

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO Y VARIABILIDAD CLIMÁTICOS EN LA OFERTA HÍDRICA DE LA PRINCIPAL CUENCA ABASTECEDORA DEL SISTEMA CHINGAZA POR MEDIO DE UN MODELO SWAT

Autora: Danna Lorena Fuquene Garcia¹ – dlfuqueneg@udistrital.edu.co

Docente director: José Alberto Figueroa Fernández

Semillero de Investigación Agua y territorio (AGUAYTER)

RESUMEN DE TRABAJO DE GRADO

Los desafíos crecientes asociados al cambio climático han centrado la atención mundial en sus efectos sobre el recurso hídrico, pues el agua es el medio a través del cual la sociedad percibe muchos de los impactos de la crisis climática (UNESCO & ONU-Agua, 2020). En consecuencia, se ha generado una creciente necesidad de comprender los sistemas socioecológicos de las cuencas hidrográficas como proveedores de servicios esenciales para el bienestar humano (Perdinan et al., 2024). A nivel global, se estima que cerca del 40 % de la población vive en cuencas de ríos que nacen en regiones montañosas (Beniston, 2003). En estos territorios, el recurso hídrico es altamente valorado por las comunidades debido a su calidad y a sus múltiples usos domésticos,

industriales, agrícolas, recreativos y para la generación de energía hidroeléctrica (Buytaert et al., 2006). La principal cuenca abastecedora del Sistema Chingaza se encuentra en la cuenca alta del río Guatiquía, ubicada en el páramo de Chingaza, comprendiendo la principal cuenca abastecedora de la infraestructura de abastecimiento y almacenamiento denominado Sistema Chingaza por la Empresa de Acueducto de Bogotá. Este sistema sigue operando desde 1983 como la principal fuente de abastecimiento de agua de la ciudad de Bogotá en al menos un 70 % (Autoridad Nacional de Licenciamiento Ambiental, 2021). El trasvase de aguas, la disminución de los niveles de los embalses y los cambios en los patrones de precipitación

¹ Doctorado en Ambiente e Ingeniería Sustentable, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

amenazan la sostenibilidad de este recurso hídrico. Comprender este sistema es crucial para tomar decisiones informadas sobre la gestión del recurso hídrico y para promover un desarrollo sostenible en la cuenca. En ese sentido, el presente estudio tiene como objetivo principal analizar la influencia del cambio y variabilidad climáticos sobre la oferta hídrica superficial de la principal cuenca abastecedora del Sistema Chingaza. El análisis y tratamiento estadístico de datos hidrometeorológicos constituyó la fase inicial de esta investigación, abarcando un período de 36 años (1988- 2023). Se recopilaron datos diarios de precipitación, caudal y temperatura, provenientes de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). La imputación de datos faltantes se realizó mediante el método MissForest para precipitación y caudal. Para temperatura se aplicó la imputación de medias. Se aplicaron métodos de análisis de consistencia de datos, con el fin de detectar y corregir datos atípicos.

La modelación hidrológica de la cuenca se llevó a cabo utilizando el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT). La implementación del modelo requirió la delimitación precisa del área de estudio a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM); la generación de Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) a partir de datos de suelos, uso del suelo y pendientes; y, la calibración y validación del modelo mediante el programa SWAT-CUP4, evaluando su rendimiento con el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) y el sesgo porcentual (PBIAS). Posteriormente se examinó la influencia del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) en las variables hidrometeorológicas, y se identificaron puntos de cambio significativos en la precipitación mediante las pruebas estadísticas de Pettitt, Fligner-Killeen, Kruskal-Wallis y Dunn-Bonferroni, y, Mann-Kendall y Sen's Slope. La caracterización espacio-temporal del caudal y la precipitación históricas, junto con la generación de escenarios de cambio

climático a partir de modelos climáticos del CMIP6, permitió proyectar el comportamiento futuro de la oferta hídrica en la cuenca. La reducción de escala y corrección de sesgo de los datos de los modelos climáticos, utilizando métodos como Quantile mapping y Variance Scaling, aseguró la adaptación de los escenarios a las condiciones locales. El modelo SWAT permitió modelar y delimitar adecuadamente la cuenca en estudio, con resultados de calibración y validación de los caudales del Río Chuza y Río Guatiquía que oscilaron entre una modelación buena ($NSE=0.74$) y muy buena ($NSE=0.91$). El análisis de variabilidad climática reveló que el régimen de precipitaciones de la principal cuenca abastecedora del Sistema Chingaza está fuertemente influenciado por las fases del fenómeno ENSO. Se demostró estadísticamente que existen diferencias significativas en la distribución de las lluvias entre las distintas fases, pero no en la cantidad de lluvias multianuales. Durante los eventos de El Niño, se observa una disminución del 4,11%

