

Artículo de investigación

Cómo citar: M. Herrera; L. Baquero; D. Méndez. “Viabilidad de uso de un sistema integrado de producción agropecuaria de tipo VAC como estrategia de mitigación de inundaciones para la cuenca alta del río Caquetá”. *Inventum*, vol. 17, n.º 32, pp. 68-77, enero-junio 2022. doi: 10.26620/uniminuto.inventum.17.32.2022.68-77

Editorial: Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO.

ISSN: 1909-2520
eISSN: 2590-8219

Fecha de recibido: 1 de febrero de 2022
Fecha de aprobado: 1 de marzo de 2022
Fecha de publicación: 15 de marzo de 2022

Conflicto de intereses: los autores han declarado que no existen intereses en competencia.

Viabilidad de uso de un sistema integrado de producción agropecuaria de tipo VAC como estrategia de mitigación de inundaciones para la cuenca alta del río Caquetá

Viability of use of an integrated agricultural production system of VAC type as a flood mitigation strategy for the upper Caquetá river basin

Viabilidade da utilização de sistema integrado de produção agrícola tipo VAC como estratégia de mitigação de cheias para a bacia superior do rio Caquetá

Resumen

Los crecientes desastres naturales en todo el mundo han venido generando pérdidas económicas, ambientales y humanas. En este artículo se presenta un análisis preliminar, con herramientas computacionales, de series históricas de la cuenca alta del Río Caquetá, tanto de caudales IDEAM como de precipitación ERA5. La mitigación de inundaciones debe ir de la mano con la mitigación de las sequías, debido a que si se conocen los regímenes históricos de lluvias mensuales y sus cantidades, se pueden establecer sistemas de embalses que sirvan de infraestructura para la producción agropecuaria y que, al mismo tiempo, promuevan la infiltración en la cuenca alta, de manera que se aumente la infiltración en los acuíferos al máximo para mitigar así los fenómenos de inundación y sequía, al tiempo que se generan procesos productivos sostenibles. Para ello, la primera aproximación debe iniciarse con el análisis de datos mediante herramientas computacionales. En este caso, se empleó la herramienta computacional WEAP, utilizando, como datos de entrada, los datos de reanálisis ERA5 en cuanto a datos de lluvia, para obtener un histórico de lo sucedido en la cuenca en esta ventana temporal y para los datos de caudal los datos del IDEAM.

Palabras clave: ERA5, WEAP, hidrología, sistemas VAC.

María Daniela Herrera Calderón
Universidad el Bosque. Semillero de Hidrología Computacional, Grupo de investigación Choc lzone.
e-mail: mdherrera@unbosque.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8801-5124>

Laura Daniela Baquero Espinosa
Universidad el Bosque. Semillero de Hidrología Computacional, Grupo de investigación Choc lzone.
e-mail: lbaqueroe@unbosque.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5994-7758>

Daniel Santiago Méndez Hortua
Universidad el Bosque. Semillero de Hidrología Computacional, Grupo de investigación Choc lzone.
e-mail: dmendezn@unbosque.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3202-8257>



Abstract

Increasing number of natural disasters around the world have been generating economic, environmental, and human losses. This article aims to perform a preliminary analysis with computational tools, with the purpose of analyzing historical series of the upper Caquetá River basin for IDEAM flows and ERA5 precipitation. Flood mitigation should go hand in hand with drought mitigation, because if the historical monthly rainfall regimes and their amounts are known, reservoir systems can be established to serve as infrastructure for agricultural production and at the same time promote infiltration in the upper basin, The first approach should start with the analysis of data with computational tools. For this purpose, the WEAP computational tool was used, using the ERA5 reanalysis data as input data for rainfall data in order to have a history of what happened in the basin in this temporal period and IDEAM flow data as input information.

Key words: ERA5, WEAP, hydrology, VAC systems.

Resumo

Este artigo visa realizar uma análise preliminar utilizando ferramentas computacionais a fim de analisar séries históricas para a bacia superior do rio Caquetá tanto para as vazões IDEAM quanto para a precipitação ERA5. A mitigação das inundações deve ir de mãos dadas com a mitigação da seca, pois se os regimes históricos de chuvas mensais e suas quantidades forem conhecidos, os sistemas de reservatórios podem ser estabelecidos para servir de infra-estrutura para a produção agrícola e ao mesmo tempo promover a infiltração na bacia superior, A primeira abordagem deve começar com a análise de dados usando ferramentas computacionais. Para este fim, foi utilizada a ferramenta computacional WEAP, usando os dados de reanálise ERA5 como dados de entrada para dados de chuva, a fim de ter um histórico do que aconteceu na bacia nesta janela de tempo, e dados IDEAM para dados de fluxo.

