

DOI: 10.24850/j-tyca-2019-03-11

Notas

Estimación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del lago de Zirahuén Modeling water availability in Zirahuén Lake Basin

Mauricio José Ríos¹
Víctor Prado-Hernández²
Alejandro Romero-Bautista³
Delfino Reyes-López⁴
Fermín Pascual-Ramírez⁵

¹Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, mauricio.jose@unicach.mx

²Universidad Autónoma Chapingo, km. 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, Texcoco, Estado de México, vpradoh@chapingo.mx, ORCID http://orcid.org/0000-0001-6045-1661

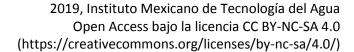
³Instituto Tecnológico del Valle de Morelia, carretera Morelia-Salamanca km. 6.5, Morelia, Michoacán, México, aromero@itvallemorelia.edu.mx, ORCID http://orcid.org/0000-0001-9490-9650

⁴Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla de los Ángeles, Puebla, México, delfino_reyes2001@yahoo.com.mx, ORCID http://orcid.org/0000-0002-8360-0567

⁵Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, fpascualr@iies.unam.mx, ORCID http://orcid.org/0000-0002-1005-9597

Autor para correspondencia: Fermín Pascual Ramírez, fpascualr@iies.unam.mx

Resumen





En la gestión del agua es fundamental conocer la disponibilidad hídrica al interior de las unidades de planeación y manejo hidrológico. En la cuenca del lago de Zirahuén, para mejorar el conocimiento de las variables del ciclo hidrológico, se empleó el modelo de simulación espaciotemporal en cuencas Soil-Water-Balance (SWB), apoyado en las características hidrodinámicas del suelo y cobertura, en conjunto con información climatológica diaria. Los resultados mostraron la influencia del uso del suelo en los escurrimientos y la recarga de acuíferos, que se reflejaron en la disponibilidad hídrica, la cual mostró retrocesos importantes con énfasis en el periodo 2009-2015. Al analizar los resultados con respecto a lo reportado en 2016, se encontró que el Índice de Aguas Subterráneas (IDAS) ha sido subestimado en 14.64%, en tanto que la Disponibilidad Relativa (DR) se ha subestimado por el 150% con respecto a los valores encontrados en este estudio. Finalmente, para mejorar la confiabilidad y la gestión del agua, se recomienda implementar estrategias de monitoreo de la cantidad, calidad y temporalidad del aqua para verificar los resultados obtenidos.

Palabras clave: gestión del agua, escurrimiento, agua subterránea, balance hídrico, uso del agua.

Abstract

In water management, it is essential to know the water availability within the hydrological planning and management units. To improve the knowledge of hydrological cycle variables in the Zirahuén Lake Basin we used the Soil-Water-Balance (SWB) spatiotemporal simulation model supported by the hydrodynamic characteristics of the soil and land cover, together with daily climatological information. Our results showed how land use influences runoff and recharge of aguifers reflecting in water availability estimates, which showed an important setback with an emphasis during the 2009-2015 period. When comparing our results with the official records reported in 2016, we found that the latter figures underestimated the groundwater index (GI) by 14.64% and the relative water availability index (RWAI) by 150% relative to the results of our study. We concluded that, to improve the reliability and management of water in the basin, it is recommend verifying our results by implementing strategies to monitor the quantity, quality, and temporality of water.



Keywords: Water management, runoff, groundwater, water balance, water use.

Recibido: 28/08/2017 Aceptado: 13/11/2018

Introducción

El agua y su disponibilidad constituyen la base del desarrollo de las sociedades, aunque su distribución adolece de relación con el crecimiento y expansión de la población, así como del desarrollo económico (Shiklomanov, 1998). La disponibilidad de agua renovable en México se presenta en proporción inversa con el desarrollo socioeconómico (Conagua, 2016a), generando zonas de mucha demanda sin información confiable sobre el funcionamiento del ciclo del agua.

