

OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL DEL HUMEDAL EL GALLINAZO, UBICADO EN AGUACHICA-COLOMBIA



SUPPLY OF SURFACE WATER IN “EL GALLINAZO” WETLAND, LOCATED ON AGUACHICA-COLOMBIA

Saldaña-Escorcía, Rossember; Otalvarez Herrera, Rosana; Herrera Galviz, Juan David

Rossember Saldaña-Escorcía

rsaldanae@unicesar.edu.co

Universidad Popular del Cesar seccional Aguachica, Colombia

Rosana Otalvarez Herrera

rotalvarez@unicesar.edu.co

Universidad Popular del Cesar seccional Aguachica, Colombia

Juan David Herrera Galviz

jdherreralgalviz@unicesar.edu.co

Universidad Autónoma de Manizales, Antigua Estación del Ferrocarril, Manizales – Caldas, Colombia

Revista de Investigación Agraria y Ambiental

Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia

ISSN: 2145-6097

ISSN-e: 2145-6453

Periodicidad: Semestral

vol. 14, núm. 1, 2023

riaa@unad.edu.co

Recepción: 04 Julio 2022

Aprobación: 18 Septiembre 2022

Publicación: 18 Diciembre 2022

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/130/1303815011/>

DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.5959>

Financiamiento

Fuente: Universidad Popular del Cesar [seccional Aguachica]

Nº de contrato: Evaluación del uso de los recursos ecosistémicos del humedal el Gallinazo en Aguachica-Cesar”, con el código de aval “CIPSA2019-08” otorgado por la resolución institucional 3397 del 2019

Beneficiario: OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL DEL HUMEDAL EL GALLINAZO, UBICADO EN AGUACHICA-COLOMBIA

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/about>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

Resumen: Contextualización: los humedales se encuentran en deterioro a causa, principalmente, de las actividades humanas que provocan procesos de degradación de estos, por los cambios en el uso de los suelos. Esto ocasiona conflictos entre quienes viven cerca al humedal y tiene consecuencias en el suministro de los recursos para las poblaciones aledañas. En especial, las actividades humanas afectan al recurso hídrico, lo que limita los servicios ecosistémicos que los humedales prestan.

Vacío de conocimiento: información inexistente sobre la disponibilidad del recurso hídrico en la zona del humedal, la cual serviría para una gobernanza del agua eficiente e inclusiva en la zona, que contribuya en la formulación de políticas públicas para la gestión integral del recurso hídrico, y maximice así el bienestar social y económico en el municipio. Para lograr los objetivos mencionados se hace necesario la determinación de dicha disponibilidad, con el fin de conservar los ecosistemas de humedal con importancia regional.

Propósito: este trabajo estimó la oferta hídrica superficial [neta] disponible, mediante el método lluvia-escorrentía, en el humedal El Gallinazo, ubicado en Aguachica (Cesar-Colombia), como aporte para la gestión integral del recurso hídrico.

Metodología: se identificó de la cobertura vegetal de la zona por medio de la metodología «Corine Land Cover» adaptada para Colombia y se determinó el grupo hidrológico mediante la textura del suelo; con estos dos insumos se determinó, a través de tablas, el número de curvas. La investigación incluyó el cálculo de la precipitación media anual, empleando el método de interpolación de Kriging, con ayuda del software ArcGIS y la evaluación de los datos meteorológicos extraídos de estaciones del IDEAM [Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales] para determinar la precipitación efectiva de la zona. Además, se utilizó el método lluvia-escorrentía en función del número de curvas [SCS-CN] y se examinó la resolución 865 de 2004 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004) para establecer la oferta hídrica neta disponible del humedal El Gallinazo.

Resultados y conclusiones: la zona posee dos tipos de coberturas vegetales, tres grupos hidrológicos de suelo y un CN promedio de 59,29, demostrando un potencial de escorrentía moderadamente alto y una capacidad de infiltración moderada; la oferta hídrica

CÓMO CITAR: Saldaña-Escorcía, R., Otalvarez Herrera, R. y Herrera Galviz, J.D. (2023). Oferta hídrica superficial del humedal El Gallinazo, ubicado en Aguachica - Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(1), 221 - 249. <https://doi.org/10.22490/21456453.5959>

anual disponible se estimó en 42573,6 m³. El comportamiento de la disponibilidad del agua depende de las actividades antrópicas desarrolladas dentro y fuera del humedal, así como del régimen de precipitación.

Palabras clave: Cobertura vegetal, disponibilidad de agua, humedal, lluvia-escorrentía, método SCS-CN.

Abstract: Contextualization: Wetlands are deteriorated, mainly due to human activities that cause degradation processes in the wetlands, due to changes in land use, causing conflicts between people living near to the wetlands, as well as consequences in the supply of resources for the population. Anthropogenic activities affect water resources, which limits the ecosystem services that wetlands provide.

Knowledge gap: There is no information about the availability of water resources in the wetland area, that information would contribute for an efficient and inclusive water governance in the area and could support the formulation of public policies about the integrated management of water resources, thus it would maximize social and economic welfare in the municipality. To achieve those objectives, it is necessary to determine the mentioned availability to conserve the wetland ecosystems of regional importance.

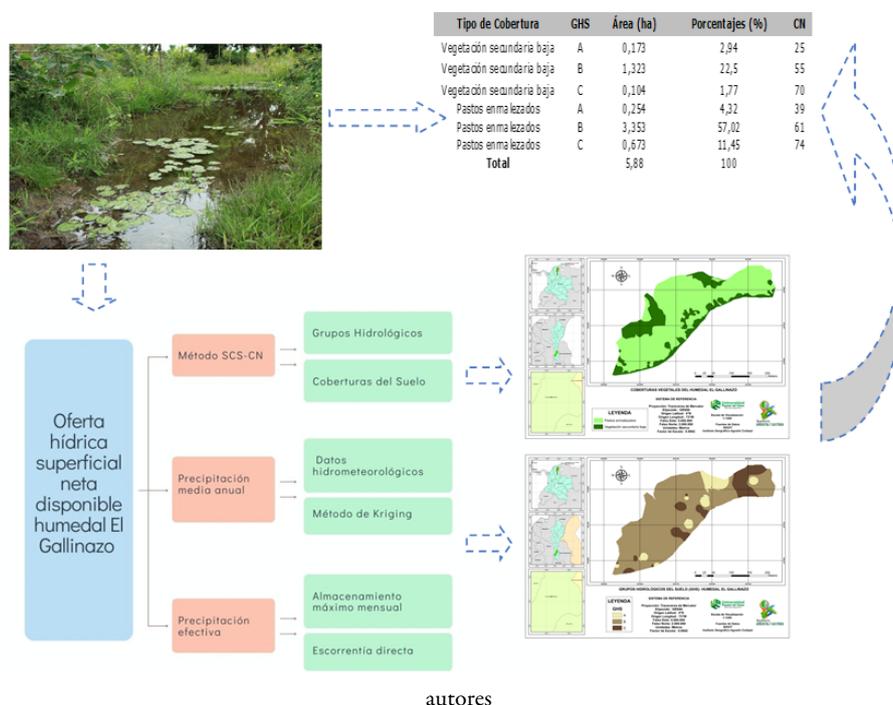
Purpose: This research estimated the [net] available surface water supply, using the rainfall-runoff method, in El Gallinazo wetland, located on Aguachica (Cesar-Colombia), as a contribution to the integral management of the hydric resource.

Methodology: It was identified the vegetation cover of the area, using the Corine Land Cover method adapted for Colombia, the hydrological group was determined by examining the soil texture; with these two inputs the number of curves was determined through tables. The research included the calculation of the mean annual precipitation, using the Kriging interpolation method, with the help of ArcGIS software and the meteorological data extracted from IDEAM stations to determine the effective precipitation of the area. In addition, the rainfall-runoff method, based on the number of curves (SCS-CN), and the resolution 865 of 2004 were used to establish the net available water supply of El Gallinazo wetland.

Results and conclusions: The area has two types of vegetation cover, three hydrologic soil groups, and an average NC of 59.29, demonstrating a moderately high runoff potential and a moderate infiltration capacity; the available annual water supply was estimated at 42573,6 m³. The behavior of water availability depends on the anthropic activities developed inside and outside the wetland, as well as on the precipitation regime.

Keywords: Vegetation cover, water availability, wetland, rainfall-runoff, SCS-CN method.