Palavras-chave: ERA5, WEAP, hidrologia, sistemas VAC

I. INTRODUCCIÓN

La prevención de desastres ocupa un lugar prioritario en las agendas gubernamentales y en las instituciones no gubernamentales, dado su impacto negativo en la sociedad en general y en la economía [1]. Tal es el caso del riesgo y la vulnerabilidad que se evidencian cuando ocurren desastres naturales, aunadas a la baja capacidad de respuesta de las instituciones encargadas de prevenirlos y mitigarlos [2]. Para procurar la seguridad humana, es esencial que la prevención tenga un papel mucho más importante en la agenda estratégica de la región, de forma que se pueda adaptar y, sobre todo, entender los extremos cambios de la naturaleza de manera local [3]. Por consiguiente, es prioritario tener estrategias de prevención de fenómenos extremos que, a la vez, permitan maximizar la productividad agropecuaria en las áreas rurales en el país, para que la estrategia sea sostenible en el tiempo [4].

Las inundaciones y las sequías son las amenazas meteorológicas e hidrológicas más importantes, debido a la magnitud de los daños que causan [5]. Por tal razón, durante las últimas décadas ha crecido el interés por distintas estrategias para enfrentarlas, que han contribuido a reducir el hambre y la cantidad de fenómenos extremos [6].

Los sistemas VAC, cuyo nombre proviene del vietnamita (V: *vao*, 'jardín'; A: *ao*, 'estanque'; C: *chuong*, 'animales domésticos'), son sistemas productivos integrados utilizados en Vietnam para maximizar la producción de alimentos por unidad de área [4].

En su metodología, estos sistemas priorizan el uso de embalses en tierra, lo que permite el almacenamiento de agua en la parte alta de la cuenca, generando así sistemas productivos sostenibles dentro de una economía rural, sin el uso de insumos externos. Al mismo tiempo, es posible retener el agua un mayor tiempo dentro del estanque, de modo que, si este estanque se construye sobre el terreno, se maximiza la infiltración al subsuelo, con lo cual mejoran los ciclos hidrológicos. De esta manera, el agua ya no escurrirá a velocidades altas, que es lo que causa inundaciones, y aumentará la infiltración a los acuíferos subterráneos, cuyo déficit es el causante de las sequías [21].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada consistió en una serie de tres fases ordenadas (figura 1), empezando por la recopilación de información de caudal de una estación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), y de lluvia de los datos de reanálisis de ERA5.

Se descargó información adicional desde ERA5, para la entrada de datos de la herramienta WEAP mensual, desde el año 1996, fecha en la que el IDEAM inició mediciones de caudal, debido a que se cuenta con la información histórica completa y dentro de los límites de la cuenca. La descarga de las variables climatológicas se realizó desde la base de datos de Copernicus, con periodicidad mensual para los años y meses que se requerían para el área de estudio. El tipo de datos escogido fue NetCDF, archivo que lee directamente la herramienta computacional WEAP. Se delimitó la cuenca, hasta el punto de medición de caudal, y se ingresó la información climatológica de ERA5 a WEAP.

Los datos de topografía se descargaron de la misión Alos Palsar, high resolution beam FBS, que es la que tiene mayor resolución para hacer el mapa de topografía de la cuenca. Esta misión tiene 12,5 metros por pixel de resolución espacial. Se realizó un mapa en QGIS que se puede observar en apartado de resultados.

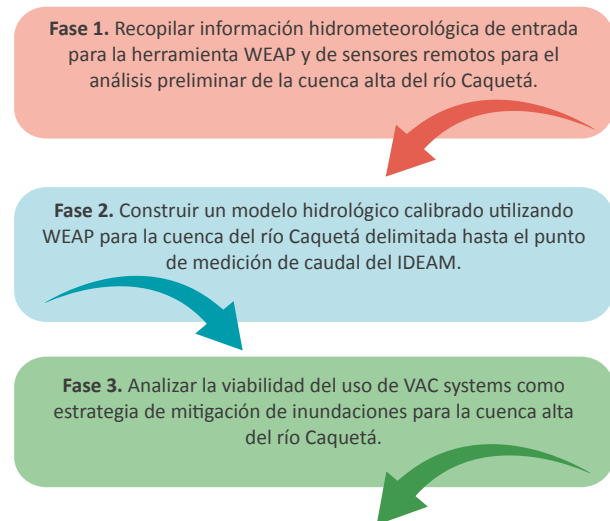


Figura 1. Fases de elaboración de metodología.

Fuente: Elaboración propia.

A. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el departamento de Putumayo, ubicado en la parte sur de Colombia, en la región Amazónica, localizado entre los 0° 26' 18" y los 0° 27' 37" de latitud norte, y entre los 73° 39" y los 77° 4' 58" de longitud oeste. Cuenta con una superficie de 24.885 km² y una población de 341.513 habitantes, según datos obtenidos de la Gobernación del Putumayo.

Limita por el norte con los departamentos de Nariño y Cauca, y con el río Caquetá, que lo separa del departamento de Caquetá; por el este con el departamento del Caquetá;

por el Sur con el departamento del Amazonas y los ríos Putumayo y San Miguel, que lo separan de las repúblicas de Perú y Ecuador; y por el oeste con el departamento de Nariño. Su capital es Mocoa, que tiene una población de aproximadamente 58.938 habitantes [18].