El Balance Hídrico (BH) es el ejercicio de evaluación de los factores que intervienen en el ciclo del agua y existen métodos de cálculo desarrollados para diferentes escalas de observación (Sokolov & Chapman, 1974; Xu & Singh, 1998). El modelo Soil-Water Balance (SWB) (Dripps & Bradbury, 2007; Westenbroek, Kelson, Dripps, Hunt, & Bradbury, 2010), calcula los componentes del balance hídrico a nivel diario (Thornthwaite & Mather, 1957), aprovechando las ventajas de los Sistemas de Información Geográfica y calcula el balance hídrico espacial a nivel de la cuenca, requiere cinco variables: 1) precipitación y temperatura; 2) clasificación de uso de suelo y vegetación; 3) grupo hidrológico de suelo; 4) dirección de flujo, y 5) capacidad de retención de agua en el suelo. Realiza el cálculo de los escurrimientos utilizando el método de Curva Numérica del NRCS (NRCS, 1986). Se ha empleado con éxito en la estimación regional de la recarga de acuíferos subterráneos en la cuenca del lago Michigan y las cuencas de Wisconsin (Tillman, Gangopadhyay, & Pruitt, 2016).



Los análisis conjuntos de los elementos del balance hídrico y la demanda de agua comprometida permiten conocer la disponibilidad hídrica (Touhami *et al.*, 2014) que, en México, se estima utilizando la NOM-011-Conagua-2015 (Conagua, 2015), y sólo se pueden localizar de 2014 a la fecha con ausencia de información a diferentes épocas. Para mejorar la gestión del agua, ante la falta de información en el tiempo, los modelos de simulación permiten mejorar el conocimiento del balance hídrico (y disponibilidad) en cuencas; por ello, el objetivo de este trabajo fue emplear SWB en la estimación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del lago de Zirahuén a diferentes épocas y analizar los índices de disponibilidad con respecto a los registros oficiales reportados en 2016.

Materiales y métodos

El estudio se realizó utilizando la información geoespacial de la cuenca del lago de Zirahuén (19° 21' 09" y 19° 29' 50" N y, 101° 29' 11" y 101° 46' 21" O), en el estado de Michoacán de Ocampo (Figura 1); pertenece a la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico y la subprovincia Neovolcánica Tarasca (INEGI, 2001).



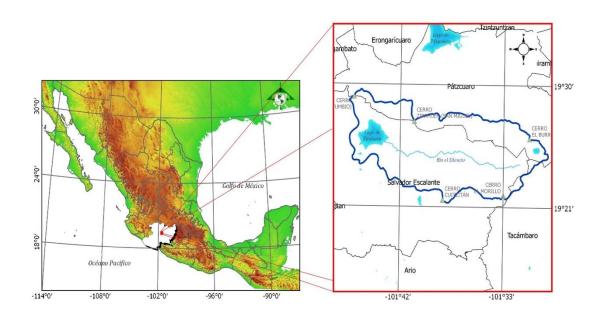


Figura 1. Ubicación de la cuenca del lago de Zirahuén.

Se tomó información de la carta topográfica a escala 1:50 000 (INEGI, 2014) para generar un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con resolución espacial de 100 m. Las coberturas de uso de suelo y vegetación (Tabla 1) fueron convertidas a matrices de datos de formato ráster ASCII a la misma resolución que el MDE, en el proceso de acondicionamiento de la información. Se utilizó una base de datos con información diaria de temperatura y precipitación, proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (Conagua) convertida a unidades inglesas.

Tabla 1. Síntesis de información utilizada.

		_	
Tipo	Formato	Versión	Escala
Topográfico	Vectorial	Serie III	1:50 000
Edafología	Vectorial	Serie II	1:250 000
Límite de cuenca	Vectorial	Edición 2	1:50 000
Uso de suelo y vegetación	Vectorial	Serie I, II, II, IV, V	1:250 000



Datos climatológicos	Tabular	2016	N/A

La evaluación de la variación espaciotemporal del balance hídrico se realizó para los años 1972, 1980, 1992, 2000, 2003, 2009 y 2015, con base en la fecha de publicación de cada serie de uso de suelo y vegetación, y la disponibilidad de registros climatológicos diarios. La evapotranspiración fue estimada utilizando datos de temperatura máxima y mínima (Hargreaves & Samani, 1985), considerando la disponibilidad de información meteorológica en los registros diarios.