RESUMEN GRÁFICO



1. INTRODUCCIÓN

Los humedales son ecosistemas con suelos saturados, ya sea de agua superficial o subterránea, con vegetaciones adaptadas a ese tipo de suelos. Estos ecosistemas se distinguen por ser uno de los más beneficiosos para las personas, puesto que proporcionan múltiples servicios como mitigación de inundaciones, amortiguamiento contra tormentas, tratamiento de aguas, regulación de la erosión, retención de nutrientes y contaminantes, así como la recarga de acuíferos (Chatanga et al., 2020; Rebelo et al., 2019). Estos ecosistemas son objeto de presiones [agricultura, deforestación, ganadería, crecimiento urbano, entre otras] que a menudo son intensivas (Mehvar et al., 2019) y requieren de grandes cantidades de agua, lo que ocasiona una competencia por la obtención del recurso hídrico. Asimismo, el cambio climático afecta aún más la disponibilidad del agua (Fay et al., 2016; Zhu et al., 2017) ya que hay una evapotranspiración de alto potencial (Příbáň & Ondok, 1985; Watson et al., 2018), lo que exacerba dicha competencia.

El recurso hídrico es fundamental para el equilibrio de los ecosistemas, al igual que para el desarrollo socioeconómico de las poblaciones (Bal et al., 2021) Sin embargo, en los últimos años, la expansión urbana y la contaminación hídrica, al igual que el cambio climático, han llevado a una disminución drástica de la disponibilidad del agua dulce a nivel mundial (Meraj et al., 2018). La crisis del agua sigue aumentando a niveles extremos, lo que ha causado que las zonas áridas y semiáridas, las cuales presentan dificultades por el acceso al recurso hídrico (Kumar et al., 2021), se estén volviendo comunes. Por ende, la cuantificación y preservación de los suministros de agua superficial son necesarias para consolidar la supervivencia de las poblaciones (Soulis, 2021).

Estas necesidades requieren estar respaldadas por un conocimiento adecuado de las escalas temporales y espaciales de variabilidad de los recursos hídricos para permitir la aplicación de estrategias apropiadas de gestión y desarrollo (Trigg & Tshimanga, 2020). Por ende, el conocimiento sobre los flujos de agua superficiales es fundamental para la predicción de inundaciones, transporte de sedimentos y contaminantes, así como para el diseño de sistemas de riego agrícolas e infiltración del agua en el suelo. No obstante, los

estudios con descripciones detalladas sobre los flujos de ríos son escasos, debido al límite temporal y recursos disponibles. Por lo cual, los modelos matemáticos relacionados con los flujos de agua presentan una limitada aplicabilidad a causa de la disponibilidad adecuada de datos requeridos. Esto exige formular y/o establecer nuevos métodos simples para predecir dichos movimientos (Govindaraju et al., 1992; Negi et al., 2021).

Los modelos hidrológicos empleados [comúnmente] para abordar las necesidades de cuantificación y preservación del agua emplean datos y generan información confiable que ayuda a respaldar los dictámenes relacionados con la gestión integral del recurso (Hughes et al., 2020; Tshimanga et al., 2011); en el contexto del cambio climático, los modelos también proporcionan predicciones para la planificación futura (Hughes & Farinosi, 2020; Meng et al., 2016; Nonki et al., 2019). En la actualidad, existen varios modelos hidrológicos de lluvia-escorrentía que se diferencian por los detalles en los procesos, es decir, la conceptualización de los procesos, los datos requeridos de entrada y la resolución espacial-temporal (Nonki et al., 2021). Generalmente se debe elegir entre diversos modelos: continuos, agrupados, distribuidos, deterministas o estocásticos, dependiendo de los datos de entradas que requieren y se tengan para ejecutarlos. Sin embargo, los modelos lluvia-escorrentía tienen un mayor uso, debido principalmente a los pocos datos de entrada que requieren, lo cual los hace útiles en zonas con escasez de información (Tegegne et al., 2017). Estos modelos también son simples y fáciles de implementar y Autores como Skaugen et al. (2015), Muñoz et al. (2016) y Parra et al. (2018) demostraron que estos modelos conceptuales son alternativas efectivas y/o confiables en la predicción hidrológica con información limitada.

Los modelos lluvia-escorrentía son un campo clave de las investigaciones hidrológicas, ya que proporcionan información fundamental para la gestión del recurso hídrico (Tajiki et al., 2020; Xie et al., 2020; Xie, Liu, Zhang, Han, et al., 2021), principalmente en cuanto a desastres por sequías (Kang & Sridhar, 2017; Pan et al., 2020) e inundaciones (Gao et al., 2019; Hostache et al., 2018; X. Zhang et al., 2018). Del mismo modo, los modelos de lluvia-escorrentía convencionales pueden estimar los caudales a través de procesos hidrofísicos (Xie, Liu, Zhang, Wang, et al., 2021). Por otra parte, los subproductos que arroja el modelo están basados en mecanismos físicos no lineales, entre ellos, la evapotranspiración, la infiltración, la humedad del suelo, el movimiento de las aguas subterráneas y las actividades antrópicas como el uso de los suelos (Xie, Liu, Zhang, Han, et al., 2021). No obstante, estimar estos procesos en los modelos hidrológicos es complejo debido a los insumos y a la información disponible.

La relación lluvia-escorrentía ha sido una motivación fundamental para el desarrollo de procesos hidrológicos que utilicen cuencas como fuente de agua, puesto que la lluvia termina depositándose en cuencas. Esta relación entre la lluvia y la escorrentía es influenciada, principalmente, por variables hidrológicas y fisiográficas del área, tales como la pendiente, cobertura vegetal, entre otras (Gabriels et al., 2021). No obstante, las actividades humanas han alterado estas variables; es decir, los ciclos de precipitaciones están siendo erráticos debido al cambio climático antropogénico (Pachauri et al., 2014). Así mismo, el uso de los suelos circundantes ha cambiado, debido al crecimiento demográfico (urbanización), afectando las características fisiográficas de la zona (Braud et al., 2013; Yan et al., 2013) y, por ende, su capacidad de retener el agua.

Teniendo en cuenta lo anterior, para la valoración de la influencia de las actividades humanas en las variables que afectan la relación lluvia-escorrentía, se emplean modelos basados en el número de curvas [SCS-CN]. Este método, establecido por Servicio Nacional de Conservación de Recursos [NRSC] y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [USDA] en 1969, es un modelo simple y conceptual empleado para estimar la escorrentía directa en una zona determinada y se fundamenta en la profundidad de las precipitaciones (Shi & Wang, 2020). Este método es ampliamente utilizado, debido a su facilidad de implementación, porque el número de curvas (CN) es un parámetro accesible mediante tablas ya establecida por otros autores, que describe los efectos adversos de las actividades humanas en los usos de los suelos y por ende en la escorrentía (American Society of Civil Engineers, 2009).

Ahora bien, esta investigación busca estimar la oferta hídrica en el humedal El Gallinazo, usando un modelo lluvia-escorrentía. Este humedal se encuentra en la periferia sureste de Aguachica, Cesar, la cual es un área proyectada para la expansión del municipio, y esto hace que el ecosistema se encuentre sometido a presiones antrópicas por el incremento en áreas deforestadas y el desarrollo de actividades agropecuarias, lo que genera contaminación de los cuerpos de aguas y compactación y desnivelación de los suelos, teniendo efecto directo en los servicios ecosistémicos, que, en este caso, sería la oferta hídrica. Por eso, esta investigación posee como objetivo principal estimar la oferta hídrica neta disponible en el humedal, puesto que no existe información básica para una gobernanza del agua eficaz e incluyente en la zona. Por el contrario, tener información sobre la oferta hídrica del humedal contribuiría en la formulación de políticas públicas sobre la gestión integral del recurso hídrico, logrando maximizar el bienestar social y económico en el municipio de Aguachica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

Esta pesquisa se llevó a cabo en el humedal El Gallinazo [Figura 1], el cual se encuentra ubicado en la periferia sureste a 260 metros del casco urbano del municipio de Aguachica-Cesar (Saldaña-Escorcía & Otalvarez-Herrera, 2021). El municipio se encuentra en las siguientes coordenadas: latitud $8^{\circ}17'58.124''$ Norte con longitud $73^{\circ}36'24.825''$ Oeste, con un área de 58823 m^2 (5.88 hectáreas) y un perímetro de 1322 m. Dicho humedal pertenece a la microcuenca el Gallinazo y esta, a su vez, a la cuenca de la quebrada Buturama y quebrada Guaduas, que desemboca en el río Magdalena.

