Disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático en el Valle de Galeana, Nuevo León, México

• Thania G. López-García • Mario G. Manzano* • Aldo I. Ramírez •
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México
*Autor para correspondencia

Resumen

López-García, T. G., Manzano, M. G., & Ramírez, A. I. (enero-febrero, 2017). Disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático en el Valle de Galeana, Nuevo León, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *8*(1), 105-114.

Se realizó una modelación con el programa *WEAP* para determinar el impacto de los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 en los recursos hídricos en el periodo 2015-2030 en el Valle de Galeana, Nuevo León. Se desarrollaron dos escenarios de adaptación: el primero considera una reducción en la demanda hídrica para uso agrícola por cambio de sistemas de riego gradual; el segundo contempla un plan hídrico integral para mejorar la capacidad de infiltración de la zona de recarga mediante programas de reforestación y recuperación de suelos. Los resultados muestran que la situación del acuífero con escenarios de cambio climático y con el uso actual del agua es crítica, pues en ambos escenarios se tendrían afectaciones importantes en el acuífero a partir de 2015, ocurriendo un mínima recarga hacia el acuífero de 0.96 y 1.5% con respecto a su capacidad total durante los meses de lluvia típicos (agosto y septiembre, respectivamente). Considerando el escenario de adaptación de cambio en sistemas de riego, se espera una ligera recuperación a partir del año 2023, alcanzando un máximo de recarga de 3.11 Mm^3 en temporada de lluvia. Los resultados del plan hídrico integral, si bien no mantienen una recarga constante y positiva, sí muestran un volumen de recuperación de 27 Mm^3, lo que representa 18.75% de la capacidad máxima de almacenamiento en el sistema; sin embargo, éste disminuye para el mes de diciembre, por lo que no es posible basar el desarrollo de la agricultura en las comunidades de la región con prácticas de alto consumo de agua.

Palabras clave: modelación programa *WEAP*, escenarios RCP de cambio climático, recursos hídricos, altiplano mexicano.

Abstract

López-García, T. G., Manzano, M. G., & Ramírez, A. I. (January-February, 2017). Water availability under climate change scenarios in the Valle de Galeana, Nuevo Leon, Mexico. Water Technology and Sciences *(in Spanish)*, 8*(1), 105-114.*

WEAP modeling was applied in order to identify the impact to water resources under CRP 4.5 and 8.5 climate change scenarios for the period of 2015-2030 in the Galeana Valley, Nuevo Leon, Mexico. Two adaptation conditions were set, the first one considers that the demand of water for cropping is reduced due to improvements in irrigation systems, the second condition addresses a comprehensive plan to ensure infiltration capacity on the recharging area of the local aquifer through enhancement of plant cover and soil recovery. Results show that the condition of the aquifer under climate change scenarios and traditional use of water is critical, because both scenarios would allow a complete abatement of the aquifer by the year 2015 with minimum recharge of about 0.96 and 1.5% during typical rainy months –August and September, respectively. When considering the first scenario a retrieval is expected from the year 2023 on, reaching a maximum recharge of 3.11 Mm^3 in the rainy season. Although yield from the comprehensive plan do not allow a positive and constant aquifer recharge, it does show a recovering volume of 27 Mm^3, thus representing 18.75% of the maximum system storage capacity; nevertheless, that volume slows down by the end of the year. Such behavior does not permit the development of local communities on the basis of the current highly-consuming water use practices.

Keywords: *WEAP modeling program, RCP climate change scenarios, water resources, Mexican Plateau.*

Recibido: 01/12/2014
Aceptado: 31/08/2016

Introducción

La gestión del agua en las zonas áridas de México se ha convertido en un tema de interés nacional. Según los modelos de circulación global (Martínez, 2007), el calentamiento global ocasionará notables modificaciones en el ciclo hidrológico, y muestran una previsible disminución en la

precipitación y escurrimiento, aunado a que varias cuencas y acuíferos están explotados más allá de sus límites.

En particular, para el agua subterránea se espera una disminución en los acuíferos someros de las zonas áridas, dada la tendencia de disminución en la precipitación en las zonas de recarga. Asimismo, estos efectos dependerán del balance hídrico de los sistemas acuíferos; si el balance es actualmente positivo, podrían registrarse efectos poco notables; pero si las extracciones y las aportaciones son similares o las primeras excesivas, su uso sostenible se verá comprometido, existiendo un relación no lineal entre precipitación y recarga; es decir, que un decremento en la precipitación puede ocasionar una reducción mucho mayor en la recarga (Arnell & Chunhen, 2001).

