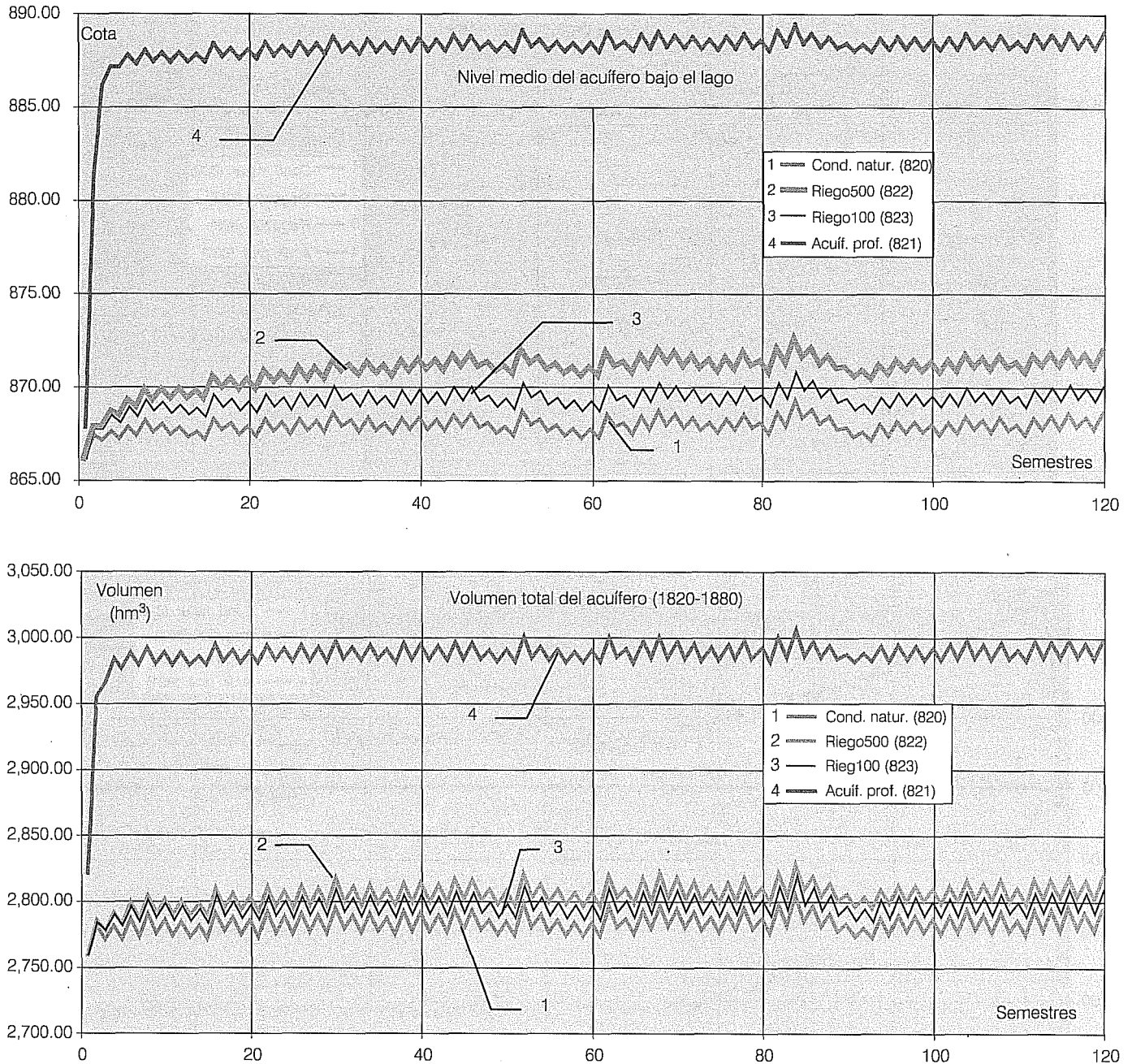


y el acuífero es exagerada como porque el lago es el que está por encima.