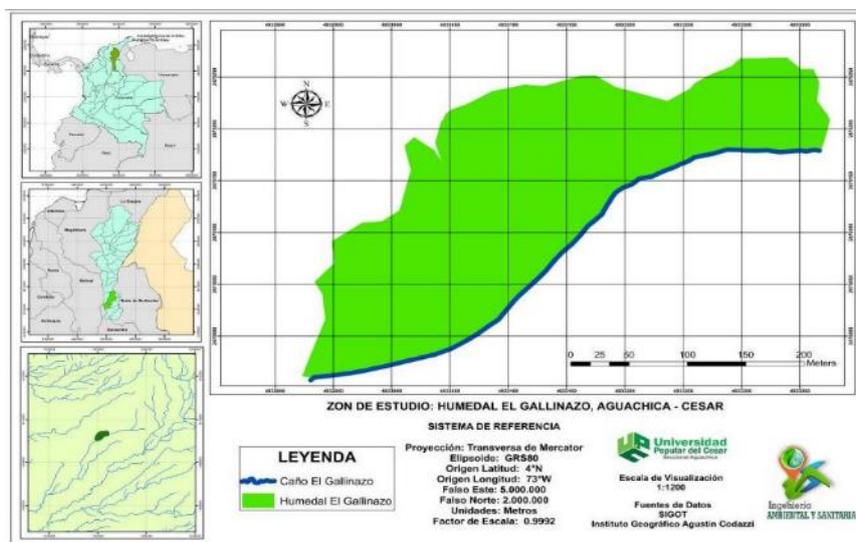


FIGURA 1.
Zona de estudio.
Autores.

2.2 Método SCS-CN

Este método presenta un enfoque simple, empleado para estimar la escorrentía superficial directa dentro de una cuenca hidrográfica y/o fluvial (Kumar & Jhariya, 2017; Shi & Wang, 2020; Singh et al., 2015; Verma et al., 2020). El primer paso de este modelo es el cálculo del área del drenaje de la cuenca del afluente (Kumar et al., 2021) y la ecuación del modelo tiene una relación marcada entre el volumen de la escorrentía superficial directa y la precipitación, como se expresa a continuación:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a - S)} \quad (1)$$

Q = profundidad de la escorrentía (mm)

P = profundidad de la lluvia (mm)

I_a = abstracción inicial (mm)

S = retención máxima potencial (mm)

Teniendo en cuenta que el volumen de la precipitación que cae antes de que dé comienzo la escorrentía se establece como I_a y es asumida como 0,2*S (Soulis & Valiantzas, 2021), según Ling et al. (2019), la ecuación generalmente se escribe como:

$$Q = \frac{(P - 0.2 * S)^2}{(P - 0.8 * S)} \quad (2)$$

Condicionando que la S está relacionada con el CN y que de esta se deriva el I_a a través de la multiplicación con el parámetro λ (-) se obtiene que:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

$$I_a = \lambda * S \quad (3)$$

El método SCS-CN asume que la variable λ toma valores de 0.2 y 0.8 (Shi et al., 2009) y emplea valores de CN en los que este es un parámetro adimensional [Rango de 0-100] que se determina mediante tablas basadas en el uso que se les da a las tierras y/o la cobertura vegetal que estas posean. En este caso se empleó, para definir las categorías de cobertura vegetal, la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, la cual consistió en el uso de imágenes Landsat 8 [2019-2020] ortorrectificadas, combinadas y ajustadas bajo las firmas espectrales de las bandas con el programa ArcGIS 10.8; también se configuraron de acuerdo con la leyenda nacional de coberturas a escala 1: 100.000 adaptada por el Instituto de IDEAM.

Por otro lado, las tablas que se utilizaron están relacionadas con los Grupos Hidrológicos de Suelos [GHS] y estos, a su vez, con la tasa de infiltración del suelo dentro de la cuenca. Los Grupos Hidrológicos de Suelos se determinaron por medio de 57 muestras de suelo y se estableció la textura de cada una empleando la metodología establecida por el Centro Internacional de Agricultura Tropical [CIAT], en conjunto con la

Corporación Biotec y la Universidad Nacional de Colombia (CIAT et al., 2006). Generalmente, los GHS se dividen en cuatro grupos [A, B, C y D] en los que el grupo de suelo hidrológico “A” posee una tasa de infiltración alta, el “B” una tasa moderada, el “C” una tasa moderada-baja y el grupo “D” tiene suelo con baja tasa de infiltración (Lian et al., 2020).

2.3 Precipitación media anual

2.3.1 Datos hidrometeorológicos

El estudio se desarrolló a partir de los datos obtenidos de 7 estaciones pluviométricas pertenecientes al IDEAM. La distribución espacial de estas estaciones de medición sobre y alrededor del área de estudio se muestra en la Figura 2.

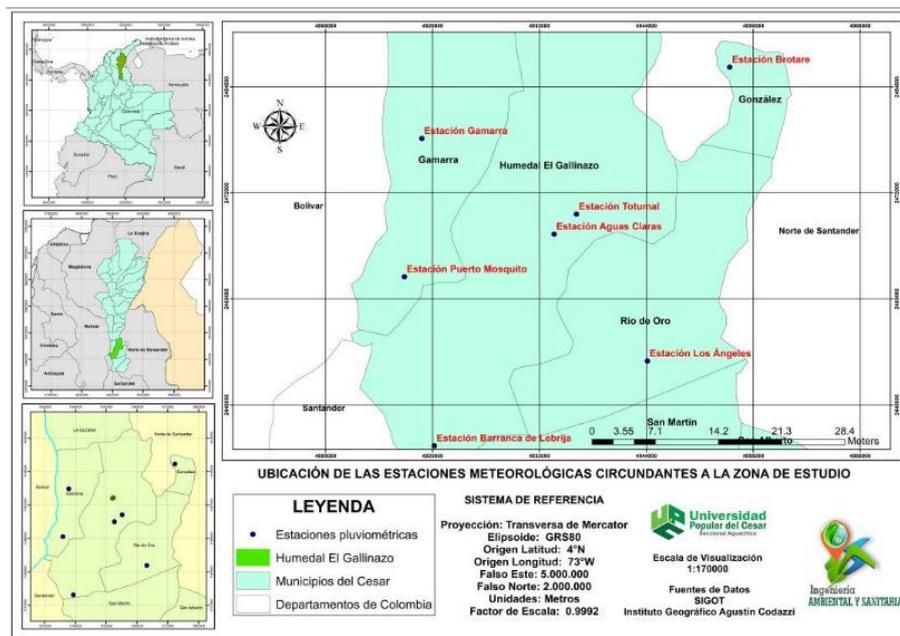


FIGURA 2.

Posicionamiento espacial de las estaciones de medición a lo largo y alrededor del humedal El Gallinazo.

Autores.

2.4 Método de Kriging

Los métodos de interpolación espacial [basados en la geografía y en la estadística] se implementan hace décadas, utilizando datos de puntos específicos y áreas. Estas técnicas de interpolación espacial permiten obtener y/o predecir datos de otros sitios sobre la zona de estudio (Bechler et al., 2015; Camera et al., 2014; Manz et al., 2016). El método de Kriging y sus variantes se convirtieron en modelos de interpolación de referencia en el campo de la hidrología, puesto que autores como Das & Islam (2021), así como Wagner et al. (2012), indican que estos ofrecen resultados ajustados y con mayor precisión con relación a otros métodos como el polígono IDW y Thiessen.

El método de interpolación de Kriging se puede desempeñar de forma no lineal, debido a las coordenadas espaciales (Biau et al., 1999; Xu et al., 2018). Además, el método consta de dos partes: un análisis de variaciones espaciales a través de variogramas y un cálculo de pesos ponderados para las distancias interpoladas, con lo cual se crea un red adaptativa sistemáticamente que busca la mejor estimación de los resultados (Peng et al., 2016; Rousis et al., 2017; Wang & Lin, 2015). De manera general, la fórmula del modelo (1) se emplea para apreciar los valores de las ubicaciones no muestreadas $\hat{p}(u_0)$, en la que los pesos $w_i(u_0)$ están asociados con datos de estaciones calibradas cercanas a la zona de estudio $w(u_i)$ y están determinadas así:

$$\hat{p}(u_o) = \sum_{i=1}^n w_i (u_o) * p(u_i)$$

(4)

Los datos espaciales incorporados en la ecuación de Kriging son utilizados para estimar de forma robusta los pesos de los puntos desconocidos, calibrándose de tal forma que la interpolación es insesgada, mientras que la varianza del modelo disminuye (Das & Islam, 2021; Webster & Oliver, 2007). La ecuación (5) es adoptada para establecer el valor de los pesos en los puntos desconocidos de manera ordinaria:

$$\sum_{i=1}^n w_i (u_o) \gamma(u_i, u_j) + \mu = \gamma(u_i, u_j) \text{ para toda } j$$

$$\sum_{i=1}^n w_i (u_o) = 1$$

(5)

$\gamma(u_i, u_j)$ y $\gamma(u_j, u_o)$ correspondientemente, son las semivarianzas entre los puntos muestreados (u_i y u_j); los puntos muestreados y los no muestreados es (u_j y u_o); μ es la medida de Lagrange.

