



# **Selección de cultivos de alto valor para su implantación en una cuenca abastecedora usando la herramienta de producción hídrica de InVEST**

**Daniela Sofía Arenas González, Sandra Rocío Villamizar Amaya**

**Universidad Industrial de Santander  
Bucaramanga, Colombia**

## **Resumen**

La cuenca del río Suratá es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua potable para la población del Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) y municipios aledaños; provee aproximadamente el 50% del recurso hídrico tratado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. Sin embargo, debido a que esta es una zona con gran riqueza de minerales, principalmente el oro, se ha visto expuesta a altas cargas contaminantes generadas por el uso de mercurio y cianuro en la actividad minera informal, específicamente en su parte alta (microcuenca del río Vetás).

Esto ha resultado en la imposibilidad de aprovechar el agua eficientemente pues los niveles de contaminación llegan a ser más altos que lo permitido por la norma para su tratamiento. Por esta razón, es necesario plantear alternativas relevantes que permitan sustituir este tipo de actividades de gran impacto ambiental por otras más sostenibles. Los cultivos de alto valor (CAV) se configuran como una alternativa viable, en la medida que son un componente favorable del Producto Interno Bruto de un país. Este trabajo evalúa la pertinencia de CAV para el área de estudio mediante la implementación del modelo de producción hídrica InVEST, caracterizado por su capacidad de proveer análisis significativos y evaluación de escenarios en zonas con poca disponibilidad de información. Primero, se identifican las áreas estratégicas de producción hídrica de la cuenca con base en su caracterización climática, geomorfológica y biofísica para un escenario actual, y, con base en estos resultados, y los usos y coberturas actuales de la cuenca, se proponen áreas para la implantación de CAV. La selección de los CAV surge de un análisis de compatibilidad entre los requerimientos de los cultivos y las propiedades biofísicas del área de la cuenca. Se concluye con

un análisis de los efectos de producción hídrica generados por diferentes escenarios de uso y cobertura de suelo con CAV, para así determinar la mejor configuración espacial de estos cultivos.

**Palabras clave:** producción hídrica; cultivos de alto valor; río Suratá

### **Abstract**

*Suratá river basin is one of the main sources of drinking water supply for the population of the Bucaramanga Metropolitan Area (AMB) and surrounding municipalities; it provides approximately 50% of the water resources treated by the Bucaramanga Metropolitan Aqueduct. However, because this is an area with great mineral abundance, mainly gold, it has been exposed to high pollution levels generated by the use of mercury and cyanide in informal mining activities, specifically in the upper part (Vetas River micro-watershed).*

*This has resulted in the impossibility of using the water efficiently because the pollution levels are higher than what is allowed by law for its treatment. For this reason, it is necessary to propose relevant alternatives to replace this type of high environmental impact activities with more sustainable ones. High-value crops (HVC) are a viable alternative, since they are a favorable component of a country's Gross Domestic Product. This paper evaluates the relevance of HVC for the study area by implementing the InVEST water yield model, characterized by its ability to provide meaningful analysis and evaluation of scenarios in areas with limited availability of information. First, the strategic water yield areas of the basin are identified based on their climatic, geomorphological and biophysical characterization for a current scenario, and based on these results, and the current land uses and land covers of the basin, areas for the implementation of HVCs are proposed. The selection of HVCs emerges from a compatibility analysis between crop requirements and the biophysical properties of the watershed area. It concludes with an analysis of the water production effects generated by different land use and land cover scenarios with HVCs, to determine the best spatial configuration for these crops.*

**Keywords:** water yield; high-value crops; Suratá river

## **1. Introducción**

La cuenca del río Suratá es una de las principales fuentes de abastecimiento hídrico para el área metropolitana de Bucaramanga y municipios aledaños a la cuenca (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2021), aportando agua potable a más de 1'000.000 de habitantes del departamento de Santander, Colombia (DANE, 2018). Sin embargo, gracias a la gran riqueza de minerales, como el oro, que se presenta principalmente en la microcuenca del río Vetas, esta ha sido expuesta a actividades inadecuadas como la minería artesanal, generando contaminación del recurso hídrico debido al aumento exacerbado de los niveles de mercurio y cianuro (Antecedentes - Santurbán Avanza, 2018; CDMB, 2022), lo cual no solo ha limitado el uso del recurso para el abastecimiento humano, sino también han generado afectaciones a la fauna íctica de la parte baja de la cuenca (Peña, 2020; Vanguardia, 2023).

