

Simulación de diferentes alternativas de gestión de los recursos hídricos del acuífero de Puebla-Atoyac

Manuel Martínez Morales¹, Edith R. Salcedo Sánchez¹, Sofía E. Garrido Hoyos², Ma. Vicenta Esteller²

Fecha de recepción: julio 2014 – Fecha de aprobación: enero 2015

RESUMEN

La demanda de agua subterránea en el acuífero de Puebla-Atoyac, localizado en la región central de la República Mexicana se ha incrementado. Ante esto, organismos estatales y federales encargados de la gestión del agua están preocupados por la problemática que presenta el acuífero de Puebla-Alto Atoyac (descenso de nivel piezométrico, deterioro de la calidad del agua, bajo rendimiento de los pozos, agrietamiento del terreno y mayores costos de bombeo y tratamiento), resultado de una mayor explotación. Este estudio presenta un modelo de simulación en la plataforma MODFLOW, que evalúa cuatro escenarios hipotéticos que se definieron para analizar la respuesta del sistema hidrogeológico para los esquemas de bombeo futuros. Se encontraron resultados prometedores para la asignación del recurso en los escenarios 3 y 4. Sin embargo, en la comparación y el análisis de la viabilidad de la recuperación del nivel piezométrico (teniendo en cuenta la política de reducciones graduales de bombeo), se seleccionó el escenario 4 como mejor alternativa.

Palabras clave: agua subterránea, manejo, sobreexplotación, simulación

Simulation of alternatives for water management resources of the aquifer Puebla-Atoyac

ABSTRACT:

The demand for groundwater in the Puebla-Atoyac aquifer, located in the central region of Mexico has increased. As a result of this increased exploitation, a number of state and federal agencies in charge of water management are concerned about the problems associated with the aquifer (decrease of groundwater level, deterioration of water quality, poor performance of the wells, ground cracking and higher pumping and treatment costs) resulting from further exploitation. In this context, it becomes important finding methods to determine patterns of extraction of groundwater to support the distribution of water and at the same time avoid the negative effects of a lack of proper management.

This paper presents a simulation model in MODFLOW platform, which evaluates four hypothetical scenarios that were defined to analyze the response of the hydrogeological system for future pumping schemes. Promising results for resource allocation scenarios 3 and 4 were found. However, in comparing and analyzing the feasibility of recovering the groundwater level (taking into account the policy of gradual reductions in pumping), was selected the scenario 4 as the best alternative.

Keywords: groundwater, management, overexploitation, simulation

¹ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)

² Facultad de Ingeniería-CIRA-UAEM.

Nota: El período de discusión está abierto hasta el 1° de mayo de 2015. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería—Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 19, No.1, 2015, ISSN 1665-529-X.

Introducción

Uno de los mayores desafíos para el desarrollo sostenible, al que tienen que hacer frente los países como el nuestro, consiste en asegurar que todas las personas tengan acceso fiable a suministros de agua. Esto significa que los recursos hídricos deben gestionarse cuidadosamente, y apoyarse de herramientas que permitan una planeación acertada de los mismos. Disponer a tiempo de información sobre las condiciones en una situación concreta es crucial para la toma de decisiones (Díaz, *et al.*, 2008; CONAGUA, 2011).

Recientemente la problemática del abastecimiento del agua se ha centrado en el deterioro de la calidad del agua superficial y subterránea, aunado al agotamiento de los acuíferos (Waller-Barrera *et al.*, 2009). Las aguas subterráneas han jugado el papel primordial en el apoyo social, y el crecimiento económico de muchas áreas geográficas, como principal fuente de abastecimiento (Foster *et al.*, 2006). Sin embargo, la gestión de los acuíferos ha adolecido de la visión que promueve su desarrollo sustentable. Para la búsqueda de esta gestión sustentable, se requiere de una comprensión del sistema, la procedencia del agua, potencial real del sistema, aunque estas cuestiones se complican debido a la falta de información sobre los acuíferos (Garfias *et al.*, 2010; Salcedo *et al.*, 2013).

El desarrollo y aplicación de políticas de gestión es uno de los problemas ambientales más urgentes en México. Como ejemplo de esta urgencia se presenta el caso del sistema acuífero de Puebla-Atoyac, uno de los 100 acuíferos sobreexplotados del país (CONAGUA, 2004), el cual se ubica en una de las zonas más pobladas y económicamente activas del centro de México. Siendo este la principal fuente de abastecimiento de agua potable en la región, y por su condición han sido motivo de algunos estudios (Geotecnología 1997; Flores-Márquez *et al.*, 2006; Garfias *et al.*, 2010), que han permitido estimar un déficit de agua de aproximadamente 700 L/s que equivale a 220.9 Hm³/año (Flores- Márquez *et al.*, 2006).

Entre los efectos perjudiciales más notables que han podido detectar en este acuífero debido al desequilibrio del sistema, cabe destacar el descenso de los niveles del agua subterránea, el agrietamiento del terreno, la reducción de la productividad en los pozos, y el uso intensivo deterioro de la calidad del agua del acuífero en explotación por migración de agua sulfurosa de origen natural, desde mayores profundidades (CONAGUA, 2003; Flores-Márquez *et al.*, 2006; Garfias *et al.* 2010).