Por otra parte, en el método de Kriging con información externa, la media del parámetro primario depende de los coparámetros. Este método se utiliza en función a los residuos obtenidos de la estimación del valor medio y se evalúan las siguientes ecuaciones con el fin de establecer una ponderación para este procedimiento (Das & Islam, 2021; Webster & Oliver, 2007):

$$\sum_{i=1}^n w_i (u_o) \gamma(u_i, u_j) + \mu_o + \sum_{k=1}^k \mu_k y_k (u_j) = \gamma(u_o, u_j) \text{ para toda } j$$

$$\sum_{i=1}^n w_i (u_o) = 1$$

$$\sum_{i=1}^n w_i (u_o) y_k (u_j) = y_k (u_j) \text{ para } K = 1, 2, \dots, k$$

(6)

$\gamma(u_i, u_j)$ es las semivarianza residual entre los puntos muestreados; $\gamma(u_i, u_o)$ es la semivarianza entre los puntos muestreados y no muestreados; m_k para $k = 0, 1, \dots, K$, son los multiplicadores de Lagrange; y_k para $k = 1, 2, \dots, K$ son las covariables. La valoración empírica del semivariograma fundada en agrupaciones de datos observados tiene la siguiente expresión:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z(u_i) - z(u_i + h))^2 \quad (7)$$

$\hat{\gamma}(h)$ = Semivarianza

h = Distancia de separación entre dos ubicaciones

$N(h)$ = Número de pares de datos

$(z(u_i) - z(u_i + h))$ = Diferencia de valores entre puntos $(u_i + h)$

Para efectos del presente trabajo se empleó el software ArcGIS 10.8 que tiene incorporados algoritmos programados con diferentes métodos de interpolación, de los cuales Kriging es uno de ellos. Se realizó la ejecución del método utilizando la configuración de Kriging ordinario con un tipo de salida de superficie: predicción. Además, se configuró el tipo de transformación logarítmica con un orden de eliminación de tendencias secundario. El tipo de modelo fue esférico con la activación de la opción de anisotropía. Al ejecutar la herramienta se obtuvo un semivariograma con rango entre 0.118 y 0.237, una meseta de 1,0 y una pepita de 0,01035.

2.5 Precipitación efectiva

El concepto de precipitación efectiva [Pe] puede tener una interpretación diferente para cada campo científico o para diferentes objetivos de investigación. Por ejemplo, Pe puede considerarse, respectivamente, como la cantidad total de la precipitación que entra en un embalse, el porcentaje de la precipitación que contribuye al aumento en los niveles de las aguas subterráneas, el volumen de agua que utilizan los sistemas radiculares de las plantas, etc. (Tigkas et al., 2016). En este trabajo nos centramos en el concepto de Pe como factor que contribuye a la recarga de las aguas subterráneas, y se determina a través de la ecuación planteada por Magaña-Hernández et al. (2013):

$$P_e = \frac{\left[P - \frac{508}{CN} + 5,08 \right]^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20,32} \quad (8)$$

P_e = Precipitación efectiva (mm)

P = Precipitación media anual (mm)

CN = Número de curvas (adimensional)

2.6 Oferta hídrica superficial neta

Para la obtención final de la oferta hídrica superficial [neta] disponible en la zona de estudio se aplicaron dos de los factores establecidos en la Resolución 865 de 2004 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004), por la cual se fija la metodología para hallar el índice de escasez para aguas superficiales:

- **Reducción por calidad de agua:** Corresponde a la probable variación de la calidad del agua debido a la manifestación de materia orgánica y sintética; de acuerdo con la resolución, la oferta hídrica total se debe multiplicar por el 25 %.

- **Reducción por caudal ecológico:** Este factor constituye el caudal mínimo demandado para el equilibrio del ecosistema, adoptando un 25 % sobre la oferta hídrica total.

2.7 Análisis Estadísticos

Este tipo de análisis únicamente se ejecutó para el cálculo de isoyetas, toda vez que la determinación de coberturas vegetales requirió la estimación de puntos de control en campo con los cuales se desarrolló un proceso de delimitación bastante eficiente, por tratarse de un área pequeña. Para la realización del mapa de isoyetas se empleó la herramienta de análisis geoestadísticos, en la cual se ejecutaron los análisis de tendencias, histograma, gráfico cuantil–cuantil [QQPlots], el gráfico de semivariograma y el de covarianza con los cuales se determinó el comportamiento de los datos. De acuerdo con ello, se establecieron las configuraciones establecidas para la interpolación mediante Kriging, del cual se obtuvieron las respectivas isoyetas, y que se describió anteriormente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Coberturas del Suelo

Las coberturas vegetales se determinaron a través de reconocimiento mediante salidas de campo en el humedal y teniendo en cuenta la metodología Corine Land Cover para Colombia, con lo cual se determinaron dos tipos de coberturas vegetales mediante puntos de control: La primera, pastizales enmalezados, en su mayoría bajo suelos inundados o con niveles freáticos altos, ocupando aproximadamente el 27.29 %. La segunda, vegetación secundaria, se encontró principalmente alrededor del cauce del humedal El Gallinazo y en zonas secas, ocupando el 72.71 % del área del humedal [Figura 3].

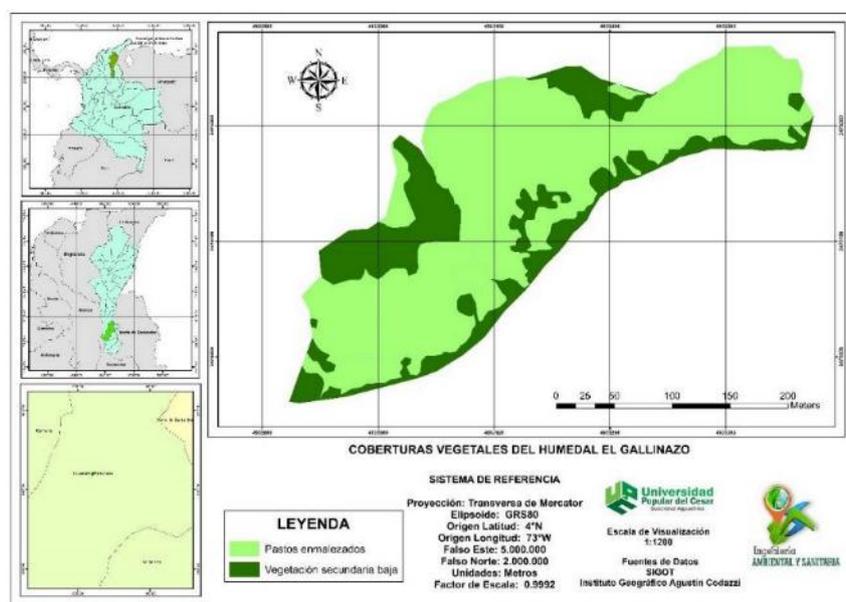


FIGURA 3.
Coberturas del suelo del humedal El Gallinazo.
Autores.

La cobertura vegetal y los cambios en el uso de los suelos influyen directamente en la infiltración y en la escorrentía superficial, siendo estos procesos fundamentales para la generación de caudales, la retención de humedad en los suelos y la regulación hídrica dentro de la zona (Mozo et al., 2020) . Con relación a esto, las

coberturas de vegetación secundaria baja, presentes en el humedal El Gallinazo, han disminuido durante el lapso de esta investigación debido a las actividades de extracción de material forestal ilegal. La disminución de la cobertura genera inconvenientes dentro del ciclo hidrológico regional, pues se alteran la variación y regulación del balance hídrico superficial y la evapotranspiración como lo mencionan Bao et al. (2015); Bégué et al. (2011) y Chen et al. (2014). Igualmente, los autores Revueltas et al. (2020) y Zhang et al. (2019) indican que la cobertura vegetal es un factor fundamental en la estabilización de la temperatura, intercepción y redistribución de las lluvias, retención hídrica y escorrentía superficial.

3.2 Grupos Hidrológicos de Suelo

En la figura 4 se muestran los diferentes GHS pertenecientes al humedal El Gallinazo. El grupo A posee un 15.1 % de suelos arenosos; el grupo B, un 56.6 % de texturas moderadamente gruesas a moderadamente finas; mientras el grupo C, un 28.3 % exhibiendo texturas moderadamente finas.