B. Obtención de datos

Los datos de precipitación, evapotranspiración y temperatura de la cuenca del río Caquetá (desde 1996 hasta el 2020) fueron obtenidos de ERA5-Land. Según el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts [7], ERA5-Land es un conjunto de datos que viene con una serie de mejoras que lo hacen más preciso para todo tipo de aplicaciones terrestres. En particular, ERA5-Land funciona con una resolución mejorada en comparación con ERA5 (9 km frente a 31 km). La frecuencia temporal de la salida es horaria y los campos están enmascarados para todos los océanos, lo que los hace más fáciles de manejar. Además, ERA5-Land es una repetición del componente terrestre del reanálisis climático de ERA5, pronosticado por los campos meteorológicos de ERA5 [7].

Estos datos se encuentran disponibles en frecuencias sub-diarias y mensuales. Sus parámetros de datos se etiquetan como análisis y pronósticos cortos (24 horas) iniciados una vez al día a partir de análisis a las 00 UTC. Es importante aclarar que la convención que utiliza ERA5-Land difiere de la de ERA5.

En este caso, los datos fueron descargados y leídos en la herramienta WEAP, con el fin de realizar un modelo hidrológico que explicara el funcionamiento de la cuenca alta del río Caquetá. Conocer este funcionamiento permitirá saber cómo puede operar un sistema integrado de producción agropecuaria como el VAC.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Recopilar información hidrometeorológica de entrada para la herramienta WEAP y de sensores remotos para el análisis preliminar de la cuenca alta del río Caquetá.

La descarga de datos de lluvia consiste en el agua líquida y congelada acumulada, compuesta por lluvia y nieve, que cae a la superficie terrestre. Es la suma de la precipitación a gran escala y la precipitación convectiva. La precipitación a gran escala es generada por el esquema de nubes en el Sistema Integrado de Pronóstico (IFS) del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). El esquema de nubes representa la formación y

disipación de nubes y precipitaciones a gran escala debido a cambios en las cantidades atmosféricas (como presión, temperatura y humedad) pronosticadas directamente por el IFS a escalas espaciales de la cuadrícula o mayores. La precipitación convectiva es generada por el esquema de convección en el IFS, que representa la convección a escalas espaciales más pequeñas que la cuadrícula. Este parámetro no incluye la niebla, el rocío o la precipitación que se evapora en la atmósfera antes de aterrizar en la superficie de la Tierra [7].

Este parámetro es la cantidad total de agua acumulada durante un período de tiempo particular que depende de los datos extraídos. Las unidades de este parámetro son la profundidad en metros de agua equivalente. Es la profundidad que tendría el agua si se distribuye uniformemente sobre la caja de rejilla. Para que los datos sean leídos por WEAP, se deben convertir a milímetros.

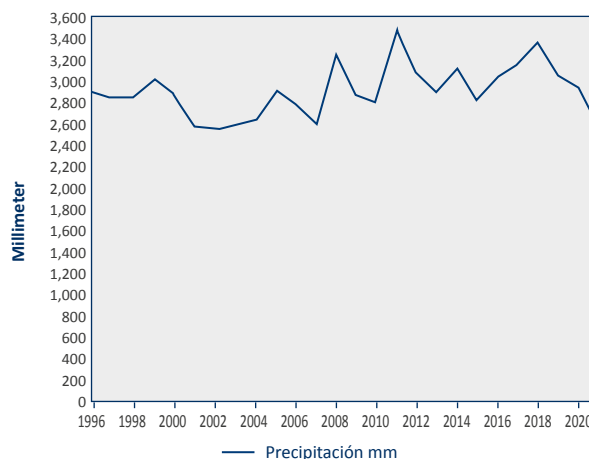


Figura 2. Precipitación promedio multianual.
Fuente: Elaboración propia.

Según la figura 2, se puede observar que en el año 2011 y 2018 el clima colombiano sufrió irregularidades significativas asociadas a la presencia del fenómeno de La Niña, repercutiendo de manera diversa en el territorio nacional dependiendo de las características específicas de los factores que definen el clima y de la influencia del fenómeno sobre estas. Como lo señala la Corporación Andina de Fomento, las fuertes lluvias causaron estragos en el país [8].

En 2011, en la región Amazónica se presentó una mayor cantidad de precipitación acumulada “entre 4.000 y 5.000 mm, los cuales se registraron hacia el piedemonte de la Cordillera Oriental; en el resto de la región fluctuaron entre 3.000 y 4.000 mm [8].

Así mismo, se evidencia que en el 2018 el valor máximo de precipitación fue 39,73 mm y en junio de ese mismo año se presentaron inundaciones por el desbordamiento del río Caquetá, las cuales ocasionaron derrumbes de escuelas, viviendas y cultivos agrícolas en el municipio de Puerto Guzmán que afectaron a 14 familias y a 13 estudiantes de la vereda Sacha Mate que no pudieron asistir a clase por el crítico estado de sus escuelas. Esta situación exigió implementar estrategias de atención inmediata y evaluar la situación presentada para afrontar la gestión del riesgo municipal [9], [10].