Unas de las herramientas que apoyan la toma de decisiones son los modelos de flujo subterráneo desarrollados en plataformas como MODFLOW (Gorelick y Remson, 1982; Gorelick, 1983; McPhee y Yeh, 2004), estas herramientas son de gran utilidad ya que con ellas se pueden realizar simulaciones predictivas de causa y efecto cuando están correctamente calibrados. Este proceso normalmente implica comparar los resultados de una serie de escenarios de predicción, con los resultados de un modelo base que representa las condiciones actuales, y dependiendo de cada caso proyecta dichas condiciones a las condiciones esperadas en el futuro. Estos modelos de flujo se convierten en una herramienta útil para la elaboración de directrices de manejo y toma de decisiones (McPhee y Yeh, 2004).

Con base a lo expuesto y en vista de la importancia estratégica y económica de los recursos subterráneos en la región de Puebla-Tlaxcala, el objetivo del presente trabajo es formular un esquema de extracción del acuífero Puebla-Atoyac, que se adecue al desarrollo sustentable y a la disponibilidad del agua en el acuífero.

Descripción de la zona de estudio

El acuífero Puebla-Atoyac, se ubica en la región central de la República Mexicana en los estados de Puebla y Tlaxcala en el cinturón volcánico transmexicano; la parte que corresponde al estado de Puebla, se extiende desde el oriente de la ciudad capital del estado de Puebla, hasta sus límites con la Sierra Nevada y se encuentra delimitada por tres imponentes volcanes La Malinche; Iztaccíhuatl y Popocatepetl (Figura 1). La región se localiza entre los paralelos 18°54' y 19°30', y entre los meridianos 98°00' y 98°40' al oeste de Greenwich y tiene una altitud promedio de 2,160 m sobre el nivel del mar (msnm) como se muestra en la Figura 1. El clima es templado, con moderada precipitación durante el verano. La temperatura media anual es de 16.6 ° C, con un máximo de 21.3 ° C en mayo y una mínima de 10.8 ° C en febrero. La precipitación anual en la cuenca oscila entre 650 y 900 mm/año, con máximos de 1000 mm/año en las zonas volcánicas del este y oeste de la cuenca (Flores-Márquez *et al.* 2006).

Hidrogeología de la zona

El área del acuífero abarca dos estados de Tlaxcala y Puebla, y cubre una superficie aproximada de 4.060 km², de los cuales 2.151 km² están en Puebla y 1.909 km² están en Tlaxcala. En el acuífero se pueden distinguir tres unidades hidrogeológicas: superior, medio e inferior (Flores- Márquez *et al.*, 2006):

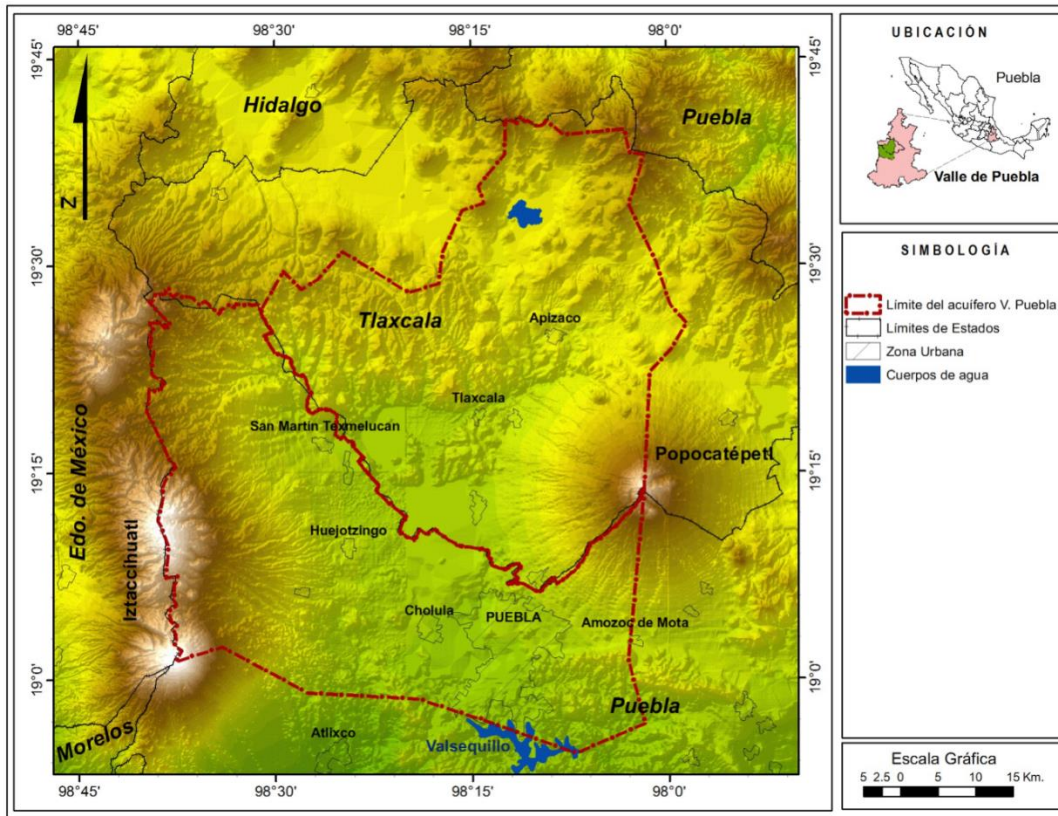


Figura 1. Localización de la zona de estudio acuífero Puebla-Atoyac

El acuífero libre superior está formado por sedimentos granulares y fracturados formaciones cuaternarias de roca, resultante de los flujos de lava de erosión y de los diferentes conos volcánicos en las Sierras. Este acuífero libre, en general, tiene una alta conductividad hidráulica, con un espesor que varía de pocos metros de la montaña hasta 200 m en el centro del valle. El agua subterránea de este acuífero tiene muy buena calidad, apta para el consumo humano (Figura 2). Este acuífero superior recibe su alimentación de los volcanes circundantes.

