



MEMORIA
XIV Congreso Geológico de América Central &
VII Congreso Geológico Nacional
San José - Costa Rica, 2022



Balance hídrico del Área Metropolitana de San Salvador con escenarios de cambio climático

José Alexander Chávez^a *, Ingrid Alfaro^b, Marcia Barrera-de-Calderón^b, César Alvarado^c,
Efraín Alas^a, Sara Cornejo^a, Mauricio Vásquez^a

^aOficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador, San Salvador, El Salvador

^bEscuela de Posgrado y Educación Continua, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador, El Salvador.

^cEscuela de Física, Facultad de Matemáticas y Ciencias Naturales, Universidad de El Salvador, El Salvador.

Abstract: Groundwater recharge is vital for hydrologic cycle management, mainly in urban areas. In order to contribute to sustainable water management in the Metropolitan Area of San Salvador, spatial and temporal annual groundwater recharge was estimated using a modified Thornthwaite- Matter daily soil water balance for a ten-year period (2009-2018). Furthermore, four Climate Change Scenarios: RCP4.5 and RCP8.5, periods 2030-2059 and 2070-2099 were adopted to predict probable changes in the future. Results show the high spatial and temporal variability in the study zone with an average of 366 mm/a for the period. Moreover, due climate change a reduction in recharge from 20-60% is expected for the worst scenario (RCP8.5 2070-2099).

Palabras clave: recarga agua subterránea, SWB 2.0, ciclo hidrológico, infiltración, permeabilidad

Key words: groundwater recharge, SWB 2.0, hydrologic cycle, infiltration, permeability.

Introducción

Considerando la importancia del agua como elemento fundamental para la vida y el desarrollo de la población, se ha elaborado en el marco del programa EUROCLIMA+ un balance hídrico con enfoque de cambio climático para el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) como parte del proyecto “Inciendiando en gestión de ciclo hidrológico con enfoque en aguas subterráneas para adaptación al cambio climático en Área Metropolitana de San Salvador”. El ciclo hidrológico es considerado un continuo intercambio de agua entre la litósfera, la atmósfera y la biósfera.

De particular importancia se vuelve el estudio del balance de agua en cuencas urbanas, donde el abastecimiento de agua depende de la ocurrencia de este recurso en la misma cuenca. El fundamento del balance hídrico está en la ley de conservación de la masa [1]. Consiste en la contabilización de las entradas y salidas, cuya diferencia iguala el cambio en el almacenamiento de un sistema hidrológico para un período de tiempo determinado [2], como, por ejemplo, un acuífero, una cuenca o una subcuenca, e incluso un área de estudio como el AMSS.

El Balance Hídrico del AMSS ha sido desarrollado a partir de datos históricos de clima diario que comprende el período entre los años 2009 y 2018 y ha tomado en cuenta los mapas de uso de suelo, tipos y texturas de suelos,

*Autor para contacto: alex.chavez@opamss.org.sv

geología, hidrogeología y pendientes más actualizados de que se dispone, su análisis se considera representativo de las condiciones actuales. Asimismo, se ha elaborado el balance hídrico tomando en cuenta escenarios de cambio climático que incluyen las trayectorias de concentración representativas RCP4.5 y RCP8.5.

Uno de los términos del balance hídrico más complejos de estimar es la recarga de agua subterránea [1], especialmente cuando el conocimiento del funcionamiento del acuífero es limitado o incierto y se requiere cuantificar su variabilidad espacial y temporal. Con frecuencia los modeladores, planificadores y diseñadores de políticas para el manejo de acuíferos, obvian la variabilidad de la recarga y asumen un valor promedio para toda la cuenca, la cual es estimada como una fracción de la precipitación o es ajustada como parámetro de calibración en un modelo de simulación numérica [3]. Este tipo de estimaciones son útiles, sin embargo, cuando el fin es la planificación urbana, es de suma importancia que se conozca, además, la variabilidad espacial y temporal de dicho parámetro.