En la figura 3 se muestra de forma más detallada que durante 1998, 2007, 2011 y 2018 la precipitación aumentó considerablemente por razones que ya se han mencionado a lo largo del artículo, llegando en 2011 hasta 3468 mm.

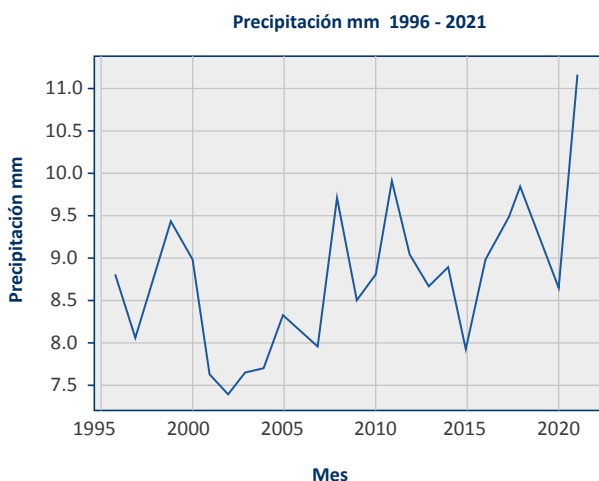


Figura 3. Precipitación promedio plurianual de 1996 a 2021.
Fuente: Elaboración propia.

A principios del 2017, se registró una precipitación de 129 mm en el municipio de Mocoa, lo que desencadenó múltiples deslizamientos en la parte alta y media de las microcuencas de los ríos Sangoyaco y Mulato y las quebradas Taruca, Conejo y Almorzadero [5]. Esto generó un tránsito de la creciente del río súbita, con flujo de lodos, rocas de gran volumen y aporte vegetal, afectando así barrios urbanos y rurales del municipio; además del fallecimiento 332 personas, 398 heridos, 77 desaparecidos y más de 22.000 damnificados. Un evento considerable para los habitantes de Mocoa [5].

Después del desastre, y teniendo en cuenta la gravedad de las afectaciones, el Gobierno Nacional, “en el marco del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres

(SNGRD), dio inicio al protocolo para el manejo de desastres, el cual incluye tres fases principales: respuesta, estabilización y reconstrucción” [5].

Por lo tanto, la cuenca del río Caquetá, y principalmente el municipio de Mocoa, ha estado expuesta a fuertes desbalances hídricos como lo expone el documento Conpes 3904 de 2017 [5].

Según cifras del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC), alrededor del 80 % del municipio está expuesto a condiciones de amenaza alta y muy alta frente a movimientos de masa, flujos torrenciales e inundaciones, lo que refleja la complejidad de las condiciones de riesgo y los retos que existen para su gestión. Así mismo, desde 1998 se han registrado más de 80 eventos desastrosos en Mocoa, de los cuales 64 (79 %) se asocian a fenómenos geomorfológicos e hidrológicos [5].

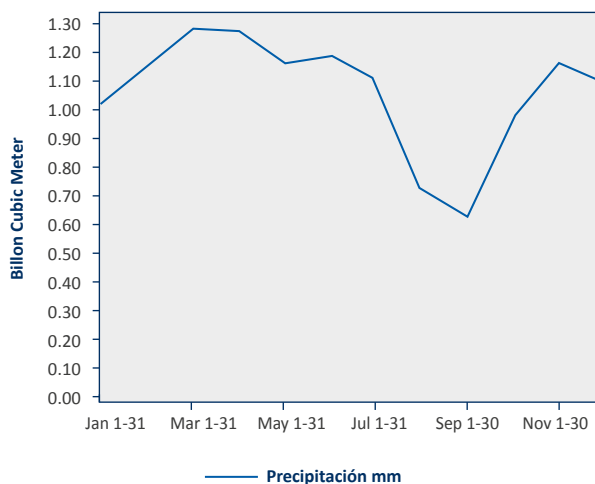


Figura 4. Precipitación mensual multianual.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4 se observan los promedios mensuales multianuales de precipitación, es decir, el promedio de los valores diarios de todos los meses, desde 1996 a 2020. A partir de estos, se determina que el mes de menor precipitación, de acuerdo con su promedio mensual multianual para los años analizados, es septiembre, mientras que el de mayor precipitación es marzo.

Al conocer los datos detallados de lluvia, es posible saber, por ejemplo, en qué meses llenar los embalses de los sistemas VAC y cuál puede ser su capacidad de almacenamiento, teniendo en cuenta los datos de lluvia mensual. [11], [12].

Un hecho que coincide con que abril ha sido el mes con mayor precipitación durante los años analizados es que en el 2018, para este mes, el Informe Hidrológico diario n.º 99 del IDEAM [13] declaró alerta naranja en el departamento del Putumayo por la probabilidad de crecientes súbitas en la cuenca del alta del río Caquetá, dado que se presentaron lluvias moderadas y fuertes en la parte central y oriental del departamento, acompañadas con actividad eléctrica, las cuales generaron nuevos incrementos súbitos en los aportantes de la cuenca alta del río Caquetá, entre los cuales se destacan los ríos Pepino y Rumiyoaco (afluentes del río Mocoa).