- La variante Riego100 no logra elevar el nivel del lago más allá de unos cinco metros por encima del nivel de condiciones naturales. Se observa que la recarga sigue siendo negativa todo el tiempo,

aunque mucho menor que en la variante anterior. La elevación general del agua en el acuífero queda en una posición intermedia entre condiciones naturales y Riego500. Esta variante tampoco ilustra una situación que pueda considerarse semejante a lo que debió suceder, porque no logra

Ilustración 7. Simulación del nivel de acuífero y volumen total en variantes riego500, riego100 y acuífero profundo (cota en metros).



elevant las aguas en la medida en que ocurrió realmente.

En cuanto a los flujos a través de las fronteras del modelo, pueden verse el cuadro 1. Para la comparación, en las corridas de sesenta años se tomaron promedios anuales. Los valores, en general,

son consistentes, excepto los de la frontera oeste que, con excepción del resultado de la calibración, todos son de salida en vez de ser de entrada. Era de esperar que en condiciones naturales el flujo fuera de entrada en la frontera oeste, pero no ocurre así. Este punto requeriría de una mayor profundización para encontrar

Cuadro 1. Flujos anuales por los contornos en las distintas variantes.

Resultado	Salidas (hm ³)			Entradas (hm ³)	
	Amacuzac	Yautepec	Apatlaco	Oeste	Norte
Calibración	197.82	57.21	48.98	-116.06	-115.46
Cond. natur.	84.68	45.13	31.68	11.75	-126.39
Riego500	92.13	45.86	32.44	20.80	-126.36
Riego100	88.62	45.51	32.09	18.86	-126.36
Acuíf. prof.	153.49	59.87	38.45	161.83	-125.94

una explicación satisfactoria. Pudiera relacionarse con la magnitud de las cotas piezométricas estimadas para esta zona.

En las demás variantes (Riego500, Riego100) era de esperar que el flujo en la frontera oeste cambiara de sentido, porque también hay que "llenar" la porción acuífera situada bajo las cuencas de los ríos Chalma y Tembembe. Este flujo demoraría unos 150 años en llenar esa parte acuífera, considerando que tiene unos 400 km², un espesor de 100 m y una porosidad de 0.08.

¿Pudo el trasvase del Colotepec y su empleo en el sistema de riego de Xoxocotla ser la causa de la sobreelevación del lago a mediados del siglo XIX?

Parece evidente que la respuesta a esta pregunta es negativa, ya que, dentro de las limitaciones del riego y del canal, no se infiere posibilidad alguna de lograr el llenado del acuífero y del lago simultáneamente, incluyendo la parte acuífera del oeste.

De la descripción de cómo funciona regionalmente el sistema se desprende que los niveles del lago y el nivel medio del acuífero, en la zona bajo el lago, son similares y muy cercanos. Las fluctuaciones estacionales pueden situar a uno por encima del otro y viceversa, pero en poca magnitud. Si el nivel del agua en el acuífero está por encima del nivel del lago (que es lo que ocurre la mayor parte del año), entonces el acuífero "inyecta" agua al lago. Si el lago está más alto que el acuífero, el lago está drenando hacia el acuífero.

Si el sistema lago-acuífero es una unidad que funciona estrechamente unida, no puede aceptarse como factible una variante en que el nivel del agua en el acuífero esté más de 15 m por debajo del nivel del lago. En la hipótesis de este caso, el agua que hace elevar el nivel del lago salió de una cuenca vecina mediante la derivación y el riego. Pero esta agua es incapaz de hacer elevar el nivel del agua en el acuífero.