Materiales y Metodología

En climas húmedos como el del AMSS y en general, El Salvador, se utiliza con frecuencia el Balance de Humedad de Suelo para determinar la recarga hídrica potencial, debido a su amplio espectro de aplicación temporal y espacial [1]. En el AMSS, los antecedentes de estudios de Balances Hídricos indican que el método ha sido utilizado en distintas ocasiones, en general en una base de cálculo de lluvia mensual multianual. Con el objetivo de tomar en cuenta la variabilidad espacial y temporal de la recarga de agua subterránea, se usó el Software desarrollado por la USGS para el cálculo de la recarga hídrica potencial SWB 2.0 [4]. El SWB 2.0 es un modelo determinístico, quasi tridimensional basado en datos físicos del suelo y climáticos para la zona de estudio [3], el cual utiliza el método de Thornthwaite – Matter modificado para tener en cuenta el cambio en la humedad de suelo en una base diaria [5]. El SWB está integrado por tres reservorios que almacenan agua: nieve, interceptación y suelo. Para el caso de climas tropicales, el reservorio de nieve no es considerado; mientras que el reservorio de interceptación acumula agua interceptada diariamente por el dosel de los árboles y la vegetación, previo a su contacto con el suelo. Luego de extraer el agua interceptada del total de lluvia, se procede al cálculo de la escorrentía superficial, la cual se calcula mediante el método del Número de Curva del Natural Resources Conservation Service (CN).

La variación diaria en la humedad del suelo es modelada en el reservorio de suelo para el dominio del modelo discretizado mediante celdas de 20 m de lado de un ráster con profundidad igual a la zona radicular utilizando la ecuación de entradas (lluvias, mm), sumándole humedad del suelo en el día previo a la simulación en mm, menos la interceptación de la vegetación (mm), escorrentía superficial (mm), evapotranspiración real (mm). En esta ecuación se consideran los ingresos y salidas de humedad al reservorio, asimismo, es considerada la humedad del día antecedente mencionada anteriormente como una condición inicial para el día de simulación. Para el modelo de balance hídrico del AMSS se consideró el método de la Cubeta que asume que antes de que la precipitación alcance el suelo, un porcentaje constante de ella es atrapada en el dosel del árbol o en la vegetación, dejando ver que, para lluvias de baja intensidad, si el porcentaje necesario para alcanzar el suelo no es superado, toda la lluvia será interceptada.

En el SWB es posible utilizar los cuatro grupos hidrológicos de suelo estandarizados y utilizados en el medio salvadoreño (A, B, C y D) en un rango continuo que va de suelos que parte del grupo A, (suelos porosos de alta capacidad de infiltración), al grupo D (suelos de textura fina de baja capacidad de infiltración). El cálculo de la humedad del suelo para cada día de simulación en cada celda del modelo requiere de un conjunto de ráster diarios de lluvia, ráster diarios de temperatura máxima y mínima, dirección de drenaje superficial, así como uso y textura del suelo para los módulos de escorrentía, evapotranspiración e interceptación, según el caso. Asimismo, se requiere el ráster de textura y uso de suelo, los cuales se utilizan para el cálculo de la capacidad total de agua disponible. Para la evapotranspiración potencial o de referencia se usó el método de Hargreaves-Samani, por ser un método anteriormente utilizado en estudios previos del país para la determinación de la evapotranspiración de referencia.

Para la elaboración del balance hídrico tomando en cuenta las proyecciones de desarrollo urbano en el AMSS y escenarios de cambio climático que evaluó las trayectorias de concentración representativas RCP4.5 y RCP8.5 para 2 períodos, uno de mediano plazo 2030-2059 y otro de largo plazo 2070-2099, cuyos datos climáticos corresponden a las proyecciones reportadas en la Tercera Comunicación de Cambio Climático de El Salvador [6].

Resultados y Análisis

Los resultados del SWB permitieron la obtención del mapa de recarga hídrica potencial en el AMSS, que se presenta en la Figura 1 como un promedio del período comprendido entre los años 2009-2018. La variabilidad espacial de la recarga hídrica potencial muestra, por un lado, la importante contribución que tienen el volcán de San Salvador y el Cerro de San Jacinto a la recarga de agua subterránea en acuífero de San Salvador, del cual depende gran parte de la población. Por otro lado, destaca la baja recarga de las zonas urbanas, siendo contrario a la escorrentía, que resultó mucho mayor en este sector.