En el año 2011, la escorrentía superficial alcanzó un dato máximo de 1938 mm (ver figura 5). Este valor proviene de 3468 mm de precipitación en ese mismo año (ver figura 3). El porcentaje de agua lluvia que escurre por la superficie del suelo es de un 55,88 % de la lluvia, lo cual indica que, en la cuenca, aproximadamente un 44,11 % de la lluvia se infiltra para este dato máximo de lluvia de 2011, porcentaje que podría aumentar con la implementación de sistemas VAC en sitios donde la granulometría gruesa permita el establecimiento de embalses que sirvan para la producción agropecuaria y para la infiltración simultáneamente mediante arreglos de tipo VAC [14].

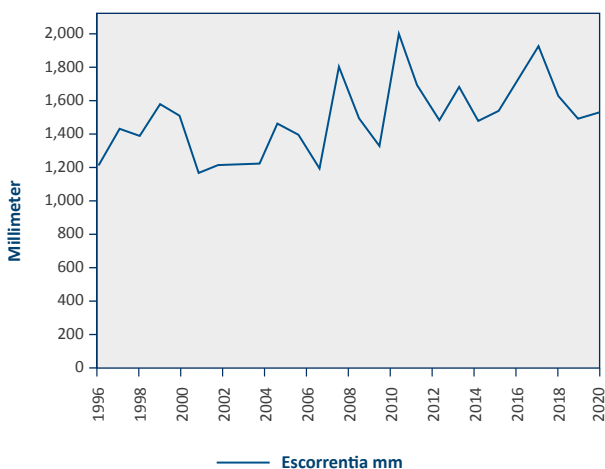


Figura 5. Escorrentía de la cuenca alta del río Caquetá.
Fuente: Elaboración propia.

Es de suma importancia, entonces, conocer cómo es la granulometría de la cuenca. Para tal fin, partiendo de una capa de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, se realizó un mapa de granulometría del suelo de la cuenca alta del río Caquetá (figura 6), a fin de identificar las zonas donde es posible establecer sistemas VAC que funcionen como sitios para la infiltración de agua lluvia y, al mismo tiempo, implementar sistemas de producción agropecuarios de tipo VAC [15].

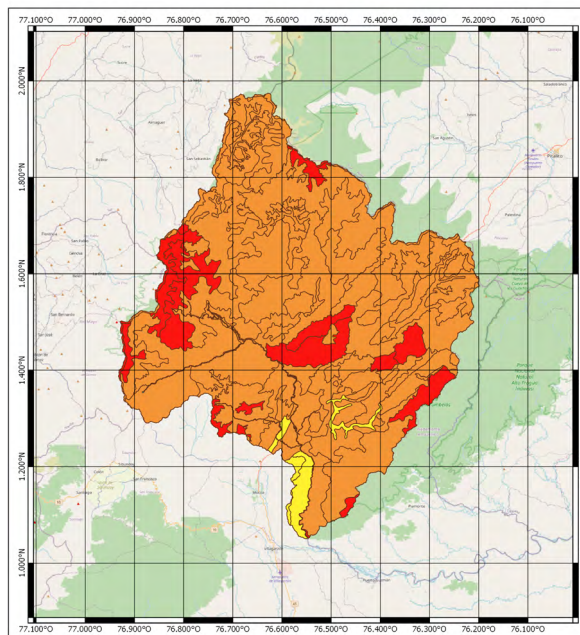


Figura 6. Mapa de granulometría del suelo de la cuenca del Río Caquetá.
Fuente: Elaboración propia con Qgis.

Según el mapa de granulometría de suelo de la cuenca del río Caquetá, el tipo de suelo que más abunda es el de textura media o limoso de color naranja. Los suelos limosos tienen gránulos de tamaño intermedio, son fértiles y fáciles de trabajar. Forman terrones fáciles de desagregar cuando están secos [16].

La cantidad de agua que un horizonte de suelo puede almacenar depende del número de poros que contenga [17]. Por lo tanto, es de suma importancia conocer la textura y humedad del suelo, ya que así se pueden predecir inundaciones, sequías o el momento óptimo para el riego de la cosecha. Poniendo como ejemplo la cuenca del río Caquetá, en la cual, a pesar de que la capacidad de infiltración y de escorrentía del suelo es media [17], se han presentado inundaciones durante las olas invernales, municipios como Valparaíso, Curillo, Solita, San José del Fragua, Belén de los Andaquíes y Milán, se han visto afectados, ya que los ríos El Pescado, Caquetá, Orteguzza, Fragua y San Pedro han desbordado su cauce y, como consecuencia de ello, la capacidad de infiltración del suelo se ha saturado a grandes niveles de agua, y ha permitido el paso de escorrentías [17].