Por esto, es fundamental la búsqueda de alternativas que permitan sustituir actividades de gran impacto ambiental, por otras que sean compatibles con el ordenamiento territorial y ambiental, y a su vez, brinden sustento económico digno a la población. Una opción es la implementación de cultivos de alto valor (CAV), estrategia utilizada en casos de estudio para la sustitución de cultivos ilícitos (Céspedes-Prieto et al., 2020; Sierra Pérez, 2016; Zuluaga-Mogollón et al., 2019). Aunque es claro el beneficio que pueden tener los CAV en el mejoramiento de la calidad del agua, se requiere evaluar cuál es el efecto de estas coberturas en la oferta hídrica de esta cuenca abastecedora, por lo cual se requiere conocer tanto los requerimientos hídricos (Arenas Jiménez, 2019; Bautista et al., 2015; Tovar-Hernández et al., 2017), así como la aptitud de uso de cada cultivo que se quiera implementar (Universidad Industrial de Santander, 2022). De esta forma, se requiere la utilización de una herramienta de modelación apropiada que permita estimar la producción hídrica en la cuenca, teniendo en cuenta que se pueda realizar una evaluación de manera simplificada y sin gran cantidad de requerimientos (Zaks, 2019), lo cual es útil en zonas con poca disponibilidad de datos climatológicos y de suelos como es el caso de nuestro país.

Es así como en este trabajo, el cual hace parte de un proyecto de investigación de Maestría, se presentan los avances de investigación relacionados con la selección de cultivos de alto valor para la cuenca del río Suratá, implementando una herramienta de producción hídrica. Actualmente el proyecto se encuentra en su primera fase, identificando las áreas estratégicas de producción hídrica a través del montaje y calibración del modelo hidrológico. Posterior a esto, se realizarán las configuraciones de escenarios de uso y cobertura de suelo implementando CAV, a través de una correcta caracterización de los cultivos; y, finalmente, se seleccionará la distribución espacial que presente un mejor comportamiento en la producción hídrica modelada.

## 2. Metodología

### 2.1. Descripción de la zona de estudio

La cuenca del río Suratá se distribuye en la subcuenca del río Suratá que consta de las microcuencas Suratá Alto, Suratá Bajo, Vetas y Charta, cuenta con un área aferente de 698 km<sup>2</sup> y se efectúan una captación de caudal mínima de 1980 l/s que abastece la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) Bosconia; y la microcuenca del río Tona, que tiene un área aferente de 194 km<sup>2</sup> y se captan caudales entre 750 y 1400 l/s. Esta última presenta mayor aporte tanto en área y caudal, garantizando agua a menor costo por su mejor calidad y aducción por gravedad; además, abastece a las PTAP la Flora y Morrorrico a través del embalse de Bucaramanga, el cual fue construido para ofrecer seguridad hídrica a la población del área metropolitana de Bucaramanga en épocas de sequía o en periodos críticos cuando se presentan altos niveles de contaminación en la subcuenca del río Suratá (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2021; CDMB, 2022) (Ilustración 1).

De acuerdo con lo anterior, este trabajo se enfocará únicamente en la subcuenca del río Suratá debido a que es en la parte alta de esta unidad hídrica (microcuenca del río Vetas) donde se originan los problemas de contaminación por mercurio, donde históricamente los niveles han

sobrepasado los 0.001 mg/L permitido para que sea tratado para abastecimiento (MinVivienda, 2007). No obstante, debido a las adecuadas condiciones de calidad y cantidad de agua ofertadas en la cuenca del Tona, no se considera viable proponer la implantación de CAV en esta zona.