El acuífero medio (acuífero semiconfinado) está formado por andesitas, basaltos, tobas y conglomerados del Grupo Balsas; la fracturación revela porosidad secundaria (Figura 2). Este acuífero medio cubre un acuitardo que se compone de calizas, margas plegadas y lutitas de la Formación Mezcala (edad Cretácico Superior). La litología de la formación Mezcala es prácticamente impermeable, sin embargo, zonas de alta fractura producen conexión hidráulica entre los acuíferos inferiores y superiores. La recarga de este acuífero es subterránea, procedentes de las zonas de recarga regionales representados por la Formación Tarango (rangos de La Malinche y Sierra Nevada).

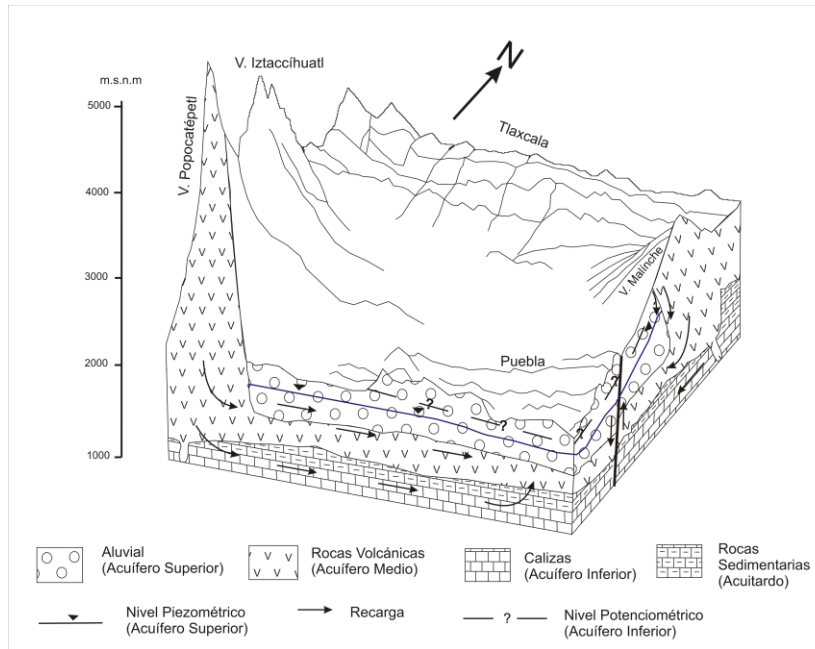
Esta parte es donde se concentra el agua sulfurosa,

manifestándose con una temperatura más alta - posiblemente por la actividad volcánica. La descarga natural se muestra por medio de manantiales y la recarga ascendiente a través del acuitardo. Estas descargas inducidas han sido causadas por algunos pozos, la mayoría de ellos abandonados o cerrados debido a la mala calidad del agua.

El acuífero inferior o confinado, está compuesto de depósitos marinos del Cretácico Inferior de las Formaciones Tecomasuchil y Atzompay del Grupo Tecocoyunca (arenisca, yeso, arcillas). Estas unidades geológicas se vieron afectadas por la disolución y la fracturación tectónica, lo que resulta en alta permeabilidad secundaria (Fig. 2) (Flores-Márquez *et al.* 2006). Estas rocas contienen altas concentraciones de sulfato y azufre (Garfias *et al.* 2010).

Elevación del agua subterránea

La distribución del acuífero indica la existencia de dos zonas de recarga: 1) la recarga procedente de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl en el lado occidental; y 2) la recarga procedente del volcán La Malinche en el lado oriental. La primera se origina una dirección de flujo del agua subterránea NW-SE, a partir de la elevación 2400 msnm. Este último tiene un componente principal en la dirección a partir de 2230 msnm.



Fuente: Salcedo *et al.* 2013.

Figura 2. Modelo conceptual del acuífero del Valle de Puebla.

La recarga procedente del Estado de Tlaxcala, en el norte del área de estudio, tiene una dirección principal de NE-SW, correspondiente a la cota 2300 msnm, que coincide con la elevación cauce del río Zahuapan. Este flujo de agua subterránea se une al componente de los volcanes Iztaccihuatl y Popocatepetl en Nativitas y Santa Isabel Tetlatlahuca, donde la curva de elevación es de 2190 msnm. En Xoxtla y Ocotlán el flujo toma una dirección oeste, y luego el agua subterránea se mueve principalmente hacia el sur, siguiendo la dirección del río Atoyac hasta la presa de Valsequillo en el final de la cuenca.

la unidad hidrogeológica del denominado acuífero Puebla-Atoyac se contempla por una parte de la zona acuífera del estado de Tlaxcala, denominada “Atoyac Zahuapan” y por otra, la zona acuífera del estado de Puebla conocida como “Valle de Puebla” (SEMARNAT-CONAGUA, 2005). De los resultados del balance expuestos en la Tabla 1, se concluye que ambos acuíferos se encuentran sobreexplotados y que la porción que corresponde al acuífero de Valle de Puebla presenta un déficit de agua mayor que el encontrado en Tlaxcala. Lo anterior indica que es urgente reglamentar la explotación, a fin de que se use racional y eficiente el agua para sostener el desarrollo equilibrado y sustentable.