Cerca de la cuenca del río Caquetá se encuentra el municipio de Puerto Guzmán, ubicado en el departamento de Putumayo, que se ha visto afectado por el cambio del curso del río gracias a las islas de sedimentación que se

han formado debido a los derrumbes y avalanchas cerca de la zona [11]. En mayo del 2019 tuvo que ser declarada la calamidad pública en dicho municipio porque las lluvias generaron crecientes que amenazaron con arrasar la población [15].

Además, la granulometría del suelo es un indicador de la salud de este. Un suelo con gran porosidad y contenido de materia vegetal, pueden retener más humedad y favorecer los procesos de retención de nutrientes que benefician la agricultura y los procesos biológicos en general [18].

B. Construir un modelo hidrológico calibrado utilizando WEAP para la cuenca del río Caquetá delimitada hasta el punto de medición de caudal del IDEAM

Con la información de precipitación descargada de ERA5, se construyó un modelo de 2 tanques en la herramienta WEAP, que permite ver la interacción entre los datos de lluvia ERA5 y los datos de caudal. Este modelo se describe mediante la figura 7.

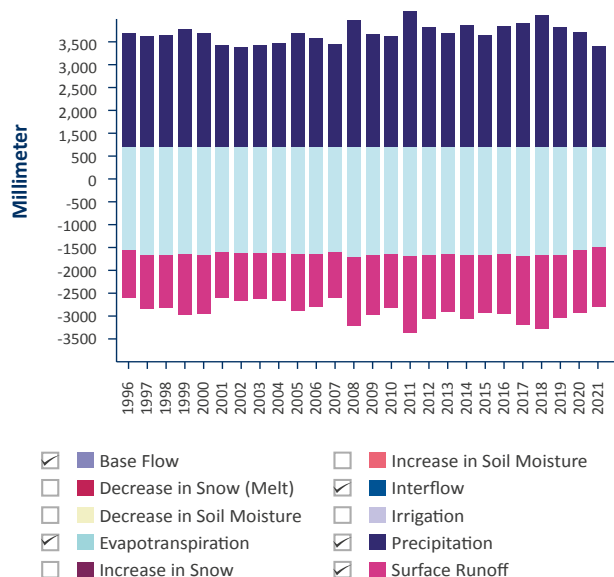


Figura 7. Modelo hidrológico de dos tanques WEAP cuenca alta del río Caquetá.

Fuente: Elaboración propia.

Según el balance de masa para el año 2011, en milímetros, el valor de precipitación fue de 3468 mm, de los cuales, 1938 mm se convirtieron en escorrentía superficial, 20 mm en interflujo, 184 mm se perdieron humedeciendo el suelo, 1376 mm en evapotranspiración, 107 mm en flujo base y 157 mm como una disminución en la humedad del suelo. Estos datos indican que gran cantidad de agua se pierde como escorrentía superficial y evapotranspiración, lo cual

se podría aprovechar mejor utilizando esta agua en sistemas integrados de producción agropecuaria para sacar de allí el máximo provecho de manera sostenible [19].

C. Analizar la viabilidad del uso de sistemas VAC como estrategia de mitigación de inundaciones para la cuenca alta del río Caquetá

Para la prevención de inundaciones y el aprovechamiento del agua lluvia en la cuenca del río Caquetá, se propone la implementación de los sistemas VAC para maximizar la infiltración en la cuenca y además dar una opción para el desarrollo sostenible en la agricultura-acuicultura integrada a pequeña escala. Los sistemas VAC –de *vuon, ao, chung* que en vietnamita significa “jardín, estanque, aves de corral” integrados en un solo sistema productivo sostenible– proveen diversificación que proviene de la integración de cultivos, vegetales, ganado, árboles y peces, lo que imparte estabilidad en la producción, eficiencia en el uso de los recursos y conservación del medio ambiente [1].

Estos sistemas proveen estabilidad a los agricultores por las múltiples fuentes de ganancias provenientes de la maximización de la productividad por unidad de área gracias al aprovechamiento de los recursos naturales de una manera sustentable. Así, disminuyen los riesgos por la variabilidad climática entre otros factores que los afectan [20].

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Para implementar el sistema, en primer lugar, deben establecerse los embalses, que son sitios de almacenamiento de agua. Si se hacen en tierra, son una excelente estrategia para aumentar la infiltración del agua lluvia, por tanto, disminuyen la velocidad del agua que escurre que es la generadora de inundación. Por consiguiente, se deben ubicar después de la zona protegida de la cuenca alta, de manera que no sean embalses que invadan el río sino los pequeños afluentes que llegan al mismo. Una vez que se tiene ya el embalse, se revisan, reparan y protegen las entradas y salidas para evitar tanto el escape de los peces como el ingreso de otros peces no deseados. En cuanto a la profundidad, el estanque debe tener capacidad para retener más de un metro de agua durante los periodos de sequía. Los diques deben fortalecerse y, en terrazas, se plantan los cultivos [19].