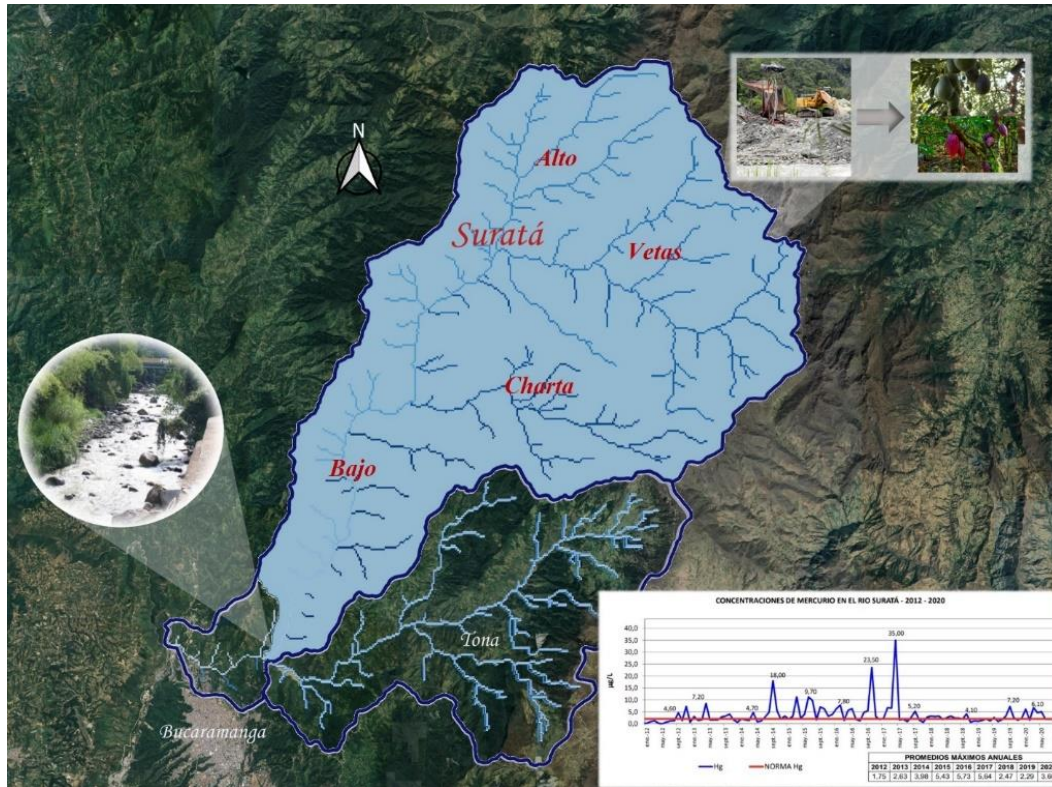


Ilustración 1. Delimitación de la zona de estudio (Fuente: Adaptación por el autor)

## 2.2. Esquema metodológico

Este trabajo se encuentra enmarcado en un proyecto de Maestría en Ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander. Tiene como objetivo seleccionar cultivos de alto valor que puedan ser implantados en la cuenca del río Suratá, con base en datos obtenidos de un modelo de producción hídrica. Para llevar a cabo su realización, el trabajo consta de 3 fases metodológicas, de la cuales actualmente se está ejecutando la primera fase.

En la **primera fase** se tiene como objetivo identificar las áreas estratégicas de producción hídrica dentro de la cuenca del río Suratá, por lo cual, se implementa el modelo de producción hídrica estacional (Seasonal Water Yield - SWY) de InVEST, el cual fue escogido debido a que permite simular el comportamiento hídrico de la cuenca, generando mapas rasterizados, con información por pixeles de flujo base, flujo rápido y recarga local (Zaks, 2019), y, que comparado con modelos más complejos como SWAT, puede ofrecer estimaciones similares de producción hídrica, con menor cantidad de insumos de entrada y mejor visualización espacial (Cong et al., 2020).

Para esto, es necesario realizar inicialmente la gestión de los insumos de entrada requeridos por el modelo, basado en datos climáticos, geomorfológicos y características biofísicas (Tabla 1) (Natural Capital Project, 2022). Posteriormente, se corre el modelo para las condiciones actuales; se realiza un análisis de sensibilidad basado en una revisión bibliográfica con artículos referentes al uso de la herramienta InVEST-SWY, determinando los parámetros con los cuales se presentan mayores variaciones en los resultados; y, teniendo en cuenta estos, se realiza una calibración manual del modelo comparando los datos obtenidos con datos observados en la zona de estudio. A partir de los resultados obtenidos, se realiza un análisis por píxeles para identificar las zonas donde se presentan mayores valores de producción hídrica.