Balance de aguas subterráneas

Para definir el balance de aguas subterráneas de toda

Tabla 1. Balance de aguas subterráneas acuífero Puebla-Atoyac(Hm³).
Tomado de CONAGUA-IMTA, 2007.

Acuífero	Entradas				Salidas				Cambio de almacenamiento	
	Eh	Iv	Ir	Total	Sh	Dm	Db	Dn base	Total	ΔV (s)
Alto Atoyac, Tlaxcala	83.1	108.09	8.71	199.9	64.0	10.4	130.7	-	205.1	-5.2
Valle de Puebla	179.4	135.2	25.0	339.6	42.0	34.0	282.5	14.8	373.3	-33.7
Total	262.5	243.29	33.71	539.5	106.0	44.4	413.2	14.8	578.4	-38.9

Dónde: Eh = Entradas horizontales; Iv = Infiltración vertical; Ir = Infiltración por retornos por riego; Sh = Salidas horizontales; Dm = Descarga de manantiales; Dnbase = descarga por flujo base; Db = Descarga por uso en bombeo y ΔV (s) = cambio del almacenamiento en el acuífero.

Metodología

Simulación hidrogeológica, planificación y desarrollo de escenarios

Una de las herramientas más importantes que existen para comprender el comportamiento cuantitativo del flujo de agua subterránea, son los modelos matemáticos de simulación, debido a que permiten evaluar de manera integral un sinnúmero de parámetros y/o variables que interactúan en un

sistema acuífero y nos pueden dar el panorama general de su funcionamiento. Este modelo considera un "volumen representativo" entre los materiales geológicos, y se representa por la Ley de Darcy. El flujo de agua subterránea se válida para un medio rígido saturado, heterogéneo y anisótropico que se describe por la ecuación parcial diferencial, complementado por las condiciones iniciales y de contorno (McDonald y Harbaugh 1988):

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

Dónde:

- x, y, z Coordenadas cartesianas alineadas a lo largo de los ejes principales de la conductividad hidráulica [L].
- Kxx, Kyy, Kzz Valores del tensor de la conductividad hidráulica [LT-1]
- h Carga hidráulica [L].
- W* Flujo volumétrico por unidad de volumen, representa fuentes y/osumideros de agua [T-1].
- Ss Coeficiente de almacenamiento del medio poroso [L-1].
- t Tiempo [T].

La ecuación de flujo debe satisfacer las condiciones iniciales y de frontera dadas por:

- h (xi, 0) = ho(xi)
- h (xi, t) | Γ1 = ho (xi, t)
- Vi ni | Γ 2 = -Vn (xi, t)

Dónde:

- ho carga hidráulica inicial
- h carga preestablecida en la frontera de tipo Dirichlet Γ1.
- N (n1, n2, n3) vector unitario normal de una frontera tipo Neumann Γ2
- Vn flujo lateral preestablecido por unidad de área en una fronteraΓ. Si Vn es positivo, entonces flujo entonces el flujo entra al dominio y si es negativo el flujo sale del dominio.

El modelo conceptual para el sistema de aguas subterráneas en el acuífero Valle de Puebla (Figura 2) se transfirió a un modelo matemático utilizando la plataforma Visual MODFLOW, versión 4.0; que

resuelve las ecuaciones diferenciales parciales por métodos de diferencias finitas Tabla 2 muestra las características de este modelo.

Tabla 2. Características del modelo de flujo del acuífero de Valle de Puebla

Características del modelo de Flujo	
Superficie de simulación	9,600 km ² (Puebla y Tlaxcala)
Largo	80 km
Ancho	120 km
Discretización espacial	Malla de diferencias finitas en un mapa geológico escala 1:50,000.
Renglones	120
Columnas	80
Discretización Vertical	3 unidades (espesor variable)
Condiciones de frontera	Flujo dependiente (Condiciones de frontera Neumann)
Condiciones Iniciales	Configuración de bombeo para el año 1979 (para el modelo calibrado) Configuración de bombeo para el año 2010 (para los escenarios paramétricos)
Propiedades Hidráulicas	K ₁ 4x10 ⁻⁵ - 1x 10 ⁻⁷ m/s S ₁ 0.15 acuífero bajo K ₂ 6x10 ⁻⁶ - 5x 10 ⁻⁶ m/s S ₂ 1x10 ⁻⁵ acuífero medio K ₃ 2x10 ⁻⁶ - 7x10 ⁻⁶ m/s S ₃ 1x10 ⁻⁵ acuífero profundo

Proceso de calibración

El proceso de calibración consiste en ajustar los valores de cargas hidráulicas calculadas por el modelo con aquellas observadas en campo para diferentes periodos de esfuerzo, de tal manera que la dinámica del agua subterránea cumpla lo definido en el modelo

conceptual. La comparación de cargas calibradas y modificadas se realizó mediante dos métodos, el Error Absoluto Medio (EAM) y la Desviación Estándar (Anderson y Woessner, 1992).