El acuífero profundo

Ya se mencionó anteriormente (como se muestra en la ilustración 2 de la primera parte) sobre la existencia de un acuífero confinado profundo con las siguientes características:

- Le sobreyace un estrato relativamente impermeable que lo separa del acuífero superior freático, que es el que se ha venido modelando aquí.
- Estos dos estratos superiores mencionados tienen un espesor de entre cien y doscientos metros.
- El acuífero confinado profundo parece tener un espesor considerable (quizá de 500 a 1,000 m).
- Al parecer, permanece no explotado (ni siquiera explorado) hasta hoy, y se manifiesta superficialmente a través de manantiales y afloramientos aislados (García, 2002).
- Su recarga proviene de la sierra de Chichinautzin al norte. Esta zona de recarga se encuentra en el lugar de mayor precipitación de la región y, además, se estima (Morales Casique, 1997) que se infiltra entre el 35 y 50% al subsuelo. Esa alta tasa de infiltración parece corroborarse por la ausencia de arroyos en estas partes altas de los valles (Gutiérrez, 2002).
- El recorrido del agua a través del acuífero confinado profundo hasta la zona del valle demora un tiempo, que se mide en años (Morales Casique, 1997).

Teniendo en cuenta lo anterior hay indicios que sugieren la posibilidad de que este acuífero profundo, lento, pero constantemente, esté alimentando al acuífero superior freático. Como indicios pueden considerarse los siguientes:

- La capa o estrato intermedio es de baja, pero no de cero permeabilidad.
- La zona de recarga en el norte y el parteaguas subterráneo que allí se forma (Morales Casique, 1997) tienen una cota piezométrica muy por encima del nivel freático del acuífero en los valles.
- Los niveles del acuífero apenas han cambiado en los últimos veinte años (Ortega *et al.*, 1998) (Ortega, 2002), a pesar de que, sin duda alguna, se ha abierto gran cantidad de nuevas explotaciones en ese tiempo.
- En la región existen manantiales y pozos brotantes sorprendentes por sus grandes caudales, los que difícilmente pueden explicarse si no es por la presencia del acuífero profundo.
- La lentitud del movimiento del agua a lo largo del acuífero profundo (poca pérdida piezométrica) y el notable espesor que sin duda posee, lo convierten

en una valiosísima y cuantiosa reserva de agua que deberá evaluarse cuidadosamente para aprovecharla en un futuro. Es precisamente esta característica la que hace que los ríos de la región, aunque directamente en relación con el acuífero superior, mantengan caudales explotables incluso en época de seca.

- Al no poderse explicar el aumento del nivel del lago de Tequesquitengo con el trasvase del Colotepec, una posible explicación podría ser una recarga desde el acuífero profundo.
- El propio lago de Tequesquitengo se originó en un derrumbamiento del techo de una gigantesca caverna; hay al menos otros dos lagos en la región (Aguilar, 1999) cuyo origen es también reciente y probablemente similar.
- El acuífero profundo está formado por rocas calizas y no se puede descartar la presencia de cavernas en su interior y, por tanto, es probable que una parte del estrato impermeable intermedio se haya destruido o, al menos, fracturado en alguna parte, propiciando una comunicación más viable entre los dos acuíferos. Esto, por supuesto, dada la inmensidad del acuífero profundo, sí podría ser la causa de que se "llenara" toda la zona acuífera necesaria en un periodo de unos veinte a cuarenta años y, consiguientemente, el lago.
- En esta región no son raros los movimientos sísmicos, lo cual le da un carácter dinámico a su geología. Existen ejemplos de pozos que han aumentado o disminuido su caudal en poco tiempo sin una causa evidente que lo justifique (García, 2002).

A partir de todo este razonamiento, se consideró oportuno evaluar la variante de recarga vertical hacia arriba desde el acuífero profundo y hacer una simulación provocando ese efecto en el modelo. Y, por supuesto, comparar sus resultados con las variantes anteriores. Esta variante se denominó acuífero profundo.