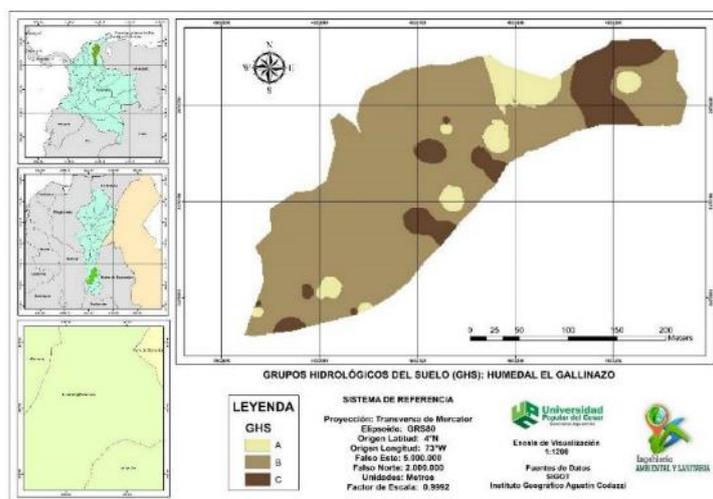


FIGURA 4.
GHS del humedal El Gallinazo.

Autores.

La presencia de los diversos GHS dentro del humedal demuestra que los suelos poseen un potencial de recarga hídrica de alta a moderada, una capacidad de infiltración moderada y que pueden presentar un potencial de escorrentía moderadamente alto cuando presentan humedad, así como cuando se encuentran desprovistos de coberturas. Específicamente, el 28,3 % de los suelos del grupo C, con texturas finas e índices altos de humedad, poseen potencial moderadamente alto de escorrentía, y desprovistos de cobertura vegetal cambian los flujos de las corrientes superficiales, lo que aumenta la erosión (Duan et al., 2016; Liu et al., 2019).

3.3 Número de Curva

En la tabla 1 se muestran los conjuntos de las coberturas vegetales y GHS obtenidos para el humedal El Gallinazo; con esto, a cada combinación establecida le corresponde un Número de Curva (CN), el cual representa el potencial de escorrentía superficial. Así los datos más bajos se hallaron en los suelos del grupo A con coberturas de vegetación secundaria y pastos enmalezados, al igual que en los suelos del grupo B con coberturas de vegetación secundaria baja.

TABLA 1.
CN para cada combinación suelo-cobertura.

Tipo de Cobertura	GHS	Área (ha)	Porcentajes (%)	CN
Vegetación secundaria baja	A	0,173	2,94	25
Vegetación secundaria baja	B	1,323	22,5	55
Vegetación secundaria baja	C	0,104	1,77	70
Pastos enmalezados	A	0,254	4,32	39
Pastos enmalezados	B	3,353	57,02	61
Pastos enmalezados	C	0,673	11,45	74
Total		5,88	100	

Autores.

Kumar et al. (2021) afirman que la evaluación y/o determinación de la escorrentía superficial es fundamental para el establecimiento del de la oferta y la eficiencia hídrica de la zona, así como para la determinación de los niveles de riesgos en relación con las inundaciones aguas abajo; el método SCS-CN permitió establecer el parámetro de los niveles de riesgo de inundación con éxito, requiriendo de un menor empleo del tiempo con un mayor manejo de datos (Caletka et al., 2020). Estos insumos servirán como base o línea base para la formulación de estrategias, planes o políticas de uso adecuado de los recursos hídricos, que en opinión de Zhou et al. (2021) es uno de los desafíos más importantes.

3.4 Precipitación Media Anual

Con los datos de las estaciones se obtuvo la precipitación media anual de la zona de estudio a través de las isoyetas mediante el método de Kriging [Figura 5], se analizaron los intervalos de precipitación y la influencia de estos en las áreas de la zona de estudio dando como resultado un valor aproximado de 1687.13 mm.

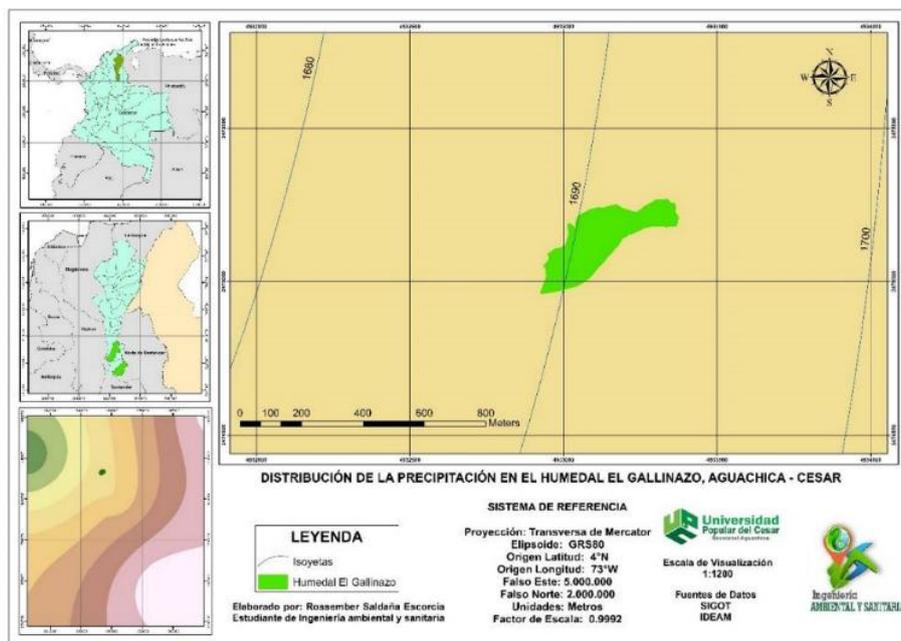


FIGURA 5.
Isoyetas.
Autores.

3.5 Determinación de la oferta hídrica

Con la determinación de las coberturas [Tabla 1] se estableció el número de curvas promedio para el área de estudio (CN) en 59,29. Con este valor se procedió al cálculo de la relación lluvia-escorrentía para determinar el almacenamiento máximo mensual de la zona de estudio:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

$$S = \frac{25400}{59,29} - 254 \quad S = 428,40 - 254$$

$$S = 174,40 \text{ mm}$$

El valor S representa la disimilitud entre la precipitación efectiva y la escorrentía superficial directa del periodo de estudio. Para esta ocasión, el valor de S alcanzado fue de 174,40 mm. Antes de hallar la escorrentía directa se estableció la precipitación efectiva, teniendo en cuenta la precipitación media anual y el número de curvas de la zona de estudio, de la siguiente manera:

$$P_e = \frac{\left[P - \frac{508}{CN} + 5,08 \right]^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20,32} \quad P_e = \frac{\left[1687,13 \text{ mm} - \frac{508}{59,29} + 5,08 \right]^2}{1687,13 \text{ mm} + \frac{2032}{59,29} - 20,32}$$

$$P_e = \frac{[1683,64 \text{ mm}]^2}{1701,08 \text{ mm}}$$

$$P_e = \frac{2834643,65 \text{ mm}^2}{1701,08 \text{ mm}}$$

$$P_e = 1666,38 \text{ mm}$$

Obtenidos dichos valores, se procede a determinar la escorrentía directa por medio de la ecuación 2, como se muestra a continuación:

$$Q = \frac{(P - (0,2 * S))^2}{(P + (0,8 * S))}$$

$$Q = \frac{(1666,38 \text{ mm} - (0,2 * 174,40 \text{ mm}))^2}{(1666,38 \text{ mm} + (0,8 * 174,40 \text{ mm}))}$$

$$Q = \frac{(1666,38 \text{ mm} - 34,88 \text{ mm})^2}{(1666,38 \text{ mm} + 139,52 \text{ mm})}$$

$$Q = \frac{(1627,94 \text{ mm})^2}{(1805,9 \text{ mm})}$$

$$Q = \frac{2650188,644 \text{ mm}^2}{1805,9 \text{ mm}}$$

$$Q = 1467,52 \text{ mm}$$

Para el humedal El Gallinazo, el valor # fue de 1467,52 mm al año. Este dato de escorrentía directa se convirtió a unidades de caudal:

$$1467,52 \frac{\text{m}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ a/año}}{365 \text{ día/a}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ m/m}} * \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ seg}} = 0,000000046 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

Obteniendo este valor, se procede a multiplicarlo por el área total del humedal (58822 m²) para obtener un volumen, dando como resultado 0,00271 m³ por segundo. Aplicando los factores de corrección de la resolución descrita en la metodología, la oferta hídrica superficial [neta] disponible en el humedal El Gallinazo es de 0,00135 m³ por segundo o 1,35 litros por segundo, con un volumen anual de 42573,6 m³.

La disponibilidad del agua en el humedal El Gallinazo está influenciada por dos factores: la precipitación relacionada directamente con las temporadas de lluvia, lo que permite el flujo constante del agua a través de los drenajes, y las actividades ganaderas [bovina y equina] que generan afectaciones en los niveles del terreno, causando compactación del suelo y disminución de la profundidad de los drenajes, reduciendo el caudal efluente.