La mayoría de los sistemas integrados de agricultura y acuicultura (IAA) [8] dentro el tipo de acuicultura denominada semi-intensiva, así como los estanques semi-

intensivos de agua dulce, generalmente tienen pocos efectos ambientales además de la ocupación de antiguos hábitats naturales. Los efluentes y lodos excavados generalmente mejoran la productividad de las aguas y tierras adyacentes, este debe controlarse para evitar el sobreenriquecimiento de los estanques pudiendo abonar los sistemas agrícolas [7].

Para escoger el pez con el que se llenará el estanque, en el manual básico de Agricultura-acuicultura integrada de la FAO se recomienda: 1) usar especies y razas nativas desarrolladas por autoridades locales o nacionales; programas siempre que sea posible; y 2) si es necesario considerar la introducción de otras especies o razas, buscar asesoramiento profesional sobre cómo evaluar las posibles consecuencias y cumplir con las leyes y códigos de práctica que se han desarrollado para el bien de todos los agricultores presentes y futuros [10].

Por lo anterior, se considera el *Prochilodus nigricans* (bocachico amazónico), ya que, según la organización de Acuicultores del Caquetá, ACUICA, es originario de las cuencas de los ríos Magdalena, Orinoco y Amazonas. Este pez migratorio pertenece a la familia de los carácidos. Se alimenta de materia orgánica en descomposición y es utilizado en policultivo para ayudar a equilibrar las condiciones del estanque donde crecen cultivos de tilapias y cachamas [10].



Figura 8. Bocachico [10].
Fuente: Elaboración propia.

Es posible, entonces, realizar un estudio granulométrico, geológico e hidrológico, para establecer estanques en tierra, con especies que trabajen en sinergia con el bocachico, de manera que exista una especie de pez que limpie el estanque, una especie herbívora, una carnívora. Así mismo, pueden involucrarse patos como fuente de estiércol para el abono de las plantas acuáticas que alimentan el itoplancton y el zooplancton, y a su

vez sirven de alimento a los peces herbívoros, que son la fuente de alimento de los peces carnívoros. De esta manera, se establece toda una cadena autosuficiente, incluyendo la agricultura alrededor del estanque como el maíz y la yuca como alimento de los patos. Los patos al nadar, con sus aletas, sirven como aireador natural. En la India, este tipo de arreglos sostenibles logra producir hasta 2000 kilogramos de alimentos por hectárea al año. Implementarlos en los sitios revisados de la cuenca alta del río Caquetá no solo mejorará la producción de alimentos si no que evitará eventos extremos de inundación y sequía [21].

IV. CONCLUSIONES

El río Caquetá presenta condiciones climáticas propias de la cuenca, periodos de mayor precipitación —de abril a junio— y de meses secos, para los cuales es indispensable implementar los sistemas de alerta temprana para la prevención de inundaciones y conservación del ecosistema de la región.

Los años más críticos durante el periodo analizado fueron 2011 y 2018, a causa de un desbalance hídrico en la cuenca del río Caquetá que disminuyó la evapotranspiración. Este desbalance estuvo relacionado, principalmente, con el fenómeno de La Niña.

La página de ERA5-Land fue esencial para estudiar las variables de temperatura, evapotranspiración y temperatura de la cuenca. Esto permite visualizar el comportamiento de los datos de cada una de las variables para analizar las relaciones entre ellas, establecer los eventos que se presentaron en los periodos estudiados y definir las estrategias de prevención de desastres teniendo en cuenta los datos existentes.

Por último, los sistemas VAC pueden contribuir al manejo y prevención de desastres, como las inundaciones presentadas en el año 2018. Asimismo, facilitan la gestión integral del recurso hídrico y el manejo de afectaciones sociales en la población de la zona. Por otro lado, estos sistemas permiten mitigar las afectaciones a la infraestructura inundable, aportando beneficios sociales, paisajísticos y ecológicos.