Para ello se utilizaron los nodos intermedios (48, 49 y 64) del triángulo 19. Este triángulo está cerca (al noroeste), pero no inmediatamente junto al lago y el efecto de la recarga desde abajo se provoca considerando esos tres nodos como de carga conocida fija en el tiempo. Después de varios tanteos se consiguió un comportamiento satisfactorio asignando, respectivamente, las cotas de 912.00, 915.00 y 922.00 m. Obsérvese que el hecho de no incluir todos los nodos del triángulo 19 como de carga conocida y, además, que dicha cota no fuera la misma, da un efecto más real, en el sentido de que probablemente la comunicación existente por derrumbe del estrato intermedio no es una abertura completa ni uniforme.

Los resultados se muestran en las ilustraciones 6 y 7. En el primer gráfico de la ilustración 6 se muestra que el lago también sube casi los veinte metros, pero ahora en un periodo que quizá tarde más de treinta años antes de llegar a una situación más estable. En el segundo gráfico de la ilustración 6 se observa la recarga, que ahora es positiva todo el tiempo, lo cual está más acorde con la realidad. Puede argumentarse que la recarga eventualmente puede ser negativa (del lago al acuífero) y es cierto, pero también faltan por ocurrir más de cien años hasta llegar a la situación actual.

En los dos gráficos de la ilustración 7 se observa que el acuífero se "rellena" hasta niveles ligeramente superiores al lago y llega hasta una situación de estabilidad. En estos cuatro gráficos y su comparación con las variantes anteriores se muestra una evidencia de que la causa de la sobreelevación del lago puede perfectamente haber sido provocada por este fenómeno que se ha descrito, en relación con la comunicación desde el acuífero profundo.

El cuadro de los flujos anuales por las fronteras (presentado en el apartado anterior) incluye los flujos de la variante acuífero profundo. Véase que los valores numéricos son consistentes y que, en particular, el de la frontera oeste, dirigido como salida hacia las cuencas occidentales, ahora es mucho mayor.

En efecto, si se repite el cálculo de cuánto demoraría en llenarse esa parte acuífera, considerando igualmente que tiene unos 400 km², un espesor de 100 m y una porosidad de 0.08, el valor que se obtiene es de cerca de veinte años. Por último, vale señalar que la cifra de recarga desde el acuífero profundo que da el modelo es del orden de los 250 hm³ por año. Este número se reparte entre el llenado del acuífero dentro del modelo, el del lago y el del acuífero al oeste del modelo. Infiltrando completa la derivación del Colotepec (1.50 m³/s), la cifra de recarga sería de 47 hm³ por año.

En caso negativo, ¿cuál fue la causa de dicha sobreelevación?

En opinión de este autor, la causa de la sobreelevación sólo puede explicarse de la forma que se ha argumentado en este apartado. Para ampliar el análisis puede señalarse que no existe contradicción entre el hecho de que se ha considerado impermeable el estrato que separa los dos acuíferos con el hecho de que en la segunda parte se "abre" una conexión entre dichos acuíferos.

No hay contradicción, porque aquí se maneja la idea de que se haya producido accidentalmente una conexión local eventual, pero en el resto del modelo el estrato intermedio se sigue considerando

impermeable. Además, ya se señaló el hecho (que se muestra en la ilustración 7) de que el acuífero alcanza una situación de estabilidad (las fluctuaciones se originan en la infiltración procedente de la lluvia), lo cual significa que la contribución desde el acuífero profundo se reduce considerablemente.

Lo que sí se pudiera objetar es que en ambas partes de este trabajo se afirma de forma categórica que el acuífero profundo, en toda esta inmensa región de los dos valles, alimenta al acuífero superior y el modelo considera este aporte como inexistente. Las razones para ello se detallan:

- a) Según el conocimiento geológico que se tiene, se da el hecho de que este aporte necesariamente tiene que ser muy lento y gradual.
- b) El tiempo considerado en la simulación para calibrar es de 12 meses, y en este tiempo el aporte debe ser insignificante.
- c) En el segundo artículo, que simula sesenta años, el aporte debe ser también insignificante, en comparación con el gran volumen de agua que se traspasa de un acuífero al otro a través de la "brecha".
- d) Por último, en ausencia de un estudio del acuífero profundo, este aporte es muy difícil de estimar, teniendo en cuenta la inmensidad del valle y su variabilidad geológica.