Al pasar los años, el crecimiento demográfico y la expansión de la frontera agropecuaria e industrial han aumentado la demanda hídrica, que en muchas ocasiones es mayor a la oferta hídrica neta de las cuencas (Brown et al., 2005) . Por lo tanto, si dicha presión antrópica persiste o aumenta en el humedal, puede tener efectos directos en la disponibilidad hídrica por los cambios en el uso de los suelos, como lo indican autores como Daza et al. (2014) y Ruales y Dávila (2019), quienes afirman que la labranza, la expansión de la frontera agropecuaria [eliminación de cobertura vegetal nativa por cultivos agrícolas y ganaderos] y la expansión demográfica disminuye entre un 40–60 % la disponibilidad hídrica.

Lo anterior sucede puesto que dichas actividades humanas alteran propiedades físicas de los suelos tales como la porosidad [macroporos y microporos], la densidad aparente, la retención de humedad y el contenido

de carbono orgánico, lo que afecta la capacidad de almacenamiento de agua y, por ende, aumenta los problemas de erosión debido a la escorrentía que el suelo no puede absorber; conllevando, así, a problemas de degradación de los suelos, así como de disponibilidad y eficiencia hídrica. Asimismo, la calidad del agua se encuentra en riesgo y/o vulnerabilidad debido a la expansión urbana y agropecuaria hacia la zona periférica donde se ubica el humedal, que tiene como consecuencia la disminución del recurso hídrico con base en la disponibilidad [cantidad y calidad]. De acuerdo con Chávez-Jiménez y González-Zeas (2015), esta escasez de agua genera conflictos socioeconómicos, al igual que altera los procesos hidrológicos desequilibrando los ecosistemas.

Por otra parte, al comparar los datos obtenidos en esta investigación sobre la oferta hídrica superficial [neta] disponible en el humedal El Gallinazo [$0,00135 \text{ m}^3$ por segundo] con estudios similares, los cuales emplearon la metodología establecida en la Resolución 865 de 2004 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004), encontramos autores como Gutiérrez-Forero et al. (2015), que obtuvieron una oferta hídrica disponible entre un rango de $10,3$ a $2,7 \text{ m}^3$ por segundo, cuyos valores dependen de la estación climática de la zona. Salazar (2016) obtuvo en su investigación una oferta hídrica neta de $0,891 \text{ m}^3$ por segundo, mientras que Caicedo (2019) registró una oferta neta de $1,13 \text{ m}^3$ por segundo y, por último, Córdoba (2021) determinó una oferta $48,437 \text{ m}^3$ por segundo.

Finalmente, se debe tener en cuenta que dichos estudios se realizaron a niveles de escala espacial diferentes, es decir, son investigaciones cuyas áreas de estudio fueron cuencas hidrográficas en comparación al área del humedal. Además, aunque la oferta hídrica superficial neta disponible saliente del humedal “El Gallinazo” no se encuentre entre el rango de estos estudios debido a su área, sigue siendo un ecosistema fundamental para el municipio y la región en relación con la lucha contra el cambio climático, la escasez del recurso hídrico y el desarrollo socioeconómico, al igual que para el logro de las metas pactadas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible [ODS].

4. CONCLUSIONES

El cálculo de la oferta hídrica superficial, a través de la metodología lluvia-escorrentía, permitió el diagnóstico del recurso hídrico del humedal El Gallinazo, el cual indica que el humedal se enfrentará con problemas de escasez hídrica en un futuro no muy lejano, debido a las tendencias de expansión de la frontera agropecuaria y el crecimiento demográfico en la zona periférica. Esto aumentará las presiones ya generadas a este ecosistema por los cambios en los usos de la tierra, la demanda de agua para actividades socioeconómicas y la nula legislación de protección ambiental regional de estos ecosistemas, lo que afecta, de manera directa, el equilibrio de este.

Sin importar que Colombia posea una oferta hídrica generosa, dicho recurso no estará presente de forma infinita ni distribuido homogéneamente en los ecosistemas a nivel nacional. Por esta razón, la gestión adecuada del recurso hídrico superficial y/o subterráneo es esencial. Además, se deben tener en cuenta las tendencias de consumo, generación y escenarios futuros que, mediante métodos como la relación lluvia-escorrentía, permitan determinar de la oferta, demanda y los usos del agua; esto haría posible avanzar hacia una gestión integral del recurso hídrico [mediante políticas públicas ambientales] cumpliendo lo pactado en los ODS. Asimismo, en este contexto de futura escasez de agua se puede contribuir mediante el fortalecimiento de las estrategias de protección de los ecosistemas y, por ende, de su oferta hídrica existente; de igual forma, la reducción de la demanda de agua dentro de la zona de influencia, por medio de programas de uso eficiente y sostenible del recurso, es necesaria para garantizar la protección integral del recurso hídrico.

Por otra parte, la inexistencia de estudios o informes de investigación recientes sobre la calidad y demanda del recurso en la zona del humedal El Gallinazo, aparte de esta investigación, no permite concluir el estado

del recurso hídrico en esa zona totalmente, por lo que se recomienda establecer y ejecutar otros estudios de investigación que permitan complementar la evaluación y/o determinación de la oferta hídrica superficial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Grupo de Investigación en Gestión Ambiental y Territorios Sostenibles [GE&TES] de la Universidad Popular del Cesar [seccional Aguachica] por permitirnos ejecutar el subproyecto “Evaluación de la recarga hídrica en relación a la capacidad de retención y almacenamiento de agua del humedal El Gallinazo en Aguachica–Cesar” [Trabajo de grado]. Este subproyecto se ejecutó dentro del marco del macroproyecto de investigación “Evaluación del uso de los recursos ecosistémicos del humedal el Gallinazo en Aguachica–Cesar”, con el código de aval “CIPSA2019-08” otorgado por la resolución institucional 3397 del 2019.

LITERATURA CITADA

- American Society of Civil Engineers. (2009). *Curve number hydrology#: state of the practice*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784410042>
- Bal, M., Dandpat, A. K. & Naik, B. (2021). Hydrological modeling with respect to impact of land-use and land-cover change on the runoff dynamics in Budhabalanga river basing using ArcGIS and SWAT model. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23, 100527. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100527>
- Bao, G., Bao, Y., Sanjjava, A., Qin, Z., Zhou, Y. & Xu, G. (2015). NDVI-indicated long-term vegetation dynamics in Mongolia and their response to climate change at biome scale. *International Journal of Climatology*, 35(14), 4293–4306. <https://doi.org/10.1002/joc.4286>
- Bechler, A., Vrac, M. & Bel, L. (2015). A spatial hybrid approach for downscaling of extreme precipitation fields. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(10), 4534–4550. <https://doi.org/10.1002/2014JD022558>
- Bégué, A., Vintrou, E., Ruelland, D., Claden, M. & Dessay, N. (2011). Can a 25-year trend in Soudano-Sahelian vegetation dynamics be interpreted in terms of land use change? A remote sensing approach. *Global Environmental Change*, 21(2), 413–420. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.02.002>
- Biau, G., Zorita, E., von Storch, H. & Wackernagel, H. (1999). Estimation of Precipitation by Kriging in the EOF Space of the Sea Level Pressure Field. *Journal of Climate*, 12(4), 1070–1085. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1070:EOPBKI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1070:EOPBKI>2.0.CO;2)
- Braud, I., Breil, P., Thollet, F., Lagouy, M., Branger, F., Jacqueminet, C., Kermadi, S. & Michel, K. (2013). Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France. *Journal of Hydrology*, 485, 5–23. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.049>
- Brown, A. E., Zhang, L., McMahon, T. A., Western, A. W. & Vertessy, R. A. (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310(1–4), 28–61. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.12.010>
- Caicedo, M. A. (2019). *Evaluación del índice de escasez para aguas superficiales mediante el cálculo de la demanda y disponibilidad hídrica de la microcuenca del Río Mulato, municipio de Mocoa* [Tesis de pregrado, Corporación Universitaria Autónoma Del Cauca]. Repositorio institucional. <https://repositorio.uniautonoma.edu.co/handle/123456789/26>
- Caletka, M., Šulc, M., Karásek, P. & Fučík, P. (2020). Improvement of SCS-CN Initial Abstraction Coefficient in the Czech Republic: A Study of Five Catchments. *Water*, 12(7), 1964. <https://doi.org/10.3390/w12071964>
- Camera, C., Bruggeman, A., Hadjinicolaou, P., Pashiardis, S. & Lange, M. A. (2014). Evaluation of interpolation techniques for the creation of gridded daily precipitation ($1 \times 1 \text{ km}^2$); Cyprus, 1980–2010. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(2), 693–712. <https://doi.org/10.1002/2013JD020611>