Para calcular la disponibilidad hídrica (superficial y subterránea), se consultó la base de datos del Registro Público de Derechos del Agua (Repda) (Conagua, 216c), donde sólo se encontraron registros de volúmenes de descarga comprometidos del año 2000 en adelante, por lo que se hicieron los cálculos en periodo análogo. Para la descarga natural comprometida de aguas subterráneas se consideró el mismo valor (0.3 Mm³) que en el polígono del acuífero 'Nueva Italia', pues el área de la cuenca se encuentra comprendida en dicho polígono. En cuanto al volumen de retorno del agua superficial, se asumió un criterio conservador al considerar constante el valor más bajo encontrado (2015) para el volumen de retorno (1.45 Mm³).

El Índice de Aguas Subterráneas (IDAS) se calculó con base en los resultados obtenidos de la base de datos del Repda; en el Índice de Disponibilidad Relativa (DR) se utilizaron los datos reportados (Conagua, 2016b) en la cuenca, sustituyendo el valor del escurrimiento natural con la estimación encontrada en este trabajo.

En general, para el cálculo de la disponibilidad hídrica y los índices de disponibilidad (DR, IDAS) se procedió como lo marca la NOM-011-Conagua-2015. Los índices de disponibilidad (DR, IDAS) fueron calculados sólo para el año 2015 y comparados con los resultados oficiales reportado a principios de 2016 (Conagua, 2016b).

Las coberturas de uso de suelo fueron codificadas con base en la tabla de valores de referencia del modelo SWB (Westenbroek *et al.*, 2010), para convertirlas a formato ráster y generar mapas (Figura 2) sobre la dinámica del cambio de uso de suelo en los periodos de análisis.



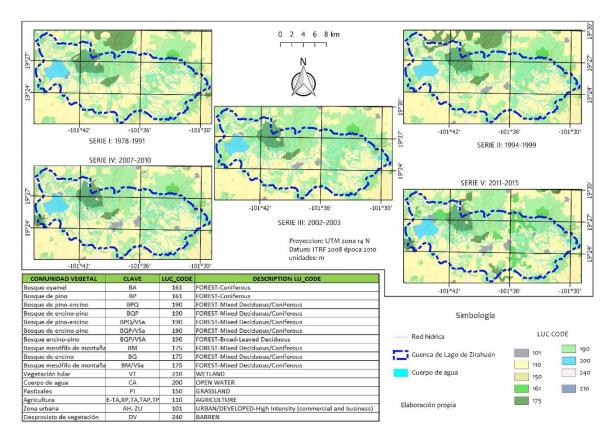


Figura 2. Cobertura de uso de suelo y vegetación codificados para SWB.

En la capa de unidades edafológicas y puntos de perfiles de suelos Serie II a escala 1:250 000 (INEGI, 2004), se identificaron cuatro unidades edáficas: andosoles, leptosoles, luvisoles y phaeozem. Con el cruce de la información de unidades edáficas y perfiles de suelo, se definieron tres clases texturales, una por grupo hidrológico (NRCS, 1986). Los suelos andosoles, de textura franco-arenosa, grupo hidrológico A con código 1; los leptosoles, textura franco-arcillosa-arenosa, grupo C y código 3; finalmente, luvisol y phaeozem, textura franco-arcillosa, grupo D, código 4.

Se utilizaron los valores de los componentes de la textura del suelo para asignar valores con base en las tablas de búsqueda por tipo de suelo (Thornthwaite & Mather, 1957). A los andosoles se les asignó el valor de 1.6; los leptosoles, 2.7, y luvisol y phaeozem, 3.



Resultados

Las láminas unitarias de recarga (Figura 3) muestran que los mayores valores se presentaron en los años 1992 y 2000, en tanto que los años 2009 y 2015, presentan los valores más bajos. La porción central norte con cobertura de bosques tiene bajos valores de recarga debido a las altas pendientes que registran por la presencia de las mayores elevaciones.