Insumo	Formato
Directorio precipitación mensual	Carpeta con 12 archivos .tif [mm]
Directorio ETO mensual	Carpeta con 12 archivos .tif [mm]
Modelo digital de elevación	Ráster .tif [m]
Mapa de uso y cobertura de suelo	Ráster .tif [lucode]
Grupo hidrológico del suelo	Ráster .tif [1-4 à A-D]
Área de interés	Shapefile .shp
Tabla biofísica (kc à coeficiente de evapotranspiración de cultivo, CN à número de curva)	.csv
Tabla de eventos de lluvia (mes, #eventos)	.csv
Parámetros propios del modelo: α (asociado a las precipitaciones), β (asociado a topografía y suelos), γ (asociado a recarga local)	Número (valores por defecto del modelo α:1/12, β:1, γ:1)

**Tabla 1.** Insumos requeridos por el modelo (Fuente: adaptado de Guía de uso de InVEST (Zaks, 2019))

Para la **segunda fase** se configuran diferentes escenarios de uso y cobertura de suelos para la zona de estudio en los cuales se implementen CAV. Para esto, es importante identificar primero aquellas áreas estratégicas de preservación y protección, así como las zonas de conflictos, con el fin de no intervenir en estas, ni en las identificadas en la primera fase, durante la configuración de los escenarios. Se identifican a nivel nacional los CAV a partir de una revisión de literatura, en documentación técnica, científica y social, como el documento “Aportes a la Agenda del Plan Nacional de Desarrollo” (Universidad Industrial de Santander, 2022), o el aplicativo “Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria - SIPRA-UPRA” (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria, 2023). Posteriormente, para cada uno de los cultivos, se realiza una caracterización teniendo en cuenta los requerimientos climáticos, de pendiente, tipo de suelo, así como hidrológicos a partir de parámetros como el coeficiente de evapotranspiración de cultivo  $kc$ , el número de curva  $CN$ , demanda y/o huella hídrica, para identificar aquellos aptos para la zona de estudio. A partir

de esto, se proponen las zonas donde se realiza la implantación de los cultivos en diferentes configuraciones, y se realizan los mapas de uso y cobertura de suelo implementando los CAV.

Finalmente, en la **tercera fase** se analizan cada una de las configuraciones realizadas. Para esto, se corre el modelo InVEST-SWY variando únicamente la tabla biofísica y el mapa de uso y cobertura de suelo, correspondientes a los mapas de las diferentes configuraciones realizadas. Se realiza el post-procesamiento de los datos obtenidos de cada corrida; y, por último, se hace el análisis de los resultados espaciales para cada uno de los escenarios, identificando las áreas críticas y favorables de producción hídrica de acuerdo con los usos de suelo y coberturas que presentan, para así seleccionar la distribución espacial con mejores aportes de agua.

### 3. Avances de los resultados

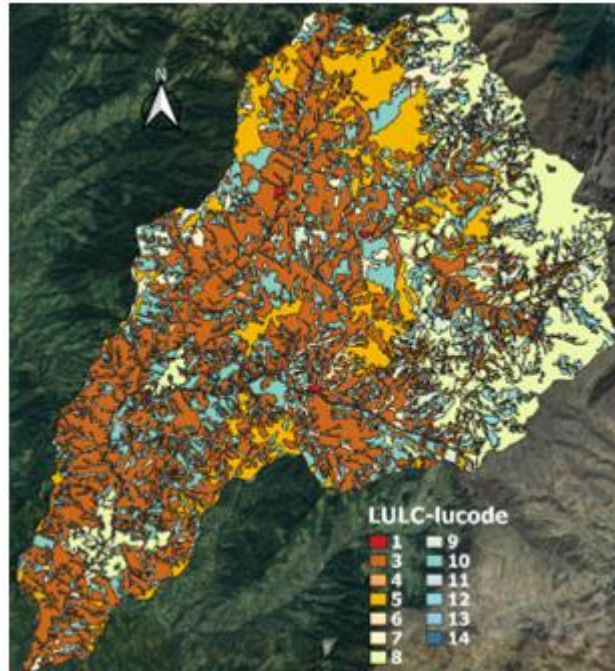
Actualmente, este proyecto se encuentra en ejecución en la primera fase, específicamente en la gestión de los insumos de entrada del modelo. Primeramente, se escogió una ventana de tiempo de 30 años, de 1990 a 2019 debido a que cuenta con información disponible de precipitación para aproximadamente 9 estaciones, y de caudales para las estaciones Majadas y Puente Pánega. Para la recolección de los insumos del modelo se han tenido en cuenta algunas fuentes recomendadas por la guía de usuario de InVEST, así como de entidades relevantes para la región de estudio como Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), entre otras. Además, es necesario tener en cuenta que todos los datos espaciales requeridos (rásteres y shapefiles) deben tener un mismo sistema de referencia de coordenadas, por lo que, dada a la ubicación de la zona de estudio, se usa el sistema "MAGNA-SIRGAS/Colombia Bogota zone".