Conclusiones

1. Una vez más se demuestra la ventaja de usar la herramienta de la modelación matemática en el análisis de problemas complejos. También se reitera la comprobación de que esta herramienta puede aplicarse aunque el nivel de información disponible no sea del todo satisfactorio.
2. Se confirma la estrecha relación que existe entre los niveles de agua en el lago y los del acuífero que lo subyace.
3. Con el modelo calibrado se realizan simulaciones hipotéticas de un periodo de sesenta años, con el fin de investigar el origen del llenado del lago en el siglo XIX. Se concluye que el trasvase del río Colotepec para el riego de la zona de Xoxocotla no es la causa de la sobreelevación del lago porque conduce, de acuerdo con los resultados del modelo, a situaciones que se alejan mucho de la realidad.
4. Aunque no hay comprobación experimental posible en estos momentos, se esboza la explicación del acuífero profundo como causa de la sobreelevación y se comprueba con el modelo que conduce a una situación mucho más cercana a la realidad.

5. Es posible continuar profundizando en esta investigación en varias direcciones que se han esbozado en ambas partes del presente trabajo. También podría sugerirse la conformación de un modelo ampliado en espacio que pudiera abarcar, al máximo posible, la extensión de los acuíferos involucrados.

Agradecimiento

El presente trabajo está basado en la investigación llevada a cabo por el autor en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua entre septiembre y noviembre del 2002 (Martínez, J.B., 2002), gracias al gobierno de México que, a través de su Secretaría de Relaciones Exteriores, concedió una beca postdoctoral al autor.

Recibido: 18/11/2002
Aprobado: 17/10/2003

Referencias

- AGUILAR, S. *Ecología del estado de Morelos-un enfoque geográfico*. 2ª edición. México, D.F.: Editorial Praxis, 1999.
- GARCÍA, A. *Comunicación personal*. CNA. Cuernavaca, 2002.
- GUTIÉRREZ, C. *Comunicación personal*. IMTA. Cuernavaca, 2002.
- LLANUSA, H. *Ampliación de la tecnología AQÜIMPE: acciones sobre el sistema acuífero en la modelación matemática*. Tesis doctoral. La Habana: CIH, ISPJAE, 1997.
- LLANUSA, H. y MARTÍNEZ, J.B. Modelación explícita de embalse y acuífero. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XVII, núm. 4, octubre-diciembre de 2002, pp. 89-97.
- LLANUSA, H. ET AL. *Guía de usuario del programa AQÜIMPE*. Monografía. La Habana: CIH, ISPJAE, 1988b.
- LLANUSA, H. ET AL. *Metodología para la calibración de modelos matemáticos de acuíferos subterráneos*. Monografía. La Habana: CIH, ISPJAE, 1988a.
- MARTÍNEZ, J.B. *Simulación matemática de cuencas subterráneas: flujo impermanente bidimensional*. Monografía. La Habana: CIH, ISPJAE, 1989.
- MARTÍNEZ, J.B. y LLANUSA, H. *Interacción entre acuífero y embalse en el sistema AQÜIMPE*. Monografía. La Habana: CIH, ISPJAE, 1998.
- MARTÍNEZ, J.B. Reflexiones sobre la modelación de acuíferos en las condiciones de Cuba. *Memorias del XIII Congreso Latinoamericano de la IAHR. Palacio de las Convenciones*. La Habana, 1988, pp. 264-271.
- MARTÍNEZ, J.B. *Estudio del intercambio de aguas entre el lago de Tequesquitengo y el acuífero subyacente*. Informe de Investigación. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Coordinación de Tecnología Hidrológica, noviembre de 2002.