La amenaza de mayores eventos de sequía en las zonas áridas, provocados por cambios en la temporada de lluvias, así como por la variabilidad climática de los años El Niño, han afectado a millones de personas por pérdidas en la agricultura, incendios y otros siniestros, por lo que surge un fuerte necesidad de instrumentar planes de prevención y medidas de adaptación, en virtud de que la inversión requerida para la prevención siempre será mucho menor que los costos de los desastres (Magaña, Méndez, Morales, & Millán, 2004).

Las variaciones del clima y las actividades humanas están involucradas directamente con el incremento de la desertificación, así como con el deterioro de los ecosistemas, la reducción del potencial biológico y la pérdida de la biodiversidad, principalmente en las zonas áridas del planeta (Oropeza, 2004). El 64.03% del territorio mexicano mostraba ya señales de desertificación a finales de la década de 1990 (Semarnap, 1999), siendo la sequía el factor principal, actuando como detonador; otros factores involucrados que destacan son la agricultura (el mal uso de tecnología, abuso de pesticidas, mal manejo de riego, conflicto por tenencia y uso de tierras, entre otros); ganadería y pastoreo; actividades forestales no sustentables; desarrollo urbano, y cambios de uso de suelo. Los modelos de cambio climático (Oropeza, 2004) indican un aumento en el riesgo de desertificación por erosión hídrica. El desarrollo sostenible, la protección del suelo, la conservación del agua, la búsqueda de cultivos tolerantes a la sequía y el uso eficiente de la energía son algunos de los objetivos de las políticas de adaptación ante este fenómeno.

La evaluación del impacto del cambio climático en la sequía meteorológica (Hernández & Valdez, 2004) demuestra un aumento en el índice de severidad del 39.4% con el modelo GFDL-30; en el caso de Nuevo León, este índice se incrementó en 47.51% y 51.68% con el modelo CCCM. Por lo anterior, surge la necesidad de realizar estudios regionales que contemplen la diversidad de climas, con el fin de desarrollar medidas de mitigación adecuadas para enfrentar sequías más frecuentes e intensas.

La modelación hidrológica, a través del uso de programas computacionales, como el programa *WEAP 21*, permite calcular el cambio potencial en las variables de la ecuación de balance hídrico bajo supuestos establecidos por el operador; asimismo, admite introducir escenarios de cambio climático, desarrollo de medidas de adaptación y políticas regionales, entre otros.

Los resultados de un estudio del impacto del cambio climático en los recursos hídricos usando el programa *WEAP*, desarrollado en la cuenca del Sinú-Caribe, en Colombia, indica que se incrementará la presión y escasez sobre los recursos hídricos, así como las condiciones de aridez, y degradación biótica y física de la cuenca (Ospina, Gay, Conde, & Sánchez-Torres, 2009).

En México se estudió el impacto del crecimiento poblacional y el cambio climático en la subcuenca del río Zahuapan, en el estado de Tlaxcala, utilizando el programa *WEAP* (Suárez *et al*., 2009). Los resultados indican que la captación de la cuenca está en el orden de 779.6 millones de m^3 (Mm^3) anuales, de los cuales 65% se evapotranspira, 30% escurre y 5% se infiltra. Las proyecciones simuladas indican que para el año 2015, la demanda hídrica aumentará un

• ISSN 0187-8336

27% (respecto al año base, 2005); los modelos regionales indican una disminución de 6% en la precipitación y, como consecuencia, una baja en el almacenamiento del acuífero de 14%. Dentro de las recomendaciones para mitigar los efectos del cambio climático en la cuenca se enumeran la reforestación; el tratamiento y utilización de aguas residuales de la agricultura; eliminación de fugas; incremento de la eficiencia en el riego agrícola, y promoción de una cultura de uso racional del agua, entre otras.

En la cuenca Guayalejo-Tamesí, en el sur del estado de Tamaulipas, se aplicó el modelo *WEAP* y las proyecciones de cambio climático A2 y B2 (Sánchez-Torres, Ospina, Gay, & Conde, 2011). Con datos de precipitación y temperatura se obtuvo el Índice de Lang, para determinar zonas climáticas y determinar vulnerabilidad. Se concluye que incluso sin el efecto del cambio climático en la zona, de seguir el mismo sistema de derechos de agua y concesiones, se prevé escasez del recurso. La agricultura representa 50% en el consumo del total concesionado y se espera sea el más afectado, principalmente en tres de los cinco distritos de riego analizados. El modelo *WEAP* sugiere que el volumen concesionado es mayor al que circula en el sistema, por lo que la autoridad deberá tomar medidas de adaptación en ese sentido.