En promedio, para el período 2009-2018 la recarga potencial media de agua subterránea fue de 366 mm/a, los cuales representan el 19.1% de la precipitación. Por su parte la evapotranspiración real contabiliza en promedio 882 mm/a (46.4% de la precipitación) y la escorrentía superficial totaliza 435 mm/a (22.9%), los cuales junto a la intercepción de 194 mm/a (10.2% de la precipitación), suman 629 mm/a (33.1%). Las mayores precipitaciones se presentan en el volcán de San Salvador, superando en general los 2000 mm. Las mayores tasas de evapotranspiración real ocurren al norte y al sur de la cuenca, siendo coincidentes con las zonas más calientes, con más precipitación y de mayor evapotranspiración potencial. Adicionalmente, la variabilidad espacial de la escorrentía mostró la clara diferencia entre la zona urbana densamente desarrollada y la zona sin desarrollar o con nivel de desarrollo bajo. La recarga de agua subterránea es fuertemente sensible a la precipitación, este comportamiento es observable a partir de los resultados obtenidos para el período 2009-2018, en el cual ocurrieron una serie de años extremos hidrológicos: secos y lluviosos.

Figura 2. Recarga Acuífera más desfavorable, escenario RCP8.5 (2070-209) para el Área Metropolitana de San Salvador.

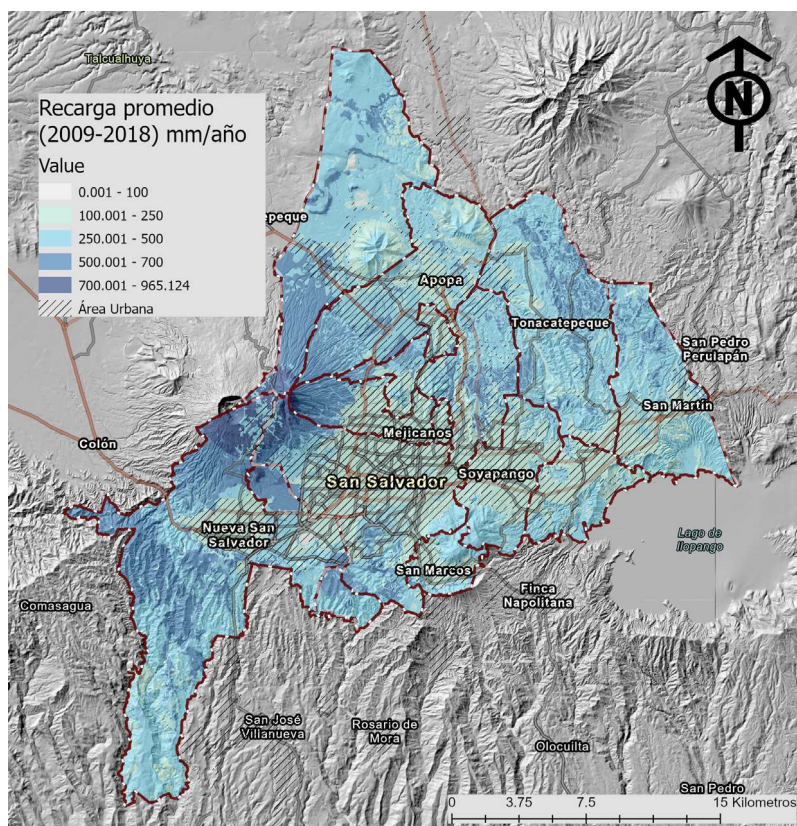
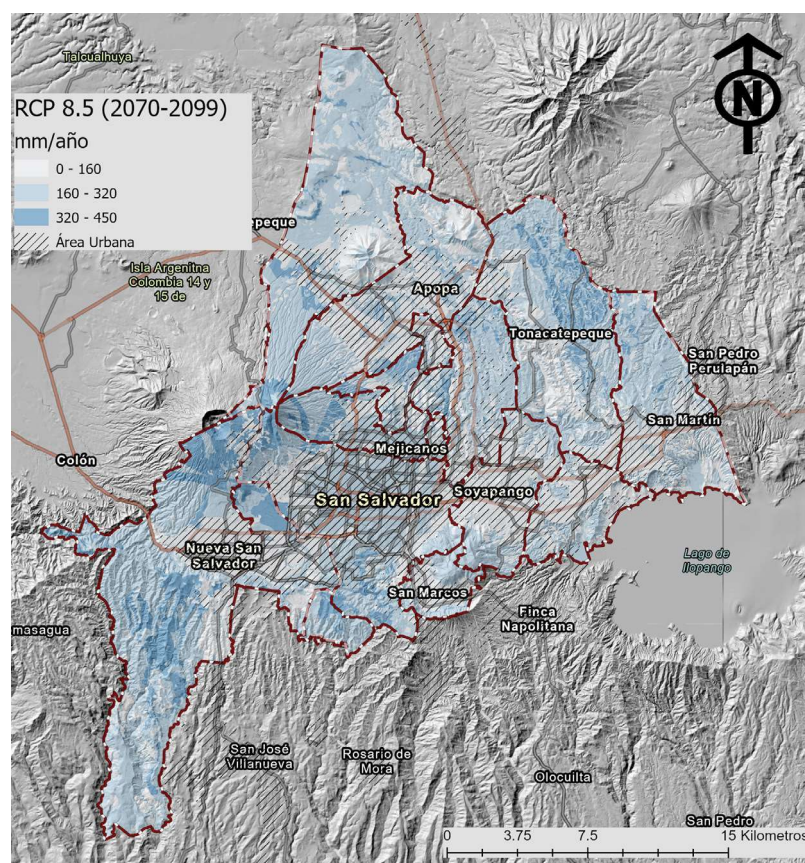