La ecuación que define el EAM:

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n | (hoi - hi) | \quad \text{Ec.(2)}$$

Donde:

EAM error absoluto medio

n número de observaciones

hoi carga hidráulica calculada por el modelo

hi carga hidráulica calculada con el parámetro modificado

La Desviación estándar se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(hoi - hi)]^2} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

δ Desviación estándar

n número de observaciones

hoi carga hidráulica calculada con el modelo

hi carga hidráulica calculada con el parámetro modificado

Planificación y desarrollo de escenarios

Se propuso la simulación de diferentes escenarios paramétricos que permitan la variación de las extracciones en el acuífero Puebla-Atoyac. Los escenarios paramétricos representan condiciones probables o ilustrativas de las propiedades del acuífero y facilitan la visualización de distintas políticas de operación y comportamiento en el sistema. La definición de los escenarios se realizó tomando como base la extracción ilustrada en las concesiones en la zona de estudio conforme a todos los estudios presentados, se consideraron opciones en donde los volúmenes se pudieran sustituir por fuentes alternativas, cancelación de pozos en la zona urbana debido a la problemática de calidad del agua que se ha presentado en la ciudad por la migración de agua sulfurosa del acuífero profundo, hundimientos y colapso de pozos, en estos escenarios se consideró también el rendimiento permanente como tope para la extracción y exista equilibrio.

Dicho lo anterior para el presente estudio se proponen cuatro escenarios hipotéticos a 15 años que se describen a continuación:

- Escenario 1. Continuar la tendencia de

extracción actual para cubrir el abastecimiento (Inercial).

- Escenario 2. Eliminar las extracciones del polígono de la ciudad de Puebla.
- Escenario 3. Reducir las extracciones en el acuífero Valle de Puebla y nulificar las extracciones en la zona urbana de la ciudad.
- Escenario 4. Reducir gradualmente la extracción de agua subterránea en el polígono de veda de zona urbana-industrial de Puebla sin sobrepasar el rendimiento permanente que corresponde al 339 Hm³/año (CONAGUA, 2004).

Cálculo de volúmenes de extracción

Se estimaron los volúmenes de extracción a partir de la revisión de la información reportada por distintos autores en diferentes años, desde 1973 a 2010 tal y como se presenta en la Tabla 3. En la tabla se puede observar claramente la evolución de la extracción desde el año 1979 hasta el año 2010 que es el año cero de nuestra modelación.

Simulación hidrogeológica

Una vez planteados los escenarios y los volúmenes de

extracción a simular (Tabla 4), se elaboró el archivo de pozos considerando la extracción actual de los 2315 pozos que se ubican en la zona acuífera y que están inventariados en el REPDA Registro Público de Derechos de Agua (2010). Posteriormente en cada pozo se ponderó el volumen para obtener la extracción total de cada escenario. Es importante aclarar que se considera la extracción total en la zona acuífera que comprende a los dos estados que integran el acuífero (Puebla y Tlaxcala), aunque la política analizada se centra en la zona que comprende el Valle de Puebla, por lo que se considerará el rendimiento permanente de la zona del Valle de Puebla como limitante en los escenarios explicados más adelante.

Escenario 1. En este escenario se analizó la tendencia inercial de la extracción en la zona acuífera, considerando los pozos del estado de Puebla y Tlaxcala. Los resultados de las simulaciones de 2010 a 2025, tomando el año 2010 como año inicial, se presentan en las figuras 3 y 4, se puede observar como el abatimiento en el acuífero del Valle de Puebla se manifiesta en zonas localizadas y con mayor énfasis en la localidad de San Martín Texmelucan en donde se ubican una gran cantidad de aprovechamientos, así como en la zona que comprende la mancha urbana de la ciudad de Puebla y sus alrededores (San Andrés Cholula y Necatitlán). En la zona ubicada en el estado de Tlaxcala el abatimiento se enmarca en la mancha urbana de la ciudad de Tlaxcala y en el municipio de Apizaco.

Resultados y discusión
Simulación de escenarios

Tabla 3. Volúmenes de extracción en el acuífero de Valle de Puebla con base a diferentes referencias.

Año	Vol. Extraído en el acuífero (Hm³/año)	Referencia
1979	136.657	Lesser y Asociados (1982).
1996	292.025	Geotecnología (1997).
2001	432.770	CONAGUA-Gerencia de Aguas subterráneas (2000).
2007	503.142	CONAGUA-IMTA (2007).
2010	503.313	REPDA, (2010)

Tabla 4. Volúmenes de extracción a simular en cada escenario

Escenarios	Volumen de simulación Hm³/año			
	2010*	2015	2020	2025
Escenario 1	503.313	592.707	624.695	707.862
Escenario 2		573.741	604.705	685.211
Escenario 3	-	479.613	505.497	572.795
Escenario 4	-	536.597	535.630	534.663

*año inicial

Figura 3. Piezometría inicial 2010 (msnm)