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Gonzalo Alberto Forero Buitrago, director del Semillero de Hidrología Computacional de la Universidad El Bosque, por su acompañamiento y ayuda con las herramientas computacionales para poder realizar este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] A. Tacon, Nutrición y alimentación de peces y camarones cultivados. Manual de capacitación. Brasilia, FAO, 1989. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/ab492s/AB492S00.htm#TOC> [Acceso: 15 Julio 2022]
- [2] Buitrago, Gonzalo Alberto Forero. “Dimensionamiento de embalses para fincas en Colombia usando como herramienta los modelos de elevación digital.” *Revista de Tecnología* 15.1 (2016): 129-138. 2016.
- [3] Buitrago, G. A. F., Barreto, J. C. R., & Feo, G. A. R. (2020). Propuesta de almacenamiento de agua lluvia para suministrarla al municipio de Albán utilizando HEC-GeoHMS. *Avances Investigación en Ingeniería*, 17(1). 2020
- [4] Bonilla, L. S. D., & Buitrago, G. A. F. (2022). Diseño de un sistema integrado de producción agropecuaria de tipo VAC para la cuenca del río Ariporo. *Avances Investigación en Ingeniería*, 19(1). 2022.
- [5] CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL CONPES. (2017). Documento CONPES. Plan para la reconstrucción del municipio de Mocoa, 2017-2022, concepto favorable a la nación para contratar un empréstito externo hasta por la suma de USD 30 millones, o su equivalente en otras monedas, para financiar la implementación del plan maestro de alcantarillado del municipio de Mocoa (Fase I), y declaración de importancia estratégica del plan maestro de alcantarillado del municipio de Mocoa (Fase I) <https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/conpes/econ%C3%B3micos/3904.pdf> [Acceso: 5 Julio 2022]
- [6] E. Domínguez-Calle and S. Lozano-Báez, “Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia,” *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Exactas Fis. Nat.*, vol. 38, no. 148, p. 321, 2014.
- [7] “Forecasts,” ECMWF, 2022. [Online]. Available: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts>. [Acceso: 25 Julio 2022]
- [8] García Enrique, L, MEMORIA, RETOS Y SOLUCIONES. EL FENOMENO EL NIÑO 1997-1998. Documento Corporación Andina de Fomento. <https://dipecholac.net/docs/files/995-publicacion-caf-ecuador-ni-no-97-98.pdf> [Acceso: 15 Julio 2022]
- [9] International Center for Living Aquatic Resources Management, & International Institute of Rural Reconstruction. (2001). *Integrated agriculture-aquaculture: a primer* (No. 407). Food & Agriculture Org. 2001.
- [10] J. D. García, L. Souza y J. A. Maldonado “Sistemas hidrográficos de los ríos Bajo Caguán y el Alto Caquetá, Caquetá, Colombia PECEs del bajo río Caguán en su área de confluencia con el río Caquetá” versión 2 10/2018. https://fieldguides.fieldmuseum.org/sites/default/files/rapid-color-guides-pdfs/1056_colombia_fishes_of_lower_caguan_and_cqueta_rivers_1.pdf [Acceso: 15 Julio 2022]
- [11] García, E. D. V., Buitrago, G. A. F., & Angarita, G. P. G. (2020). Simulación hidrológica para sistemas de drenaje sostenible aplicada en jardines verticales en el humedal La Vaca, Bogotá DC. *Revista INVENTUM*, 15(28), 88-103. 2020.
- [12] Gómez, D. A. R., Osorio, L. C. V., & Buitrago, G. A. F. (2018). Simulación Computacional hidrológica del Río Cali en la escala temporal 2011-2019. *Revista de Tecnología*, 17(2), 83-91.2018.
- [13] “INFORME HIDROLÓGICO DIARIO N° 099,” Gov.co. [En línea]. Disponible: http://www.pronosticosy alertas.gov.co/documents/78690/71793176/04_IHD_Abril_09_DIA.pdf/04f6b239-3348-44d2-a429-8daebc1d8e57?version=1.0. [Acceso: 25 Julio 2022]
- [14] M. Halwart, M. Espinoza-Martínez y A. Schuckler, *Los pequeños estanques*, Roma, FAO,2000. <https://www.fao.org/3/x7156s/x7156s00.html>. [Acceso: 15 Julio 2022]
- [15] M. Caicedo, P. Guzmán, A. Castro y K. Robayo. “Diseño hidrológico de un sistema VAC para la finca el Caimo ubicada en el municipio de Villa de Leyva, Boyacá”. *Inventum*, vol. 15, no. 29, pp. 59-75. doi: 10.26620/uniminuto. *Revista INVENTUM*No. 15. Vol 29.2020. Pagd.59-75.
- [16] M. Á. E. Borrero, “El llamado de auxilio del municipio al que se lo podría tragar un río,” *El Tiempo*, 10-Jun-2020. [Online]. Available: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/lluvias-en-colombia-alerta-por-desbordamiento-del-rio-caqueta-en-putumayo-505418>. [Acceso: 5 Julio 2022]



- [17] O. General, "Protocolos de Humedad Gravimétrica," GlobeArgentina.org. [Online]. Available:Globe, 2005.
- [18] "Proyecciones de población," Gov.co. [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>. [Acceso: 25 Julio 2022]
- [19] Rodríguez, M. A., Romero, M. F. L., Henríquez, L. M. T., & Buitrago, G. A. F. Modelo de aprendizaje automático como herramienta para la toma de decisiones en la cuenca del río Ariporo. *INVENTUM*, 16(31), 15-23.
- [20] S. D. Tripathi y B. K. Sharma, "Integrated fish-horticulture farming in India", FAO, 2001. [En línea]. Disponible: <http://www.fao.org/3/Y1187E/y1187e00.htm#TopOfPage>. [Acceso: 15 Julio 2022]
- [21] González, G. P., Henríquez-Ruiz, C., Peña-Angulo, D., Castro, D., & Forero, G. (2022). Técnicas de análisis geomático en la pérdida de humedales urbanos de Bogotá: ¿Qué rol juegan los asentamientos ilegales?. *Revista de Geografía Norte Grande*, (81), 207-233.2022.