Figura 1. Recarga Acuífera promedio (2009-2018) para el AMSS, mostrando el área urbana (achurado).



Conclusiones

La variabilidad temporal y espacial que presentó la recarga de agua subterránea en el AMSS osciló entre 238 y 555 mm/a, mostrando su fuerte dependencia de la precipitación. Así, en los años más húmedos como 2010 y 2011, la recarga presentó valores máximos, lo cual a su vez se reflejó en ascensos en el nivel piezométrico de los pozos de monitoreo del AMSS. Mientras que en años secos como 2015, 2016 y 2017 (una de las mayores sequías de los últimos tiempos), la recarga resultó en valores mínimos, coincidiendo con los descensos en los niveles piezométricos de los mencionados pozos. Esta fuerte variabilidad de la recarga de agua subterránea, expone el gran valor que posee este recurso para enfrentar la variabilidad climática del AMSS, tal y como es reconocido a nivel mundial.

Los resultados de las proyecciones climáticas del balance hídrico del AMSS, indican reducción en todos sus componentes, lo cual es razonable considerando que se prevén reducciones de la precipitación que varían entre 14% bajo el escenario RCP4.5 para 2030-2059 y de 23% en el escenario RCP8.5 para el período 2070-2099. Los resultados indican que para el RCP4.5 en ambos períodos y para el RCP8.5 en el período 2070-2099, en la zona urbana, se tendrán las mayores variaciones, predominando los rangos de reducción de recarga entre 20% y 40%, mientras que en el volcán de San Salvador y zonas vegetadas perimetrales al AMSS, las reducciones podrían oscilar entre 20% y 60% dependiendo de la distribución de la lluvia en el año.

Referencias bibliográficas

1. Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 18-39.
2. Alley, W. M., La Baugh, J. W., & Reilly, T. E. (2005). Groundwater as an Element in the Hydrological Cycle. En M. G. Anderson & J. J. McDonnell (Eds.), *Encyclopedia of Hydrological Sciences* (p. hsa153). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa153>
3. Dripps, W. R., & Bradbury, K. R. (2009). The spatial and temporal variability of groundwater recharge in a forested basin in northern Wisconsin. *Hydrological Processes*, 24(4), 383-392. <https://doi.org/10.1002/hyp.7497>
4. Westenbroek, S. M., Engott, J. A., Kelson, V. A., & Hunt, R. J. (2018). SWB Version 2.0—A soil-water-balance code for estimating net infiltration and other water-budget components (Report N.o 6-A59; Techniques and Methods). *USGS Publications Warehouse*. <https://doi.org/10.3133/tm6A59>
5. Barrera-de-Calderón, M., Garfias, J., Martel, R., & Salas-García, J. (2021). Estimación de la distribución espacio temporal de la recarga de agua subterránea en regiones húmedas con clima tropical. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-02-07>
6. MARN. (2018). Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (p. 203) San Salvador, El Salvador: Gobierno de El Salvador.