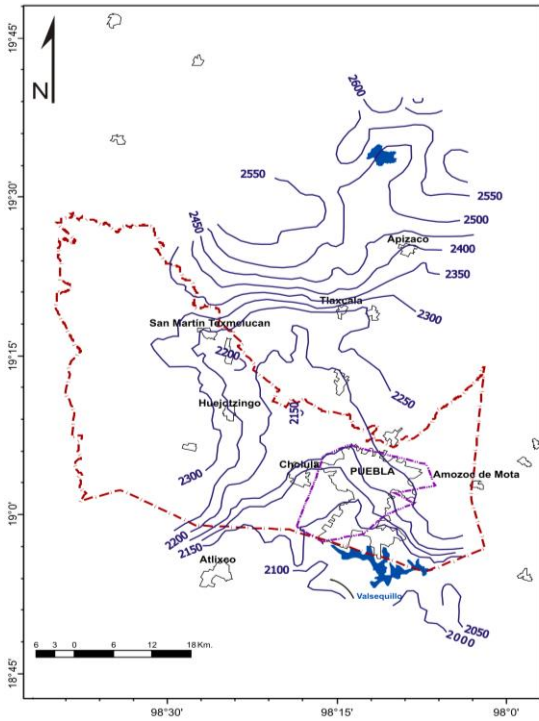
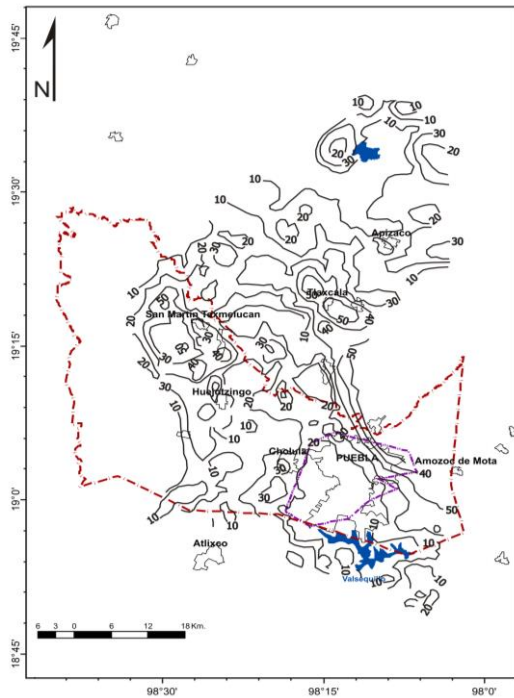


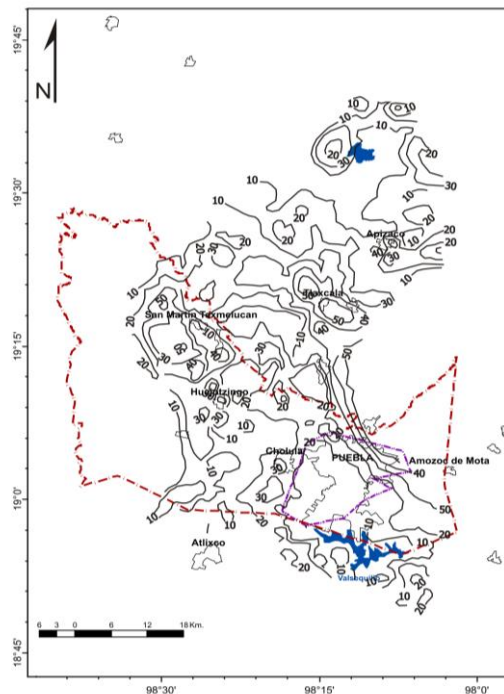
Figura 4. Mapa de isodescenso para el escenario 1 período 2010 - 2025 (m)



Escenario 2. En este escenario se consideró, la tendencia inercial de la extracción y se nulificó la extracción en los aprovechamientos ubicados en la ciudad de Puebla. Los resultados se pueden observar en la Figura 5, la tendencia del abatimiento es muy

similar al escenario 1 (figura 3). En la zona que comprende al estado de Tlaxcala el abatimiento se denota en Apizaco y la ciudad de Tlaxcala, Papatotla y San Isidro.

Figura 5. Mapa de isodescenso del escenario 2 período 2010-2025 (m)



Escenario 3. En este escenario además de nulificar la extracción en la ciudad de Puebla se disminuye el 30% de la extracción en el resto del acuífero de Valle del Puebla manteniendo la extracción inercial en el estado de Tlaxcala. El máximo abatimiento en el período se distingue en los municipios de San Martín Texmelucan, Nativitas, Tlaltenango, San Salvador el Verde, Puebla, San Pedro y San Andrés Cholula. En la parte que comprende al estado de Tlaxcala (Figura 6) el abatimiento se presenta en Apizaco, la ciudad de Tlaxcala, Papalotla y San Isidro.

Escenario 4. Este escenario considera la reducción paulatina de la extracción del agua en el polígono urbano-industrial del estado de Puebla, considerado como una de las zonas de mayor contaminación y de elevado bombeo, que tiene como limitante principal el rendimiento permanente de la extracción en la zona acuífera (339 Hm³/año). El abatimiento (Figura 7) se distribuye en los municipios de San Martín Texmelucan, Nativitas, Puebla, San Pedro y San Andrés Cholula. En la parte que comprende al estado de Tlaxcala el abatimiento se presenta en las zonas de Apizaco y la ciudad de Tlaxcala, (Figura 7).