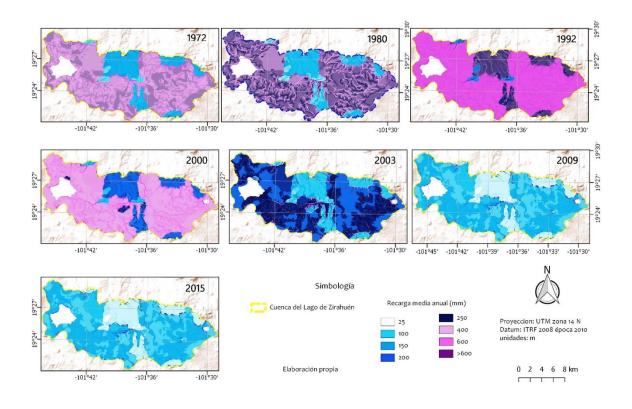


Figura 3. Distribución espacial y temporal de la recarga.



Los valores de precipitación de 1972 fueron similares a 2015, pero los valores de recarga son del orden de tres veces menor en 2015 que en 1972 (Tabla 2), mostrando los efectos del cambio de uso de suelo.

Tabla 2. Componentes del balance hídrico en lámina unitaria mm/año.

Año	Precipitación	Recarga	Intercepción	Escurrimiento	ETP potencial
1972	999.00	178.82	26.92	484.12	1 238.25
1980	1 219.60	156.46	27.18	596.90	1 771.65
1992	1 922.10	415.80	32.51	935.23	1 560.07
2000	1 406.00	206.76	31.24	681.74	1 695.70
2003	1 071.80	107.70	44.45	519.68	1 555.50
2009	958.89	53.09	43.18	465.58	1 613.15
2015	999.50	45.21	41.40	487.43	1 636.27

La disponibilidad hídrica en la cuenca (Tabla 3) es el resultado del análisis minucioso de la base de datos del REPDA. En la demanda de agua subterránea se observa incremento entre el periodo de 2009 a 2015 por el 284%, motivado por el aumento en los volúmenes requeridos por la agricultura, que en el periodo pasó de 0.1033 a 0.3975 Mm³. En cuanto a la demanda de agua superficial, el abastecimiento público registró incrementos de 40% entre 2009 y 2015. Estos resultados, muestran que se está intensificando la presión sobre el agua al interior de la cuenca.

Tabla 3. Disponibilidad hídrica en millones de m³/año.

Año	R	D1	DH1	E	D2	DH2
2000	56.52	0.10	56.12	186.36	0.75	187.06
2003	29.44	0.19	28.95	142.06	2.19	141.32
2009	14.51	0.18	14.03	127.27	2.44	126.29
2015	12.36	0.75	11.31	133.25	3.18	131.52

Nota: R, Recarga; D1, demanda/extracción subterránea; DH1, disponibilidad hídrica subterránea; E, escurrimiento; D2, demanda/extracción superficial; DH2, disponibilidad hídrica superficial.



Discusión

Las diferencias en las láminas de recarga se explican por el cambio de uso de suelo (Figura 2) en el área de bosques, pastizales y agricultura, que afectaron la tasa de recarga. Se ha encontrado que los cambios de uso forestal hacia la agricultura afectan la conservación de suelo y agua, así como en la disminución de las tasas de infiltración (Sun *et al.*, 2018). En cuencas degradadas, como medida correctiva, la rotación de cultivos reduce la erosión hasta en 69% (Abdelwahab, Bingner, Milillo, & Gentile, 2014); por otro lado, la conversión de cobertura forestal del suelo a tierras de cultivo (agrícola o de pastoreo) produce reducciones en el carbono orgánico en suelos minerales y carbono en las raíces finas (Mendoza-Vega, Karltun, & Olsson, 2003). El cambio de uso de suelo en escenarios de cambio climático disminuye en 19% la descarga anual de escurrimientos y el flujo máximo en el verano hasta de 45% (Pijl, Brauer, Sofia, Teuling, & Tarolli, 2018).

El acuífero "Nueva Italia" tiene un IDAS de 0.82 y se clasifica en la zona de disponibilidad 4, con suficiente volumen para satisfacer las demandas de agua comprometidas en 2016 (Conagua, 2016b). En los cálculos utilizando los resultados de la simulación (2015) se encontró IDAS de 0.94, 14.16% más que lo calculado en las cifras oficiales para todo el acuífero. Analizando los volúmenes concesionados en el periodo 2000-2015 (Tabla 3) hay tendencia lineal con pendiente negativa que indica disminución en la cantidad de agua disponible del acuífero subterráneo en el tiempo.