Los datos de precipitación mensual promedio se obtuvieron a partir del Sistema de Información para la gestión de datos Hidrológicos y Meteorológicos – DHIME (IDEAM, 2024). Se descargaron datos de precipitación diaria para la ventana de tiempo de 11 estaciones cercanas alrededor y dentro de la zona de estudio (Ilustración 2). Posteriormente, se analizaron los porcentajes de datos faltantes, con lo cual se descartaron 2 estaciones que presentaban más del 10% de vacíos, y se realizó una imputación de datos faltantes para 9 estaciones (con cruz roja en Ilustración 2) mediante un código en RStudio, utilizando el paquete reddPrec, el cual calcula un promedio de precipitaciones de 10 estaciones cercanas de acuerdo con la altitud, longitud y latitud (Serrano-Notivoli et al., 2017). Finalmente, se obtienen las precipitaciones promedio mensuales para cada una de las estaciones y se crean los rásteres con la herramienta de multilevel-B Spline en QGIS.



**Ilustración 2.** Estaciones de precipitación y caudales cercanas a la zona de estudio

El mapa de uso y cobertura de suelo se obtuvo del “Portafolio de intervenciones potenciales en el territorio del fondo de agua región metropolitana de Bucaramanga – Soto Norte que permitan mantener y/o potenciar los servicios ecosistémicos de las subcuencas de los ríos Surata y río de Oro”, el cual presenta las tipologías de uso y cobertura de suelo en la zona de estudio realizado mediante la metodología CORINE Land Cover, con resolución espacial de 1:25.000 en formato tipo ráster (Ilustración 3) unificando los tipos de usos y coberturas de suelo a 14 (Tabla 2).



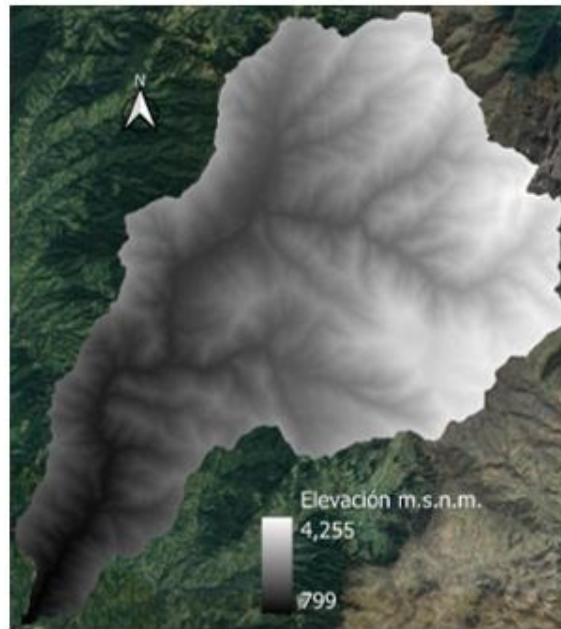
**Ilustración 3.** Mapa de uso y cobertura de suelos (Fuente: Adaptado de CORAMBIENTE)

Cobertura y uso del suelo	lucode
Zonas Urbanizadas	1
Cultivos transitorios	2
Pastos	3
Áreas agrícolas heterogéneas	4
Bosques	5
Bosque galería y ripario	6
Plantación forestal	7
Herbazal	8
Arbustal	9
Vegetación secundaria y/o en transición	10
Áreas abiertas o con poca vegetación	11
Zonas Pantanosas	12
Ríos	13
Lagunas	14