- Centro Internacional de Agricultura Tropical, Corporación BIOTEC, & Universidad Nacional de Colombia. (2006). *RASTA Rapid Soil and Terrain Assessment: Guía práctica para la caracterización del suelo y del terreno 2..* ed.). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/69682/RASTA_2011.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Chatanga, P., Kotze, D. C., Okello, T. W. & Sieben, E. J. J. (2020). Ecosystem services of high-altitude Afromontane palustrine wetlands in Lesotho. *Ecosystem Services*, 45, 101185. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101185>
- Chávez-Jiménez, A. y González-Zeas, D. (2015). El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción de la demanda de agua bajo escenarios de cambio climático. *Ribagua*, 2(1), 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.04.001>
- Chen, T., de Jeu, R. A. M., Liu, Y. Y., van der Werf, G. R. & Dolman, A. J. (2014). Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI: A case study over mainland Australia. *Remote Sensing of Environment*, 140, 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.022>
- Córdoba, E. (2021). *Evaluación del índice de escasez para aguas superficiales mediante el cálculo de la oferta y demanda hídrica en la microcuenca del río palo en el municipio de Puerto Tejada (Cauca)* [Tesis de pregrado, Corporación Universitaria Autónoma Del Cauca]. Repositorio institucional. <https://repositorio.uniautonoma.edu.co/handle/123456789/596>
- Das, S. & Islam, A. R. M. T. (2021). Assessment of mapping of annual average rainfall in a tropical country like Bangladesh: remotely sensed output vs. kriging estimate. *Theoretical and Applied Climatology*, 146, 111–123. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03729-3>
- Daza, M. C., Hernández, F. y Triana, F. A. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(1), 7189–7200. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>
- Duan, L., Huang, M. & Zhang, L. (2016). Differences in hydrological responses for different vegetation types on a steep slope on the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 537, 356–366. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.057>
- Fay, P. A., Guntenspergen, G. R., Olker, J. H. & Johnson, W. C. (2016). Climate change impacts on freshwater wetland hydrology and vegetation cover cycling along a regional aridity gradient. *Ecosphere*, 7(10). <https://doi.org/10.1002/ecs2.1504>
- Gabriels, K., Willems, P. & Orshoven, J. V. (2021). Performance evaluation of spatially distributed, CN-based rainfall-runoff model configurations for implementation in spatial land use optimization analyses. *Journal of Hydrology*, 602, 126872. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126872>
- Gao, S., Liu, P., Pan, Z., Ming, B., Guo, S., Cheng, L. & Wang, J. (2019). Incorporating reservoir impacts into flood frequency distribution functions. *Journal of Hydrology*, 568, 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.061>
- Govindaraju, R. S., Kavvas, M. L. & Tayfur, G. (1992). A simplified model for two-dimensional overland flows. *Advances in Water Resources*, 15(2), 133–141. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(92\)90040-9](https://doi.org/10.1016/0309-1708(92)90040-9)
- Gutiérrez-Forero, C. P., Díaz-Mena, C. y Muñoz-Cifuentes, J. N. (2015). *Cálculo del índice de escasez de la cuenca del río Opía, departamento del Tolima* [Tesis de especialización, Universidad Católica de Colombia]. RIUCaC <https://repositorio.ucatolica.edu.co/handle/10983/2727>
- Hostache, R., Chini, M., Giustarini, L., Neal, J., Kavetski, D., Wood, M., Corato, G., Pelich, R. & Matgen, P. (2018). Near - Real - Time Assimilation of SAR - Derived Flood Maps for Improving Flood Forecasts. *Water Resources Research*, 54(8), 5516–5535. <https://doi.org/10.1029/2017WR022205>
- Hughes, D. A. & Farinosi, F. (2020). Assessing development and climate variability impacts on water resources in the Zambezi River basin. Simulating future scenarios of climate and development. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32, 100763. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100763>
- Hughes, D., Mantel, S. & Farinosi, F. (2020). Assessing development and climate variability impacts on water resources in the Zambezi River basin: Initial model calibration, uncertainty issues and performance. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32, 100765. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100765>

- Kang, H. & Sridhar, V. (2017). Combined statistical and spatially distributed hydrological model for evaluating future drought indices in Virginia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, 253–272. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.06.003>
- Kumar, A., Kanga, S., Taloor, A. K., Singh, S. K. & Đurin, B. (2021). Surface runoff estimation of Sind river basin using integrated SCS-CN and GIS techniques. *HydroResearch*, 4, 61–74. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2021.08.001>
- Kumar, T. & Jhariya, D. C. (2017). Identification of rainwater harvesting sites using SCS-CN methodology, remote sensing and Geographical Information System techniques. *Geocarto International*, 32(12), 1367–1388. <https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1213772>
- Lian, H., Yen, H., Huang, J.-C., Feng, Q., Qin, L., Bashir, M. A., Wu, S., Zhu, A.-X., Luo, J., Di, H., Lei, Q., & Liu, H. (2020). CN-China: Revised runoff curve number by using rainfall-runoff events data in China. *Water Research*, 177, 115767. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115767>
- Ling, L., Yusop, Z., Yap, W.-S., Tan, W. L., Chow, M. F. & Ling, J. L. (2019). A Calibrated, Watershed-Specific SCS-CN Method: Application to Wangjiaqiao Watershed in the Three Gorges Area, China. *Water*, 12(1), 60. <https://doi.org/10.3390/w12010060>
- Liu, S., Huang, S., Xie, Y., Wang, H., Huang, Q., Leng, G., Li, P. & Wang, L. (2019). Spatial-temporal changes in vegetation cover in a typical semi-humid and semi-arid region in China: Changing patterns, causes and implications. *Ecological Indicators*, 98, 462–475. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.037>
- Magaña-Hernández, F., Bâ, K. M. y Guerra-Cobián, V. H. (2013). Estimación del hidrograma de crecientes con modelación determinística y precipitación derivada de radar. *Agrociencia*, 47(8), 739–752. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952013000800001
- Manz, B., Buytaert, W., Zulkafli, Z., Lavado, W., Willems, B., Robles, L. A. & Rodríguez - Sánchez, J. P. (2016). High - resolution satellite - gauge merged precipitation climatologies of the Tropical Andes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(3), 1190–1207. <https://doi.org/10.1002/2015JD023788>
- Mehvar, S., Filatova, T., Sarker, M. H., Dastgheib, A. & Ranasinghe, R. (2019). Climate change-driven losses in ecosystem services of coastal wetlands: A case study in the West coast of Bangladesh. *Ocean & Coastal Management*, 169, 273–283. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.12.009>
- Meng, F., Su, F., Yang, D., Tong, K. & Hao, Z. (2016). Impacts of recent climate change on the hydrology in the source region of the Yellow River basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 6, 66–81. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.03.003>
- Meraj, G., Khan, T., Romshoo, S. A., Farooq, M., Rohitashw, K. & Sheikh, B. A. (2018). An Integrated Geoinformatics and Hydrological Modelling-Based Approach for Effective Flood Management in the Jhelum Basin, NW Himalaya. *Proceedings*, 7(1), 8. <https://doi.org/10.3390/ECWS-3-05804>
- Mozo, J., Varni, M., Ares, M. G. & Chagas, C. I. (2020). Rainfall-runoff hydrological modeling of an agricultural watershed of Azul district, Buenos Aires. *Ciencia Del Suelo*, 38(1), 121–132. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=AR2021A00838>
- Muñoz, E., Arumí, J. L., Wagener, T., Oyarzún, R & Parra, V. (2016). Unraveling complex hydrogeological processes in Andean basins in south-central Chile: An integrated assessment to understand hydrological dissimilarity. *Hydrological Processes*, 30(26), 4934–4943. <https://doi.org/10.1002/hyp.11032>
- Negi, A., Rawat, K. S., Nainwal, A., Shah, M. C. & Kumar, V. (2021). Quality analysis of statistical and data-driven rainfall-runoff models for a mountainous catchment. *Materials Today: Proceedings*, 46, 10376–10383. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.544>
- Nonki, R. M., Lenouo, A., Lennard, C. J. & Tchawoua, C. (2019). Assessing climate change impacts on water resources in the Benue River Basin, Northern Cameroon. *Environmental Earth Sciences*, 78(20), 606. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8614-4>
- Nonki, R. M., Lenouo, A., Tshimanga, R. M., Donfack, F. C. & Tchawoua, C. (2021). Performance assessment and uncertainty prediction of a daily time-step HBV-Light rainfall-runoff model for the Upper Benue River Basin,