De manera reciente se han desarrollado nuevos escenarios de cambio climático en México para elaborar el 5º Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático IPCC para la Quinta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Los escenarios RCP (por sus siglas en inglés *Representative Concentration Pathways*) están basados en las concentraciones de gases de efecto invernadero históricas para desarrollar proyecciones de las concentraciones futuras. Los nuevos escenarios se denominan RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, los cuales se refieren al posible aumento global del desbalance de energía radiativa entrante y saliente, expresado en W/m^2 (Moss *et al*., 2010). Por ejemplo, RCP8.5 es el escenario más extremo, que supone un desbalance de 8.5 W/m^2 para el año 2100 debido al aumento de gases de efecto invernadero (Cavazos *et al*., 2013).

Ante la evidente necesidad de efectuar estudios regionales para conocer los efectos del cambio climático en los recursos hídricos de las zonas áridas, los objetivos de este estudio comprenden el desarrollo del modelo mediante el uso del programa *WEAP* para la zona del Valle de Galeana, Nuevo León; la determinación de los impactos de los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 para el futuro cercano, y la integración de escenarios de adaptación.

Metodología

Área de estudio

El Valle de Galeana se encuentra dentro del denominado Altiplano Mexicano. Es una zona con condiciones de aridez al pie del lado oeste de la Sierra Madre Oriental, en donde la disponibilidad de agua se ve limitada a la del acuífero Navidad-Potosí-Raíces (Conagua, 2009). En este acuífero, según el estudio de disponibilidad, la ecuación de balance arroja un resultado negativo debido a que las salidas son mayores a las entradas, siendo el agua para el uso agrícola la que mayor proporción tiene en las extracciones del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA). En la figura 1 se muestra la ubicación de la zona de estudio.

Modelación

Descripción general y fuentes de información

El sistema hídrico en el que se basó el modelo *WEAP* está formado por las demandas (salidas) denominadas "agrícola" y "otras", y por la oferta (entradas), la cual se encuentra limitada a la disponibilidad de agua subterránea, puesto que no existen ríos, lagos o presas que se puedan analizar en el modelo. La información se obtuvo de la base de datos REPDA, con la información de las concesiones otorgadas hasta el año 2011 para el acuífero Navidad-Potosí-Raíces y del

ISSN 0187-8336 •

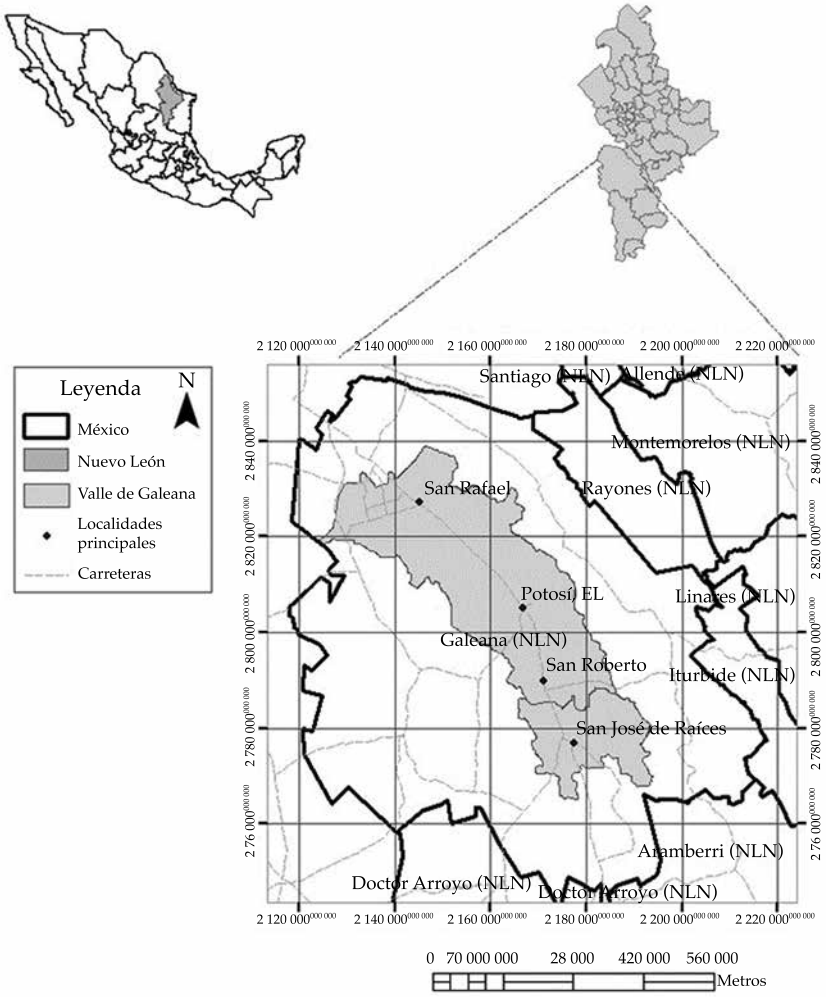

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Elaboración propia con información de Conagua e INEGI.