Para comparar los resultados de los escenarios se

graficaron los abatimientos de los tres pozos de observación (Tabla 4) evaluándose la evolución piezométrica para cada uno de los escenarios. En el escenario 1, el abatimiento acumulado para el período 2010-2025 en los pozos de observación es de 10.99 m en el pozo 1, 13.15 m en el pozo 2 y 10.42 m en el pozo 3. El abatimiento acumulado del escenario 2, conforme al pozo de observación 1 es de 8.45 m, 12.58 y 9.36 m. De manera que en el escenario 3, el abatimiento acumulado, es de 0.35 m en el pozo de observación 1, 3.87 m en pozo 2 y 7.08 m en el pozo 3 (Figura 4 y Tabla 4). Contrastando los escenarios anteriores con el escenario 3, el abatimiento se distribuye en las mismas zonas, acentuándose en las manchas urbanas de los estados de Puebla y Tlaxcala. En este escenario se observa una recuperación en los pozos de observación, aunque sigue manifestándose abatimiento. Mientras que en los pozos de observación del escenario 4, se denota una recuperación de los niveles piezométricos, por ejemplo en el pozo 1 se tiene una reducción del nivel de abatimiento y por lo tanto una recuperación de 1.90 m en el pozo 1, 0.47 m para el pozo 2 del año 2010 y 2.07 m en el pozo 3 sobre la piezometría de 2010 (Tabla 4).

Figura 6. Mapa de isodescenso del escenario 3 período 2010-2025 (m)

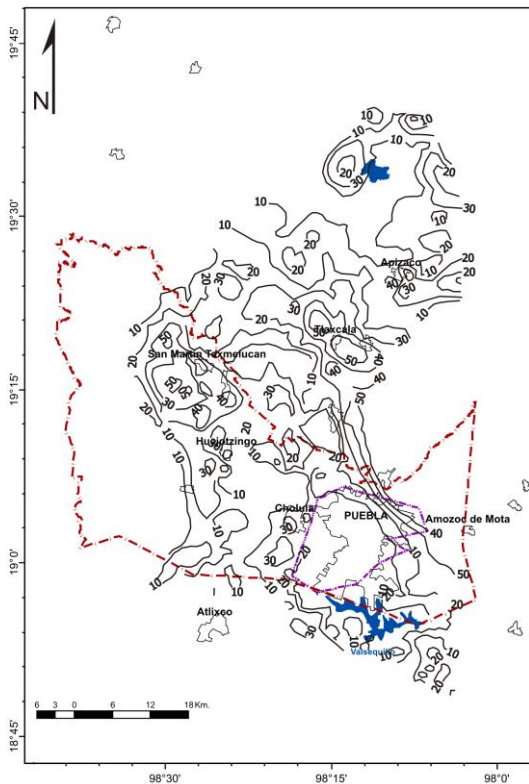


Figura 7. Mapa de isodescenso del escenario 4 período 2010-2025 (m).

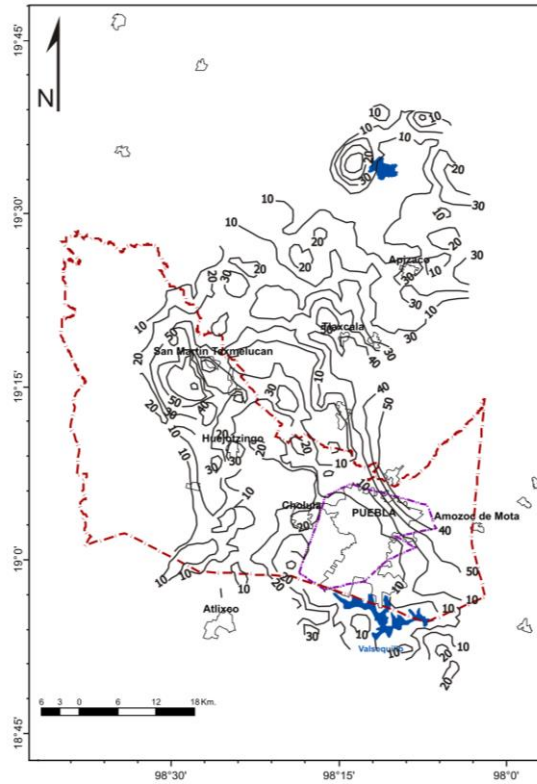


Tabla 4. Abatimiento acumulado presentado en los pozos de observación en cada escenario

Pozo	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
	Abatimiento acumulado (m)			
1	10.99	8.46	0.36	-1.91
2	13.15	12.59	3.88	-0.47
3	10.43	9.37	7.08	2.07

Con base en todo lo anteriormente expuesto, y con el objetivo de analizar la factibilidad de la aplicación de una política de manejo con reducciones graduales de volúmenes de extracción, se seleccionó el escenario 4 para aplicar la optimización.

Conclusiones

El presente trabajo representa una herramienta práctica para entender mejor la extracción sistema acuífero Puebla-Atoyac. El modelo puede ser utilizado para predecir los cambios en los niveles de agua subterránea y para evaluar alternativas resultantes de recarga o descarga, o ambos, además de que es la base para la formulación de alternativas de optimización para un modelo de gestión de los recursos de agua subterránea en la zona.