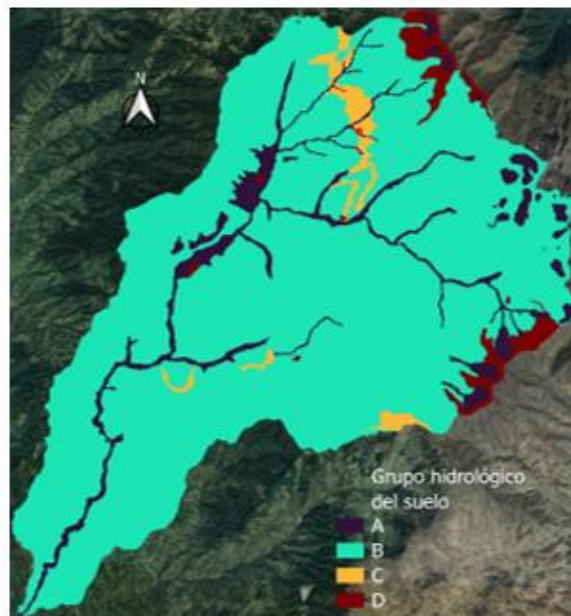
**Tabla 2.** Coberturas y usos de suelo unificados (Fuente: Adaptado de CORAMBIENTE)

El modelo de elevación digital es un mapa tipo ráster donde cada pixel representa el valor de su elevación sobre el nivel del mar, el cual se obtuvo de datos satelitales de Alaska Satellite Facility, con resolución de pixel de 12.5 metros (ALOS PALSAR – Radiometric Terrain Correction | Alaska Satellite Facility, s. f.) (Ilustración 4). Por otro lado, en el mapa de grupo hidrológico del suelo se

describe el potencial de escorrentía de diferentes tipos de suelo, en donde el grupo A tiene el menor potencial de escorrentía y D tiene el mayor (Natural Capital Project, 2022); este se obtuvo del Plan de Manejo y Ordenación de la cuenca del Alto Lebrija, el cual presenta una resolución espacial de 1:25.000, y se convirtió, por medio de QGIS, a ráster con tamaño de pixel de 12.5 metros (CDMB, 2022) (Ilustración 5).



**Ilustración 4.** Modelo de elevación digital adaptado de ALOS PALSAR



**Ilustración 5.** Grupo hidrológico del suelo adaptado de POMCA, 2022

Como avance de la segunda fase, a nivel nacional se han identificado algunos cultivos de alto valor. Dentro de estos se encuentran principalmente el cacao, el café, el aguacate Hass, uchuva, palma de oliva, entre otros (Lozano, 2021; Rodríguez et al., 2021). El caso del aguacate Hass se puede destacar ya que es uno de los productos a nivel nacional que, debido al incremento de los indicadores de producción y exportación, ha logrado posicionar a Colombia como el cuarto productor en el mercado internacional (PDEA, 2020), exportando en el año 2021 cerca de 99.000 toneladas por un valor de USD 206.593.509 (MinAgricultura, 2022). Para el cacao se reportaron exportaciones con ventas de USD 91,8 millones de enero a septiembre de 2021 (MinAgricultura, 2021a), y para el café se ha registrado más de USD 2.600 millones en exportaciones (MinAgricultura, 2021b).

En cuanto a la tercera fase, se ha realizado una revisión bibliográfica con el fin de conocer el análisis debido a los resultados obtenidos con el modelo, los cuales permiten identificar un método de post-procesamiento para los datos de salida, utilizando herramientas como QGIS y Excel. De manera general, se pueden identificar las variaciones relativas de producción hídrica (flujo rápido + flujo base) a escala anual para cada uno de los escenarios propuestos, con el cual se analizan las zonas en donde se configuraron los CAV, y así comparar entre los diferentes escenarios y determinar cuál presenta mayor producción hídrica. Asimismo, es posible realizar el análisis de datos a escala mensual del flujo rápido, identificando cómo varía para cada escenario la producción hídrica durante cada mes del año. Es necesario tener en cuenta que es posible obtener menores valores de producción hídrica entre los escenarios propuestos y el escenario actual, ya que los cambios de uso y cobertura de suelo son cultivos, los cuales presentan una mayor evapotranspiración, y a su vez mayor demanda hídrica (Wang et al., 2023); por esto, el análisis de los resultados se realiza también con respecto a los requerimientos del recursos para el abastecimiento de la población.