estudio de disponibilidad del mismo. La modelación consistió en un análisis hidrológico, considerando datos de precipitación y temperatura para el escenario base y dos escenarios regionales de cambio climático, con una malla de 0.5 x 0.5 grados para el futuro cercano (2015-2039); se trabajó con los escenarios RCP 4.5 y 8.5, los cuales se descargaron de la página del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (http://escenarios.inecc.gob.mx/). Parámetros como el coeficiente de infiltración y la evapotranspiración se calcularon mediante fórmulas convencionales: en el caso del coeficiente de infiltración, mediante la relación del volumen de escurrimiento y volumen de precipitación anual, y la evapotranspiración con el uso de la fórmula de Turc.

Cálculos

Para el cálculo de capacidad máxima del acuífero, almacenamiento inicial y recarga natural se consideró la información del estudio de disponibilidad del acuífero Navidad-Potosí-Raíces de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y la capa de uso de suelo y vegetación de INEGI 2000. La capacidad máxima de almacenamiento consideró la suma de los dos medios en los que

• ISSN 0187-8336

se deposita el agua. El más superficial es el medio granular, con una profundidad promedio de 150 m, y el medio compuesto de rocas carbonatadas y fracturadas, con una extensión de al menos 300 m en la zona del Valle. Según el estudio, el nivel estático se encuentra de 20 a 30 m de profundidad. Es así que se puede calcular un almacenamiento inicial de 136 Mm^3 y una capacidad máxima de 144 Mm^3. La extensión considerada como área de extracción se basó en el área de agricultura de riego con un total de 3 000 km^2.

La recarga total fue calculada mensualmente (RTm) con la siguiente función (ecuación (1)):

$$RTm = \frac{\text{vol. de recarga (entradas totales)}}{\text{vol. precipita al año}} \times \text{precipitación mensual}^{e\text{-}d} \quad (1)$$

Donde:

e-d: todos los meses, de enero a diciembre.

La recarga total fue ingresada por medio de la opción de asistente de *series de tiempo*, para considerar la variabilidad mensual, en donde la recarga anual está dada por la suma de la recarga natural por lluvia de las partes bajas, el flujo horizontal subterráneo y la recarga inducida. El volumen total de agua ganado o perdido en el sistema es el resultado de la diferencia entre las entradas (recarga) y la suma total de salidas (descarga, permisos REPDA). La ecuación del balance de acuerdo con la Ley de Conservación de las Masas es como sigue:

Recarga total – descarga total
= cambio de almacenamiento

Las entradas consideradas en el análisis fueron las recargas naturales constituidas por la recarga natural resultante de la infiltración de una parte del agua de lluvia precipitada en las partes altas y en el área del valle, así como las recargas horizontales por flujo horizontal subterráneo.

La recarga natural por lluvia fue calculada tomando en cuenta que una parte de la precipitación se evapora. Para determinar la evapotranspiración real (ETR) se utilizó la fórmula de Turc, la cual se puede observar en la ecuación (2). Esta ecuación fue seleccionada por su facilidad de uso y su relativa bondad en los resultados ofrecidos:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{.90 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}} \quad (2)$$

Donde:

P = precipitación en milímetros
$L = 300 + 25 * T + 0.05 * T^3$
T = temperatura en °C

La descarga del acuífero ocurre principalmente por el bombeo de los pozos de extracción de agua subterránea. En la zona de estudio no hay salidas por descargas naturales ni manantiales, por lo que las únicas salidas del sistema consideradas en el balance corresponden a los volúmenes concesionados por Conagua de los pozos ubicados en el área.

Para determinar el coeficiente de infiltración se dividió el volumen anual infiltrado entre el volumen anual promedio precipitado.