De continuar la política de extracción actual que sigue un escenario inercial se tendrían abatimientos del

orden de 10 a 13 m en un período de 15 años en el acuífero, provocando la intrusión de agua sulfurosa de un acuífero profundo principalmente en la zona que corresponde a la ciudad de Puebla.

Mediante la simulación matemática de esquemas de manejo del acuífero se logró la recuperación de los niveles piezométricos de hasta 5 m en el período de simulación de 15 años a través de la reducción gradual de la extracción.

Esta política de extracción gradual puede permitir el reúso de agua residual tratada para las actividades que cumplan con las normas ambientales como el riego de jardines o de las industrias que no requieren agua de primera calidad, o utilizar fuentes de agua superficiales que requerirían en la zona un pre-tratamiento por la contaminación existente en los ríos Alseca y Atoyac.

REFERENCIAS

Anderson M. y Woessner. W. (1992). Applied Groundwater Modeling: Simulation of flow and advective transport. Academic Press. New York.

CONAGUA (2000). Actualización Hidrogeológica del Acuífero Alto Atoyac, Estado de Tlaxcala, Departamento de Aguas Subterráneas, Subgerencia Técnica, Gerencia Estatal Tlaxcala.

CONAGUA (2003). Determinación de la Disponibilidad de agua subterránea en el acuífero Valle de Puebla, estado de Puebla. Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica.

CONAGUA (2004). Zonas de reserva de agua potable para la Ciudad de Puebla, Pue. Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica.

CONAGUA-IMTA(2007). “Manejo Integrado de las aguas subterráneas en los Acuíferos Puebla- Alto Atoyac, Estados de Puebla y Tlaxcala”. Gerencia de Aguas Subterráneas.

CONAGUA (2011) Agenda del Agua 2030, CONAGUA, Ciudad de México, <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Temas/AgendadelAgua2030.pdf>

Díaz Delgado, C., Esteller M. V., Velasco Chilpa A., Martínez Vilchis J., Arriaga Jordán C. M., Vilchis Francés A.Y., Manzano Solís L. R, Colín Mercado M., Miranda Juárez S., Uribe Caballero M. L. W., Peña Hinojosa A. (2008). Guía de planeación estratégica participativa para la gestión integrada de los recursos hídricos de la cuenca del río Lerma-Chapala-Santiago, Capítulo Estado de México, Toluca, CIRA, Facultad de Ingeniería de la Uaemex-Red Interinstitucional e Interdisciplinaria de Investigación, Consulta y Coordinación Científica para la Recuperación de la Cuenca Lerma-Chapala-Santiago (Red Lerma).

Flores-Márquez E. L., Jiménez-Suárez G., Martínez-Serrano R. G., Chavéz R. E., and Silva-Pérez, D. (2006). Study of geothermal water intrusion due to groundwater exploitation in the Puebla Valley aquifer system, Mexico. *Hydrogeol. J.*, 14(7), 1216-1230.

Foster S., Kemper K., Garduño H., Nanni N. and Tuinhof A., (2006). Gestión sustentable del Agua subterránea. Instrumentos Económicos para la Gestión de Agua Subterránea. Serie de Notas Informativas 2002-2006. Banco Mundial programa asociado GWP. Washington, D. C. EEUU. 1-8.

Garfías J., Arroyo N., and Aravena, R. (2010). Hydrochemistry and origins of mineralized waters in the Puebla aquifer system, Mexico. *Environ Earth Sc.*, 59 (8), 1789-1805.

Geotecnología S.A. (1997). Actualización del estudio geohidrológico de los acuíferos de Valle de Puebla. Sistema Operador de Agua potable y Alcantarillado de Puebla (SOAPAP).

Gorelick, S.M., Remson, I. (1982). Optimal location and management of waste disposal facilities affecting ground water quality. *Water Resour. Bulletin*, 18(1), 43-51 p.

Gorelick S. M. (1983). A review of distributed parameter groundwater management modelling methods. *Water Resour. Res.* 19(2), 305-319 p.

Lesser y Asociados S.A. DE C.V. (1982). Estudio Geohidrológico de la zona río Atoyac, Estado de Puebla. Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica.

MacDonald M G y Harbaugh A W (1988). MODFLOW, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model- U-S.G.S. Open file report 83-875.

McPhee, J., and Yeh, W. W.-G. (2004). Multiobjective optimization for sustainable groundwater management in semiarid regions. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 130(6), 490-497.

SEMARNAT-CONAGUA, 2005. Integración del Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del acuífero de Alto Atoyac.

Salcedo E. R., Esteller M. V., Garrido H. S. Martínez M. M. (2013). Groundwater optimization model for sustainable management of the Valley of Puebla aquifer, Mexico. *Environ Earth Sci* (2013) 70:337-351.

Waller-Barrera C, Mendoza-Espinosa L., Medellín-Azuara, J. and Lund J. R., (2009). Optimización económico-ingenieril del suministro agrícola y urbano: una aplicación de reúso del agua en Ensenada, Baja California, México. *Ingeniería hidráulica en México*, 26(4), 87-103.

Este documento debe citarse como: Martínez Morales M, Salcedo Sánchez E., Garrido Hoyos S., Esteller M. (2015). **Simulación de diferentes alternativas de gestión de los recursos hídricos del acuífero de Puebla-Atoyac.** *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 19-1, pp. 62-72, ISSN 1665-529-X.