#### 4. Conclusiones

Al proponer alternativas como la implementación de cultivos de alto valor para sustituir y/o mitigar la realización de actividades que generan gran impacto ambiental en cuencas, como la minería, es fundamental tener en cuenta las implicaciones que los cambios de uso y cobertura de suelo conllevan a la producción hídrica de estas fuentes abastecedoras. De tal manera, la modelación hidrológica permite simular el comportamiento de diferentes servicios ecosistémicos, siendo, en este caso, la evaluación de las afectaciones generadas en la producción hídrica de la cuenca del río Suratá debido a los diferentes escenarios que se van a configurar, implementando CAV. Sin embargo, como primera medida, es necesario gestionar los insumos requeridos por el modelo escogido, InVEST-SWY. Debido a que el presente trabajo se encuentra ejecutando la primera fase, es fundamental destacar que dentro de la gestión de los insumos de entrada no solo es la búsqueda de los datos, sino también la comparación entre distintos insumos, escoger los más adecuados en cuanto a la calidad y veracidad de la información, y el procesamiento en los formatos requeridos por el modelo. Lo anterior, con el fin de que las entradas del modelo generen resultados con la menor incertidumbre posible, ya que, dependiendo de la calidad de los datos de entrada, depende la calidad de los resultados obtenidos.

Finalmente, es importante tener en cuenta que, al realizar cambios de uso de suelo con implantación de cultivos, no solo se debe conocer la aptitud del suelo y clima, sino también la demanda hídrica que estos presentan, con el fin de evitar afectaciones negativas como el desabastecimiento o estrés hídrico.

## 5. Referencias

- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. (2021, octubre 13). Fuentes de Agua. <https://www.amb.com.co/amb/conoce-amb/nuestros-procesos/procesos-operativos/fuentes-de-agua/>
- ALOS PALSAR - Radiometric Terrain Correction | Alaska Satellite Facility. (s. f.). Recuperado 3 de junio de 2024, de <https://asf.alaska.edu/datasets/daac/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/>
- Antecedentes-Santurbán Avanza. (2018). <https://santurban.minambiente.gov.co/index.php/2-santurban/194-antecedentes>
- Arenas Jiménez, C. F. (2019). Estimación de la huella hídrica que se genera a partir de la producción agrícola del cultivo predominante en la zona alta de la Cuenca de la Quebrada La Angula. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/6242>
- Bautista, E. A. S., Roa, J. R. V., & Ortega, J. A. T. (2015). Estimación de la huella hídrica para un cultivo de pitahaya amarilla (*Selenicereus megalanthus*). *Publicaciones e Investigación*, 9, 135-146. <https://doi.org/10.22490/25394088.1439>
- CDMB. (2022). Planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas - POMCAS. CDMB. <http://www.cdm.gov.co/cdm/tematicas/pomcas>
- Céspedes-Prieto, N., Carda-Castello, C.-C., Cervantes-Estrada, C.-E. L. C., & Gil-Noreña, J. (2020). Análisis del Desarrollo Innovador para el Aprovechamiento de la (*Guadua angustifolia* Kunth) en la Sustitución de Cultivos Ilícitos. *Ciencia en Desarrollo*, 11(2), 97-109. <https://doi.org/10.19053/01217488.v11.n2.2020.11518>
- Cong, W., Sun, X., Guo, H., & Shan, R. (2020). Comparison of the SWAT and InVEST models to determine hydrological ecosystem service spatial patterns, priorities and trade-offs in a complex basin. *Ecological Indicators*, 112, 106089. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106089>
- DANE. (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda. <https://sitios.dane.gov.co/cnpv/#!/>
- IDEAM. (2024). Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos. DHIME. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- Lozano, J. (2021, junio 18). Estos son los productos santandereanos con más exportaciones. *Radio Nacional de Colombia*. <https://www.radionacional.co/actualidad/campo-colombiano/campo-cinco-productos-santandereanos-con-mas-exportaciones>
- MinAgricultura. (2021a). Colombia registró la mayor producción de cacao de la historia, en el último año cacaotero. <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/Colombia-registr%C3%B3-la-mayor-producci%C3%B3n-de-cacao-de-la-historia,-en-el-%C3%BAltimo-a%C3%B1o-cacaotero.aspx>
- MinAgricultura. (2021b). "La cosecha cafetera para este 2021 podría cerrar en \$10 billones de pesos": Ministro Rodolfo Zea Navarro. [https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/%E2%80%9C-La-cosecha-cafetera-para-este-2021-podr%C3%ADa-cerrar-en-\\$10-billones-de-pesos%E2%80%9D-Ministro-Rodolfo-Zea-Navarro-.aspx](https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/%E2%80%9C-La-cosecha-cafetera-para-este-2021-podr%C3%ADa-cerrar-en-$10-billones-de-pesos%E2%80%9D-Ministro-Rodolfo-Zea-Navarro-.aspx)
- MinAgricultura. (2022). El aguacate Hass colombiano se mantiene como protagonista en el Súper Bowl, el más grande evento deportivo de Estados Unidos. <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/El-aguacate-Hass-colombiano-se-mantiene-como-protagonista-en-el-S%C3%BAper-Bowl,-el-m%C3%A1s-grande-evento-deportivo-de-Estados-Unido.aspx>
- MinVivienda. (2007). Resolución 2115-2007 | Minvivienda. <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-2115-2007>