Definición de escenarios

Los escenarios utilizados en el modelo definieron de manera hipotética el impacto en las variables de la ecuación de balance hídrico. El *escenario base* fue construido con información histórica de temperatura media y precipitación mensual del periodo 1961-2000, seleccionando las celdas ubicadas en la zona de estudio. Los escenarios de cambio climático que se utilizaron correspondieron a los RCP 4.5 y 8.5, para el futuro cercano (2015-2039), de los cuales se emplearon los datos de temperatura media y precipitación mensual. También se crearon dos escenarios de adaptación bajo el supuesto de que el cambio climático ocurrirá de acuerdo

ISSN 0187-8336 •

con el escenario RCP 8.5. El primer escenario de adaptación (*riego eficiente*), corresponde a una disminución en las salidas de la ecuación debido a una disminución en la demanda agrícola gradual, resultado del cambio de sistema de riego (Lamm, Manges, Stone, Khan, & Rogers, 1995); el segundo escenario de adaptación (*plan hídrico*) considera el mismo cambio en la demanda hídrica por mayor eficiencia en los sistemas de riego, y considera además un incremento en el coeficiente de infiltración, el cual resulta de llevar a cabo una serie de actividades, que incluyen reforestación de sitios afectados por abandono e incendios; uso de cultivos de mayor eficiencia hídrica; rotación de cultivos; corresponsabilidad por parte de agricultores de riego, e introducción de nuevas actividades económicas, como turismo rural, y venta de productos alimenticios y artesanales autóctonos.

Calibración inicial del programa WEAP

Previo a la corrida del programa con los diferentes escenarios se calibró el programa mediante el ingreso de variables conocidas, cuya fuente de información fue el estudio de disponibilidad. Con dicha información se pudo corroborar que el comportamiento del modelo era compatible con los resultados esperados, lo que se consideró como el escenario base. La información está basada en los registros del Servicio Meteorológico Nacional y los datos del Censo de aprovechamientos.

Ingreso de variables al programa

En el cuadro 1 se muestran las variables ingresadas en el programa *WEAP*.

Resultados

Los resultados del modelo propuesto para al sistema de la zona de estudio muestran, tal y como se menciona en el estudio de disponibilidad de la Conagua para el acuífero Navidad-Potosí-Raíces, que existe un déficit en el volumen de agua que se está extrayendo del almacenamiento no renovable del sistema.

Almacenamiento del acuífero

En el caso de que las condiciones climáticas se mantuvieran igual que el *escenario base*, el almacenamiento en el sistema llegaría a cero para el mes de marzo del 2015, ocurriendo recarga solamente en los meses de agosto y septiembre, meses que presentan las mayores precipitaciones. El almacenamiento inicial es de 126.75 Mm^3.

El almacenamiento en el caso de los escenarios de cambio climático llega a nivel cero en diciembre de 2014 y este nivel se mantiene durante los años futuros considerados en el análisis. La recarga con el *riego eficiente* a través del tiempo no tiene efecto significativo, pues solamente en los meses de mayor precipitación (enero, agosto y septiembre) se puede tener recarga, alcanzando apenas 0.22 Mm^3 en promedio en el periodo de tiempo considerado futuro

Cuadro 1. Variables ingresadas al modelo en *WEAP*.

Escenario	Precipitación media (mm)	Temperatura media (°C)	ETR (mm)	Coeficiente de infiltración	Entradas (Mm^3/año)	Salidas (Mm^3/año)
Base (1961-2000)	428	18.05	413.98	0.0327	70.80	129.27
RCP 4.5	415.15	19.29	408.59	0.0158	49.78	129.27
RCP 8.5	415.54	19.42	409.40	0.0148	48.62	129.27
RCP 8.5 Riego eficiente	415.54	19.42	409.40	0.0148	48.62	97.86
RCP 8.5 Plan hídrico	415.54	19.42	409.40	Aumento gradual hasta llegar a 0.1	En aumento gradual	97.86

• ISSN 0187-8336

cercano. En el caso del *plan hídrico*, la recarga que comienza a presentarse a partir del año 2025 va aumentando anualmente, alcanzando en el último año (2039) un total de 134.45 Mm^3, lo que representa apenas alrededor de 10% de la capacidad total de acuífero.

Déficit de demanda o demanda no satisfecha

La cantidad de agua requerida para los distintos usos y que no se puede cubrir se conoce como demanda no satisfecha. En la figura 2 se muestra el efecto en este volumen de agua, considerando los escenarios de cambio climático y también los escenarios de adaptación.