- Northern Cameroon. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36, 100849. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100849>
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., Dubash, N. K., Edenhofer, O., Elgizouli, I., Field, C. B., Forster, P., Friedlingstein, P., & Fuglestedt, J. J. P. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Pan, Z., Liu, P., Xu, C.-Y., Cheng, L., Tian, J., Cheng, S., & Xie, K. (2020). The influence of a prolonged meteorological drought on catchment water storage capacity: a hydrological-model perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(9), 4369–4387. <https://doi.org/10.5194/hess-24-4369-2020>
- Parra, V., Fuentes-Aguilera, P. & Muñoz, E. (2018). Identifying advantages and drawbacks of two hydrological models based on a sensitivity analysis: a study in two Chilean watersheds. *Hydrological Sciences Journal*, 63(12), 1831–1843. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1538593>
- Peng, X., Shen, H., Zhang, L., Zeng, C., Yang, G., & He, Z. (2016). Spatially continuous mapping of daily global ozone distribution (2004–2014) with the Aura OMI sensor. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(21), 702–722. <https://doi.org/10.1002/2016JD025013>
- Příbáň, K. & Ondok, J. P. (1985). Heat balance components and evapotranspiration from a sedge-grass marsh. *Folia Geobotanica et Phytotaxonomica*, 20(1), 41–56. <https://doi.org/10.1007/BF02856464>
- Rebelo, A. J., Morris, C., Meire, P. & Esler, K. J. (2019). Ecosystem services provided by South African palmiet wetlands: A case for investment in strategic water source areas. *Ecological Indicators*, 101, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.043>
- Resolución 865 de 2004. (2004, 4 de agosto). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Diario oficial N.. 45630. https://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Resolucion865_20040722.htm
- Revueltas, J. E., Zabaleta, A., Mercado, T. y Aguirre, S. (2020). Cambios en el clima local y su efecto en la regulación hídrica en microcuencas del departamento del Magdalena, Norte de Colombia. *Información Tecnológica*, 31(6), 193–206. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000600193>
- Rousis, N. I., Bade, R., Bijlsma, L., Zuccato, E., Sancho, J. V., Hernández, F., & Castiglioni, S. (2017). Monitoring a large number of pesticides and transformation products in water samples from Spain and Italy. *Environmental Research*, 156, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.013>
- Ruales, M. E. y Dávila, N. J. (2019). *Efectos del cambio del uso del suelo sobre el servicio ecosistémico hídrico de provisión en la microcuenca del río Itambi* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/9253>
- Salazar, D. A. (2016). *Procedimiento para calcular la oferta hídrica superficial por método relación lluvia-escorrentía, caso de estudio cuenca de la quebrada Apauta para el año 2015* [Tesis de especialización, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Institucional UMNG. <http://hdl.handle.net/10654/15513%0ACollections>
- Shi, W. & Wang, N. (2020). An Improved SCS-CN Method Incorporating Slope, Soil Moisture, and Storm Duration Factors for Runoff Prediction. *Water*, 12(5), 1335. <https://doi.org/10.3390/w12051335>
- Shi, Z.H., Chen, L.-D., Fang, N.-F., Qin, D.-F. & Cai, C.-F. (2009). Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. *CATENA*, 77(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.11.006>
- Singh, P. K., Mishra, S. K., Berndtsson, R., Jain, M. K. & Pandey, R. P. (2015). Development of a Modified SMA Based MSCS-CN Model for Runoff Estimation. *Water Resources Management*, 29(11), 4111–4127. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1048-1>
- Skaugen, T., Peerebom, I. O. & Nilsson, A. (2015). Use of a parsimonious rainfall-run-off model for predicting hydrological response in ungauged basins. *Hydrological Processes*, 29(8), 1999–2013. <https://doi.org/10.1002/hyp.10315>
- Soulis, K. X. (2021). Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Method: Current Applications, Remaining Challenges, and Future Perspectives. *Water*, 13(2), 192. <https://doi.org/10.3390/w13020192>

- Soulis, K. X. & Valiantzas, J. D. (2012). SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds – the two-CN system approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(3), 1001–1015. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1001-2012>
- Tajiki, M., Schoups, G., Hendricks, H. J., Najafinejad, A. & Bahremand, A. (2020). Recursive Bayesian Estimation of Conceptual Rainfall - Runoff Model Errors in Real - Time Prediction of Streamflow. *Water Resources Research*, 56(2), 1-25. <https://doi.org/10.1029/2019WR025237>
- Tegegne, G., Park, D. K. & Kim, Y. O. (2017). Comparison of hydrological models for the assessment of water resources in a data-scarce region, the Upper Blue Nile River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 14, 49–66. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.10.002>
- Tigkas, D., Vangelis, H. & Tsakiris, G. (2016). Introducing a Modified Reconnaissance Drought Index (RDIE) Incorporating Effective Precipitation. *Procedia Engineering*, 162, 332–339. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.072>
- Trigg, M. A. & Tshimanga, R. M. (2020). Capacity Building in the Congo Basin: Rich Resources Requiring Sustainable Development. *One Earth*, 2(3), 207–210. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.008>
- Tshimanga, R. M., Hughes, D. A. & Kapangaziwiri, E. (2011). Initial calibration of a semi-distributed rainfall runoff model for the Congo River basin. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(14–15), 761–774. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.07.045>
- Verma, S., Singh, P. K., Mishra, S. K., Singh, V. P., Singh, V. & Singh, A. (2020). Activation soil moisture accounting (ASMA) for runoff estimation using soil conservation service curve number (SCS-CN) method. *Journal of Hydrology*, 589, 125114. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125114>
- Wagner, P. D., Fiener, P., Wilken, F., Kumar, S. & Schneider, K. (2012). Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions. *Journal of Hydrology*, 464.465, 388–400. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.026>
- Wang, X. L. & Lin, A. (2015). An algorithm for integrating satellite precipitation estimates with in situ precipitation data on a pentad time scale. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(9), 3728–3744. <https://doi.org/10.1002/2014JD022788>
- Watson, A., Miller, J., Fleischer, M. & de Clercq, W. (2018). Estimation of groundwater recharge via percolation outputs from a rainfall/runoff model for the Verlorenvlei estuarine system, west coast, South Africa. *Journal of Hydrology*, 558, 238–254. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.028>
- Webster, R. & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists* (2nd ed.). John Wiley & Sons Ltd
- Xie, K., Liu, P., Zhang, J., Han, D., Wang, G. & Shen, C. (2021). Physics-guided deep learning for rainfall-runoff modeling by considering extreme events and monotonic relationships. *Journal of Hydrology*, 603, 127043. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127043>
- Xie, K., Liu, P., Zhang, J., Libera, D. A., Wang, G., Li, Z. & Wang, D. (2020). Verification of a New Spatial Distribution Function of Soil Water Storage Capacity Using Conceptual and SWAT Models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(3), 04020001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001887](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001887)
- Xie, K., Liu, P., Zhang, J., Wang, G., Zhang, X. & Zhou, L. (2021). Identification of spatially distributed parameters of hydrological models using the dimension-adaptive key grid calibration strategy. *Journal of Hydrology*, 598, 125772. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125772>
- Xu, P., Wang, D., Singh, V. P., Wang, Y., Wu, J., Wang, L., Zou, X., Liu, J., Zou, Y. & He, R. (2018). A kriging and entropy-based approach to raingauge network design. *Environmental Research*, 161, 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.10.038>
- Yan, B., Fang, N. F., Zhang, P. C. & Shi, Z. H. (2013). Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: An assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression. *Journal of Hydrology*, 484, 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.008>
- Zhang, S., Li, Z., Hou, X. & Yi, Y. (2019). Impacts on watershed-scale runoff and sediment yield resulting from synergetic changes in climate and vegetation. *CATENA*, 179, 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.007>

- Zhang, X., Liu, P., Zhao, Y., Deng, C., Li, Z. & Xiong, M. (2018). Error correction-based forecasting of reservoir water levels: Improving accuracy over multiple lead times. *Environmental Modelling & Software*, 104, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.02.017>
- Zhou, X., Wang, F., Huang, K., Zhang, H., Yu, J. & Han, A. Y. (2021). System Dynamics-Multiple Objective Optimization Model for Water Resource Management: A Case Study in Jiaying City, China. *Water*, 13(5), 671. <https://doi.org/10.3390/w13050671>
- Zhu, J., Sun, G., Li, W., Zhang, Y., Miao, G., Noormets, A., McNulty, S. G., King, J. S., Kumar, M. & Wang, X. (2017). Modeling the potential impacts of climate change on the water table level of selected forested wetlands in the southeastern United States. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6289–6305. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6289-2017>

ENLACE ALTERNATIVO

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/5959> (html)

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/5959/5962> (pdf)