- Natural Capital Project. (2022). InVEST User Guide. <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/index.html>
- PDEA. (2020). Plan Departamental de Extensión Agropecuaria 2020-2023.
- Peña, G. (2020). La megaminería en el páramo de Santurbán. Revista Encuentros, No. 1. <https://www.indepaz.org.co/wp-content/uploads/2020/04/Revista-Encuentros.-Abril-del-2020.pdf>
- Rodríguez, D., Luna, L., Campo, J., Guerrero, G., Meneses, D., Ramos, H., & Rincón, L. (2021). Tipología de productores de uchuva en el departamento de Nariño, Colombia | Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/2766>
- Serrano-Notivoli, R., de Luis, M., & Beguería, S. (2017). An R package for daily precipitation climate series reconstruction. Environmental Modelling & Software, 89, 190-195. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.11.005>
- Sierra Pérez, D. C. (2016). El cacao como producto líder en la sustitución de cultivos ilícitos en el proceso de posconflicto. <http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/15777>
- Tovar-Hernández, N. A., Trujillo-González, J. M., Muñoz-Yáñez, S. I., Torres-Mora, M. A., & Zárate, E. (2017). Evaluación de la sostenibilidad de los cultivos de arroz y palma de aceite en la cuenca del río Guayuriba (Meta, Colombia), a través de la evaluación de huella hídrica. Orinoquia, 21(1), Article 1. <https://doi.org/10.22579/20112629.394>
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. (2023). SIPRA. <https://sipra.upra.gov.co/nacional>
- Universidad Industrial de Santander. (2022). Aportes a la agenda del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026.
- Vanguardia. (2023, agosto 18). Contaminación de mercurio Santander río Suratá: Continúan los reportes de contaminación de mercurio en los afluentes del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. <https://www.vanguardia.com/economia/local/continuan-los-reportes-de-contaminacion-de-mercurio-en-los-afluentes-del-acueducto-metropolitano-de-bucaramanga-YX7246540>
- Wang, Z., Li, Q., Liu, L., Zhao, H., Ru, H., Wu, J., & Deng, Y. (2023). Spatiotemporal Evolution and Attribution Analysis of Water Yield in the Xiangjiang River Basin (XRB) Based on the InVEST Model. Water, 15(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/w15030514>
- Zaks, I. (2019, abril 1). InVEST [Text]. Natural Capital Project. <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>
- Zuluaga-Mogollón, M. V., Zuluaga-Mogollón, M. del P., & Rozo-Leguizamón, Y. (2019). Arvejas Obonuco Andina y Obonuco San Isidro como alternativas productivas para la sustitución de cultivos ilícitos en el sur de Colombia. Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.19053/20278306.v10.n1.2019.10009>

## Sobre los autores

- **Daniela Sofía Arenas González:** Ingeniera Civil, Estudiante de Maestría en Ingeniería Civil. [daniela2228529@correo.uis.edu.co](mailto:daniela2228529@correo.uis.edu.co)
- **Sandra Rocío Villamizar Amaya:** Ingeniera Civil, M.Sc. Environmental Systems, Ph.D. Environmental Systems. Profesor titular Universidad Industrial de Santander. [svillam@uis.edu.co](mailto:svillam@uis.edu.co)

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2024 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