Respecto al agua superficial, en los resultados de la simulación se observa tendencia decreciente, con un mínimo en 2009; a pesar de la aparente recuperación en 2015, los valores están por debajo de lo que aconteció en 2000 y 2003. Las cifras oficiales indican DR en 0.92, en zona de disponibilidad 1; sustituyendo los volúmenes de escurrimiento de agua obtenidos con SWB (Tabla 3), se obtuvo la DR en 2.32; esto es, 150% más que en las cifras oficiales, para ubicarse en la zona de



disponibilidad 2, por lo que tiene volumen suficiente para satisfacer las necesidades actuales y un margen para las necesidades futuras.

Los valores de escurrimientos aquí calculados (133.246 Mm³ en 2015), son muy distantes de los considerados por Conagua (52.16 Mm³) en la determinación de la disponibilidad, y se ha subestimado la capacidad de la cuenca, por lo que la disponibilidad de agua es de 78.755 Mm³. Estas diferencias se deben principalmente al método utilizado para la estimación del escurrimiento; Conagua utiliza el método racional con resultados a nivel anual; SWB emplea el método de curva numérica en una solución geoespacial, considerando las particularidades de la topografía, así como el tipo y la cobertura del suelo, con lo que obtiene resultados del balance hídrico diario. Las diferencias en la temporalidad del cálculo permiten mayor sensibilidad en los resultados. En ambos procesos se obtiene información sobre la cantidad, dejando de lado las consideraciones en cuanto a la calidad del agua.

A pesar de contar con una modelación más fina, los alcances de este trabajo no se han verificado con aforos, pues hasta la fecha existe un vacío de información al respecto; de igual manera, la información sobre calidad del agua y distribución temporal es deficiente. SWB ha probado su utilidad en la simulación del ciclo hidrológico con resultados importantes en Estados Unidos de Norteamérica (Tillman *et al.*, 2016; Zhang, Felzer, & Troy, 2016), con variaciones de ±33 mm al año en la estimación de la recarga; se ha encontrado alta confianza en los resultados de la modelación, a escala regional, cuando se utilizan datos a resolución mensual y anual (Han *et al.*, 2018). Los estudios sobre la aplicación del modelo SWB dan cuenta de su utilidad como herramienta para apoyar los procesos de gestión del agua en cuencas.

Conclusiones

El uso del modelo SWB permitió realizar estimaciones del balance hídrico con buena aproximación en los flujos subterráneos y distantes en el flujo superficial del agua. Los análisis con respecto a la disponibilidad hídrica permitieron ajustar los valores de IDAS en 14.92% por encima



de las cifras oficiales y la DR en 150% más sobre lo oficial, como resultado de considerar las características biofísicas de la cuenca y la precipitación a resolución temporal diaria. Aunque la literatura reporta la utilidad de SWB en la estimación de la recarga, los resultados mostraron la urgente necesidad de implementar en la cuenca del lago de Zirahuén instrumentos y/o estrategias para el monitoreo de cantidad, calidad y temporalidad del agua para facilitar el proceso de gestión.

Agradecimientos

Al Proyecto 6331 del II de la UNAM y al Proyecto PDCPN-2015-640. Se agradece el apoyo en el desarrollo y la revisión de resultados a la M. C. Rosalva Mendoza Ramírez del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Referencias

- Abdelwahab, O. M. M., Bingner, R. L., Milillo, F., & Gentile, F. (2014). Effectiveness of alternative management scenarios on the sediment load in a Mediterranean agricultural watershed. *Journal of Agricultural Engineering*, 45(3), 125. DOI: 10.4081/jae.2014.430
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2015). NOM-011-COAGUA-2015, Conservación del Recurso Agua. México, DF, México: Comisión Nacional del Agua.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2016a). Estadísticas del agua en México, edición 2016. Reporte. México, DF, México: Comisión Nacional del Agua.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2016b). Acuerdo por el que se dan a conocer las zonas de disponibilidad que corresponden a las cuencas y acuíferos del país para el ejercicio fiscal 2016. México, DF, México: Comisión Nacional del Agua.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2016c). Registro Público de Derecho del Agua (Repda). México, DF, México: Comisión Nacional del Agua.
- Dripps, W. R., & Bradbury, K. R. (2007). A simple daily soil-water balance model for estimating the spatial and temporal distribution of groundwater recharge in temperate humid areas. *Hydrogeology*