En el *escenario base*, el volumen para 2015 de demanda no satisfecha es del orden de 40.05 Mm^3, el cual aumentaría a 50.68 Mm^3 en los años siguientes; en el escenario RCP 4.5, este volumen alcanza 79.43 Mm^3; en tanto que con el escenario RCP 8.5, llegaría a 80.59 Mm^3. En el caso de los escenarios de adaptación en el *riego eficiente*, este volumen manifestaría una reducción gradual a través del tiempo, hasta 2025, tiempo en el que se busca 100% de conversión de sistemas hasta alcanzar un volumen de 49.30 Mm^3, el cual se mantiene hasta el final del periodo analizado, quedando incluso por debajo del volumen del escenario actual. En caso de que se implemente un *plan hídrico*, la demanda no satisfecha disminuye de forma gradual y continua, alcanzando su mínimo volumen en 2035, a partir del cual este volumen es de sólo 11.07 Mm^3, superando a lo que se pudiera lograr con únicamente hacer el cambio de sistemas de riego.

En la figura 3 se muestra la variable de volumen de demanda no satisfecha para las tres zonas determinadas para el estudio y los tipos de usos analizados, encontrando que la región norte de la zona es la más afectada por la falta de agua y que este volumen afecta principalmente al uso agrícola, seguido de la región centro y sur.

El volumen de extracción de agua subterránea es mayor en la parte norte de la zona de estudio. Esto lo confirma el desplazamiento de los cultivos de riego manejados por parte de los agricultores con sistemas de riego. Según los antecedentes de la región, la sección norte de la zona de estudio es, en efecto, la que se encuentra en condiciones más afectadas por desertificación y abandono, como resultado de actividades agrícolas no sostenibles. La localidad de San Rafael y otras aledañas fueron las primeras a las que llegaron agricultores de modalidad intensiva a rentar grandes extensiones de terreno, modificando su condición de vegetación natural,

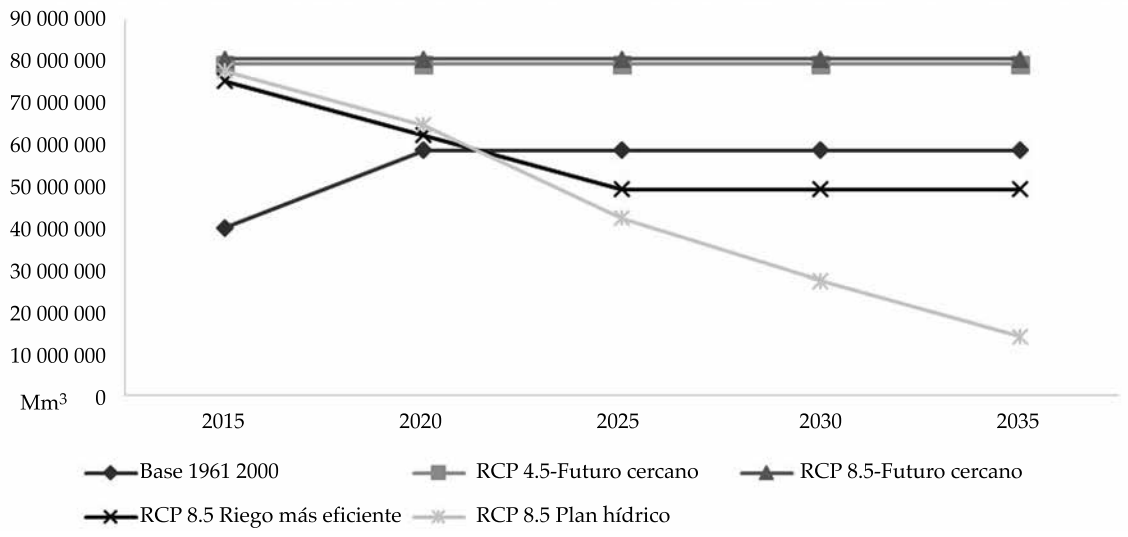

Figura 2. Resultados de la tendencia futura del "déficit de demanda" en los escenarios propuestos.