en las precipitaciones, especialmente en los meses secos (diciembre-marzo), mientras que La Niña provoca una reducción del 2,13% en los meses más lluviosos (junio-julio). La estacionalidad de los caudales, con picos en época de lluvias y mínimos en época seca, está estrechamente ligada a la estacionalidad de las precipitaciones en ambas cuencas. En el río Chuza, la fase Niña incrementa los caudales en un 4.36% y El Niño en un 11.83% respecto a la fase Neutra, sugiriendo precipitaciones que intensifican la escorrentía superficial. En contraste, en el río Guatiquía, la fase Niña disminuye el caudal en un 10.96% y El Niño en un 4.12%, debido a reducciones significativas en la época de mayores picos de caudal, especialmente en julio durante la fase Niña. La estacionalidad de los caudales muestra una tendencia significativa decreciente posiblemente vinculada al cambio climático. En cuanto al cambio climático, los escenarios SSP2-4.5 (mitigación intermedia) y SSP5-8.5 (alta emisión) proyectan para el

período 2024–2100 reducciones progresivas y significativas en la oferta hídrica. Se estima una disminución de la precipitación media anual de entre 10,85 % y 14,75 % bajo SSP2-4.5, y entre 19,47 % y 24,75 % bajo SSP5-8.5. Dichas reducciones impactan directamente en los caudales de los principales ríos: el río Chuza podría experimentar descensos de 10,69 % a 42,87 %, mientras que el río Guatiquía presentaría reducciones de 11,20 % a 39,67 %, dependiendo del escenario. Estos resultados evidencian un riesgo creciente hacia finales del siglo XXI, donde incluso bajo un escenario de mitigación intermedia se proyectan impactos considerables sobre la disponibilidad hídrica. Se concluyó que el modelo SWAT demuestra ser una herramienta efectiva para simular la hidrología de la cuenca, aunque con limitaciones en la representación de procesos hidrológicos y antrópicos. Además, la influencia del fenómeno ENSO en el área de estudio difiere del comportamiento generalizado de las precipitaciones en la región andina. Finalmente, los hallazgos confirman

que la variabilidad climática histórica y el cambio climático proyectado a largo plazo representan riesgos complementarios y significativos para la sostenibilidad del abastecimiento de agua del Sistema Chingaza, lo que subraya la necesidad de fortalecer estrategias de gestión, adaptación y planificación del recurso hídrico en la región frente a diferentes trayectorias climáticas futuras.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los amigos que hice en el camino, a todos los compañeros y profesores que conocí en esta vivencia universitaria. Al profesor Rodolfo Franco y Alberto Figueroa por su guía, enseñanza y mentoría en la realización de la presente investigación. Al profesor Fernando Ortiz por aportar en cultivar mi interés por el estudio del recurso hídrico. Finalmente, quiero extender el agradecimiento a mis padres Rosa García y Oscar Fúquene y a mis hermanos Camilo y Andrés Fúquene por siempre creer en mí y apoyarme en toda mi formación académica y

personal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (2021, 7 abril). Reporte regional Ríos Metica, Guatiquía, Guayuriba y Negro. ArcGIS StoryMaps.<https://storymaps.arcgis.com/stories/47bcd8331b2049a5894a428aadb2d426>
- Beniston, M. (2003). *Climatic Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts*. *Climatic Change* 59, 5–31. <https://doi.org/10.1023/A:1024458411589>
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). *Human impact on the hydrology of the Andean páramos*. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Perdinan, Tjahjono, R. E. P., Infracwan, D. y. D., Aprilia, S., Adi, R. F., Basit, R. A., Wibowo, A., Kardono, & Wijanarko, K. (2024). *Translation of International Frameworks and National Policies on Climate Change, Land Degradation, and Biodiversity to Develop Integrated Risk Assessment for Watershed Management in Indonesia*. *Watershed Ecology And The Environment*, 6, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2023.10.001>
- UNESCO, ONU-Agua, (2020). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático*, París, UNESCO