- Journal, 15(3), 433-444. DOI: 10.1007/s10040-007-0160-6
- Han, W. S., Graham, J. P., Choung, S., Park, E., Choi, W., & Kim, Y. S. (2018). Local-scale variability in groundwater resources: Cedar Creek Watershed, Wisconsin, USA. *Journal of Hydro-Environment Research*, 20(April), 38-51. DOI: 10.1016/j.jher.2018.04.007
- Hargreaves, G., & Samani, Z. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. DOI: 10.13031/2013.26773
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2001). *Conjunto de datos vectoriales fisiográficos. Escala 1:1,000,000. Serie I.*Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2004). *Guía para la interpretación de cartografía: Edafología*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2014). *Conjunto de datos vectoriales topográficos. Escala 1:50,000. Serie III.*Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Mendoza-Vega, J., Karltun, E., & Olsson, M. (2003). Estimations of amounts of soil organic carbon and fine root carbon in land use and land cover classes, and soil types of Chiapas highlands, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 177(1-3), 191-206. DOI: 10.1016/S0378-1127(02)00439-5
- NRCS, Natural Resource Conservation Service. (1986). *Urban Hydrology* for Small Watersheds TR-55. USDA Natural Resource Conservation Service Conservation, Engeneering Division Technical Release 55. Recuperado de https://doi.org/Technical Release 55
- Pijl, A., Brauer, C. C., Sofia, G., Teuling, A. J., & Tarolli, P. (2018). Hydrologic impacts of changing land use and climate in the Veneto lowlands of Italy. *Anthropocene*, 22, 20-30. DOI: 10.1016/j.ancene.2018.04.001
- Shiklomanov, I. A. (1998). World water resources- A new appraisal and assessment for the 21st century. Report. DOI: 10.4314/wsa.v30i4.5101
- Sokolov, A., & Chapman, V. (1974). Methods for water balance computations. An international guide for research and practice.



- The UNESCO Press, 23. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Sun, D., Yang, H., Guan, D., Yang, M., Wu, J., Yuan, F., Jin, C., Wang, A., & Zhang, Y. (2018). The effects of land use change on soil infiltration capacity in China: A meta-analysis. Science of the Total Environment, 626, 1394-1401. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.104
- Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. *Publications in Climatology*, 10(3), 185-311.
- Tillman, F. D., Gangopadhyay, S., & Pruitt, T. (2016). Changes in groundwater recharge under projected climate in the upper Colorado River basin. *Geophysical Research Letters*, 6968-6974. DOI: 10.1002/2016GL069714
- Touhami, I., Andreu, J. M., Chirino, E., Sánchez, J. R., Pulido-Bosch, A., Martínez-Santos, P., Moutahir, H., & Bellot, J. (2014). Performances comparées de modéles de bilan hydrique des sols pour le calcul de la recharge d'aquifères en conditions semi-arides. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 193-203. DOI: 10.1080/02626667.2013.802094
- Westenbroek, M. S., Kelson, V. A., Dripps, W. R., Hunt, R. J., & Bradbury, K. R. (2010). SWB A modified Thornthwaite-mather soil-water-balance code for estimating groundwater recharge. *US Geological Survey Techniques and Methods*, 6-A31. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004
- Xu, C., & Singh, V. P. (1998). A review on monthly water balance models for water resources investigations. *Water Resources Management*, 12(1), 31-50.
- Zhang, J., Felzer, B. S., & Troy, T. J. (2016). Extreme precipitation drives groundwater recharge: The Northern High Plains Aquifer, central United States, 1950–2010. *Hydrological Processes*, 30(14), 2533-2545. DOI: 10.1002/hyp.10809