ISSN 0187-8336 •

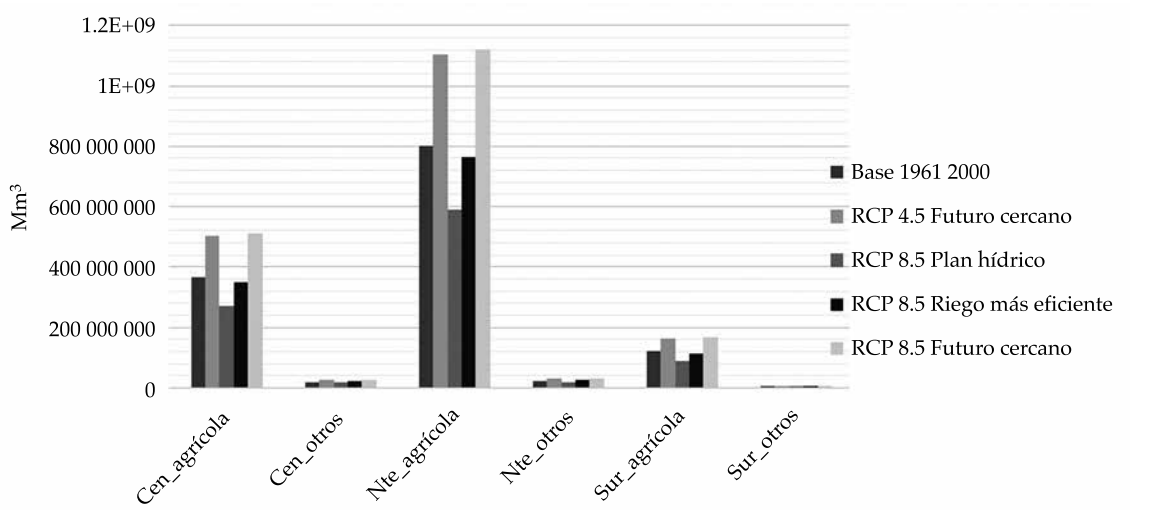

Figura 3. Déficit de demanda con escenarios propuestos en las tres regiones del Valle de Galeana.

estableciendo sistemas de riego tecnificado y, en muchos de los casos, fueron dejados por falta de agua y la búsqueda de nuevas zonas de cultivo, y se fue desplazando hacia el sureste.

Discusión

Considerando el escenario de adaptación *riego eficiente*, el cual toma en cuenta los cambios de precipitación y temperatura media del RCP 8.5 y un cambio en la demanda de recursos hídricos en la demanda de uso agrícola resultado de un cambio gradual, los resultados muestran que el almacenamiento del acuífero después de llegar a niveles de cero a fines de 2014 (antes que el escenario base), tendría un ligero aumento a partir de 2023 en el mes septiembre, con un volumen de 0.80 Mm^3; en 2026 se alcanza el máximo nivel de almacenamiento y se mantiene igual para el resto del tiempo analizado, con un volumen total de 3.11 Mm^3 anuales, siendo en los meses de junio, agosto y septiembre cuando se presentan volúmenes de recarga.

Con el escenario de adaptación *plan hídrico* después de llegar el almacenamiento a nivel cero (el considerado en el RCP 8.5), el volumen comienza a tener datos positivos a partir de 2023 en el mes de junio y agosto, con datos de 0.46 y 1.06 Mm^3. Como resultado de implementar las acciones de este plan, el almacenamiento del volumen muestra incrementos fluctuantes, alcanzando un nivel máximo en el año. Este almacenamiento fluctuante no permite la recarga en todo el año y los volúmenes de recarga son muy distintos en función de las épocas de lluvias. Los meses que al final del periodo analizado no muestran volúmenes de recarga son marzo y abril; en tanto que los meses con mayor impacto en la recarga son octubre y septiembre, con un volumen en el acuífero de 27 Mm^3, lo que representa 18.75% de la capacidad máxima de almacenaje en el sistema; sin embargo, este volumen disminuye de forma considerable para el mes de diciembre.

Conclusiones

El modelo elaborado para representar el sistema hidrológico del Valle de Galeana confirma lo que menciona el estudio de disponibilidad, pues en ambos existe un desbalance hidrológico, dado que el volumen de salidas es mayor respecto al volumen de las entradas, lo que no permite que el acuífero se recargue.

El impacto del cambio climático bajo los escenarios RCP 4.8 y 8.5 en el futuro cercano

(después de confirmar una disminución generalizada de la precipitación y aumento de entre 1-3°C con los modelos), en términos del balance hídrico, tendrá un impacto muy similar en el almacenamiento y entradas al sistema.

Con respecto al almacenamiento en el escenario base, será prácticamente nulo para el año 2015, logrando un bajo nivel de recarga para los años siguientes en los meses de agosto y septiembre de tan sólo 1.39 y 2.24 Mm^3, respectivamente, lo que representa el 0.96 y 1.5% en la recarga del sistema. Las condiciones de cambio climático representadas mediante los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 disminuyen a cero el nivel de almacenamiento.

Al parecer, la situación de la recarga del acuífero bajo escenarios de cambio climático empeora de modo crítico, situación que pudiera ser causa de abatimiento de los pozos que actualmente se encuentran abasteciendo la región; sin embargo, para tener certeza plena de lo anterior se deberá realizar un estudio minucioso que reduzca las incertidumbres del presente estudio, empezando por la actualización de la base de datos REPDA.