- MORALES, E. *Análisis numérico de flujo regional de agua subterránea: cuenca del río Amacuzac*. Tesis de Maestría en Aguas Subterráneas. Posgrado de Geofísica. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 1997.
- ORTEGA, M.A. Las condiciones de frontera hidráulicas naturales en la cuenca de México, usando modelado matemático. *Geofísica Internacional*. Vol.28, núm.2, 1989, pp. 283-295.
- ORTEGA, V., SOLÓRZANO, J.C. y MAYA, P. *Factibilidad de restituir artificialmente las pérdidas de agua en el lago de Tequesquitengo, Morelos*. Cuernavaca, México: CNA, Gerencia Regional Balsas, Subgerencia Regional Técnica, octubre de 1998.
- ORTEGA, V. *Comunicación personal*. CNA, Cuernavaca, 2002.
- SINGHOFEN & ASSOCIATES, INC. (STORMWATER MANAGEMENT AND CIVIL ENGINEERING). *Sawmill Pond / Horseshoe Lake / Crooked Lake Interconnection Study*, Report prepared for Orange County Stormwater Management Department, Orlando, Florida, noviembre de 1998.
- SOLÓRZANO, J.C., *Comunicación personal*. CAN. Cuernavaca, 2002.
- TACSA. *Estudio geohidrológico preliminar del valle de Cuernavaca, en el estado de Morelos*. México, D.F.: Técnicos Asesores y Constructores S.A./SARH, 1981^a.
- TACSA. *Estudio geohidrológico preliminar del valle de Zacatepec, en el estado de Morelos*. México, D.F.: Técnicos Asesores y Constructores S.A./SARH, 1981b.

Abstract

MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ, J.B. & GUTIÉRREZ-OJEDA, C. *Why are there level variations in Lake Tequesquitengo? 2. Simulation of 19th century events*. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XIX, no. 4, October-December, 2004, pp. 47-56.

In the 19th century, water level in Lake Tequesquitengo was about 20 meters below present-day levels and within a time period between 1820 and 1865, the lake's level gradually increased, leaving the small town existing on its banks completely under water. The explanation that has been given to this phenomenon is related to a river diversion and an irrigation system built at that time. The first part of this work is aimed, by means of mathematical modeling, to the study of the interaction between the lake and its underlying aquifer, given the evident relationship existing between them. As a result, the calibration of the aquifer zone surrounding the lake is achieved, where the observed water levels are accurately reproduced and the aquifer contour lines (water table) are approximated. Several proposals are made in this first part to reduce the drop of the lake's water level. In this second part of the work, an attempt is made to explain what might have happened in the 19th century. After building a scenario that might represent natural conditions at that time, two alternatives are tested that reflect the influence of the water diversion and irrigation system on the behavior of both the aquifer and the lake. Appropriate conclusions are drawn. Finally, a third alternative is analyzed, in which a possible natural recharge might have come from the deep aquifer as a result of a natural accident.

Keywords: lake, mathematical modeling, aquifer, surface water, groundwater, joint simulation.

Dirección institucional de los autores:

Dr. José Bienvenido Martínez-Rodríguez

Profesor titular.
Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (ISPJAE)
Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH)
CUJAE, Marianao, Ciudad Habana, Cuba.
Teléfonos: (537) 260 14 16 y 260 36 36
Fax: (537) 267 20 13
bienvenido@cih.ispjae.edu.cu
jbmr2@yahoo.es
bienvenido@cih.cujae.edu.cu

M. en C. Carlos Gutiérrez-Ojeda

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso,
Jiutepec, Morelos, México, C.P. 62550,
teléfonos: + (52) (777) 329 3627 y 329 3600 extensión 806
fax: + (52) (777) 329 3682
cgutierr@tlaloc.imta.mx