El hecho de implementar acciones que traten de alcanzar la sostenibilidad del sistema a través de un *plan hídrico* no garantiza la recarga constante, por lo que no se podría descansar el desarrollo social en actividades dependientes de manera crítica del agua subterránea.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Conacyt y al Centro del Agua para América Latina y el Caribe por el apoyo brindado para el desarrollo de la presente investigación, así como al personal de la Gerencia Técnica del Organismo de Cuenca Río Bravo por facilitar la información para la modelación hidrológica.

Referencias

Arnell, N., & Chunhen, L. E. (2001). Hydrologyand Water Resources (pp. 195-233). In: *Chapter 4 in Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability.* James, O. F., & McCarthley, J. (eds.). Cambridge: Ed. McCarthy.

Cavazos, T., Salinas, J., Martínez, B., Colorado, G., De Grau, P., Prieto-González, A., Conde, C., Quintanar, A., Santana, J., Romero, C., Maya, M., Rosario De La Cruz, J., Ayala, Ma., Carrillo, H., Santiesteban, O., & Bravo, M. (2013). Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional (150 pp.). *Informe Final del Proyecto al INECC.* Recuperado de http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html

Conagua (2009). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Navidad-Potosí-Raíces, estado de Nuevo León. Comisión Nacional del Agua, Comisión Técnica de Aguas Subterráneas, Gerencia de Aguas Subterráneas. *Diario Oficial de la Federación*, 20 de abril de 2015.

Hernández, M. E., & Valdez, G. (2004). Sequía meteorológica (pp. 316-325). En *Cambio climático: una visión desde México*. Martínez, J., & Fernández, A. (comps.). México, DF: Semarnat-INE.

Lamm, F., Manges, H., Stone, L., Khan, A., & Rogers, D. (1995). Water requirement of subsurface drip-irrigated corn in Northwest Kansas. *American Society of Agricultural Engineers*, *38*(2), 441-448.

Magaña, V., Méndez, J. M., Morales, M., & Millán, C. (2004). Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México (pp. 203-213). En *Cambio climático: una visión desde México*. Martínez, J., & Fernández, A. (comps.). México, DF: Semarnat-INE.

Martínez, P. F. (2007). *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos en México.* Jiutepec, México: IMTA, Semarnat.

Moss, R., Edmonds, J., Hibbard, K., Manning, M., Rose, S., Van Vuuren, D., Carter, T., Emori, M., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G., Mitchell, J., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S., Stouffer, R., Thomson, A., Weyant, J., & Wilbanks, T. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-755.

Oropeza, O. (2004). Evaluación de la vulnerabilidad a la desertificación (pp. 303-313). En *Cambio climático: una visión desde México*. Martínez, J., & Fernández, A. (comps.). México, DF: Semarnat-INE.

Ospina, J., Gay, C., Conde, C. & Sánchez-Torres, G. (2009). Analysis of the water supply-demand relationship in the Sinú-Caribe basin, Colombia, under different climate change scenarios. *Atmósfera*, *22*(4), 399-412.

Sánchez-Torres, G., Ospina, J., Gay, C. & Conde, C. (2011). Vulnerability of water resources to climate change scenarios. Impacts on the irrigation districts in the Guayalejo-Tamesí river basin, Tamaulipas, México. *Atmósfera*, *24*(1), 141-155.

Semarnap (1999). Resultados de la evaluación de la degradación del suelo en la República Mexicana. México, DF: Semarnap.

Suárez, J., Muñoz, H., Orozco, S., Sánchez, G., Ritter, W., Carreon, M., Muñoz, M., & Treviño J. M. (2009). Disponibilidad de agua y el cambio climático global en la subcuenca del río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Gestión Ambiental*, *18*, 49-61.

ISSN 0187-8336 •

Dirección institucional de los autores

M.C. Thania G. López García

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey
Programa Doctorado en Ciencias de Ingeniería-Especialidad en Sistemas Ambientales y Energía
Av. Eugenio Garza Sada 2501, Col. Tecnológico
64849 Monterrey, Nuevo León, México
Teléfono: +52 (81) 8358 2000
tglopez80@gmail.com

Dr. Mario G. Manzano
Dr. Aldo I. Ramírez

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey
Escuela de Ingeniería y Ciencias
Av. Eugenio Garza Sada 2501, Col. Tecnológico
64849 Monterrey, Nuevo León, México
Teléfono: +52 (81) 8358 2000
mario.manzano@itesm.mx
aldo.ramirez@itesm.mx