



**Modelo de Simulación Computacional para la Recirculación Hídrica Aplicada al Riego
Agrícola Sostenible**

Yeraldin Devia Rodríguez

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Industrial

Bogotá, Colombia

23/05/2026

Modelo de Simulación Computacional para la Recirculación Hídrica Aplicada al Riego Agrícola Sostenible

Yeraldin Devia Rodríguez

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniería Industrial.

Director (a):

Diana Paola Figueroa Hernández

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Bogotá, Colombia

23/05/2026

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Bogotá, 23/05/2026

Dedicatoria:

Primeramente, a Dios que siempre estuvo a mi lado y a todos los que me acompañaron en este camino, en especial a mi hija y mis gatos.

Frase:

"Sé menos curioso acerca de las personas y más curioso acerca de las ideas."

"Yo estoy entre los que piensan que la ciencia tiene gran belleza."

Marie Curie.

Resumen

La presente investigación desarrolló un modelo de simulación computacional orientado al análisis conceptual del tratamiento y la reutilización de agua de drenaje agrícola, mediante la integración de procesos secuenciales de filtración, adsorción y recirculación hídrica. El estudio responde a la necesidad de evaluar, desde una perspectiva preliminar, estrategias de bajo costo para la gestión sostenible del recurso hídrico en el sector agrícola colombiano, considerando las limitaciones técnicas y económicas de los pequeños y medianos productores. El estudio surge ante la necesidad de optimizar el uso del recurso hídrico en el sector agrícola colombiano y mitigar los impactos ambientales asociados al uso intensivo de agroquímicos.

La metodología se fundamentó en revisión documental y análisis de información de segunda fuente relacionada con sistemas de tratamiento hídrico, adsorción y reutilización de agua agrícola. A partir de ello, se desarrolló en Python un modelo computacional propio, el cual integró procesos de filtración por arena, biochar, carbón activado, dosificación de nutrientes y recirculación hídrica.

La simulación permitió modelar el comportamiento hidráulico del sistema y estimar de manera conceptual la eficiencia potencial de remoción bajo distintos escenarios operativos. Los escenarios simulados proyectaron tendencias de reducción progresiva de parámetros fisicoquímicos —DQO, DBO, turbidez y TDS— y estimaron un excedente hídrico potencial de 396 L/día bajo las condiciones operativas modeladas.

Se concluye que el entorno de simulación constituye una herramienta conceptual viable para evaluar alternativas sostenibles de tratamiento y reutilización de agua agrícola, aunque los resultados requieren validación experimental futura.

El modelo integró balance hídrico, monitoreo de saturación de filtros, dosificación conceptual de nutrientes y recirculación parcial del agua tratada mediante una interfaz desarrollada en Python.

Abstract

This research developed a computational simulation model aimed at the conceptual analysis of agricultural drainage water treatment and reuse through the integration of sequential filtration, adsorption, and water recirculation processes. The study addresses the need to evaluate low-cost strategies for sustainable water resource management in the Colombian agricultural sector, considering the technical and economic limitations faced by small and medium-sized producers. The research emerged from the necessity to optimize water use and mitigate the environmental impacts associated with the intensive use of agrochemicals.

The methodology was based on documentary review and secondary-source analysis related to water treatment systems, adsorption processes, and agricultural water reuse. Based on this information, a proprietary computational model was developed in Python, integrating sand filtration, biochar, activated carbon adsorption, nutrient dosing, and water recirculation processes.

The simulation enabled the modeling of the hydraulic behavior of the system and the conceptual estimation of potential removal efficiency under different operational scenarios. Simulated scenarios projected progressive reduction trends in physicochemical parameters, including COD, BOD, turbidity, and TDS, while estimating a potential water surplus of 396 L/day under the modeled operational conditions.

The study concludes that the simulation environment constitutes a viable conceptual tool for evaluating sustainable alternatives for agricultural water treatment and reuse. However, the results require future experimental validation. Additionally, the model integrated water balance analysis, filter saturation monitoring, conceptual nutrient dosing, and partial recirculation of treated water through a Python-based interface.

Tabla de contenido

Introducción	11
Objetivos	13
Objetivos específicos	14
Marco teórico	15
Uso del agua en la agricultura en Colombia	15
Contaminación del agua por actividades agrícolas	16
Calidad del agua para riego	17
Reutilización del agua en la agricultura en Colombia	18
Alternativas sostenibles al uso de plaguicidas	18
Problemática de la calidad del agua en Colombia	19
Enfoque de sostenibilidad en sistemas agrícolas	20
Estado del arte	21
Metodología de revisión sistemática (PRISMA)	21
Proceso de selección de estudios (PRISMA)	23
Análisis de los estudios seleccionados	24
<i>Tabla 1.</i>	26
<i>Comparativa de estudios</i>	26
Conclusión de los estudios seleccionados	29
Metodología	30
Enfoque, alcance y diseño de la investigación	30
<i>Diseño metodológico</i>	31
<i>Población y muestra</i>	31
<i>Instrumentos de recolección de información</i>	32
<i>Procedimiento de la investigación</i>	32
<i>Técnicas para el análisis de la información</i>	32
<i>Criterios de diseño y viabilidad técnica</i>	33
<i>Simulación computacional del sistema</i>	33
<i>Diseño general del sistema propuesto</i>	34
Descripción del sistema por etapas	35
<i>Captación y recolección del agua</i>	35
<i>Filtración física</i>	35
<i>Tanque de estabilización</i>	36
<i>Tanque de nutrición mineral</i>	37
<i>Tanque de bioinsumos (mejora del sistema)</i>	38
Integración de líneas de aplicación al cultivo	39

Integración de líneas de aplicación al cultivo	40
Variables del sistema	41
Análisis conceptual del sistema propuesto	42
Simulación computacional del sistema en Python	43
Estructura conceptual del sistema en Python	43
Configuración computacional del modelo	43
<i>Simulación del comportamiento hidráulico del sistema</i>	44
<i>Parámetros de simulación y configuración del sistema</i>	44
<i>Interfaz y configuración del entorno de simulación</i>	46
Código fuente del modelo computacional	47
Resultados gráficos de la simulación	48
Aporte de la simulación al desarrollo del proyecto	48
Conclusión metodológica	49
Resultados	49
Descripción de la labor de investigación y procesamiento de datos	49
Resultados de eficiencia de tecnologías de tratamiento	50
Interpretación	51
Análisis gráfico de eficiencia	52
Interpretación	52
Resultados sobre calidad del agua en sistemas agrícolas	53
Interpretación	53
Resultados del análisis del sistema propuesto	54
Resultados de la simulación computacional	54
<i>Filtración por etapa</i>	56
<i>Eficiencias de remoción por etapa (basadas en literatura)</i>	56
<i>Modelo de saturación de filtros</i>	56
<i>Captación de agua lluvia</i>	57
<i>Balance hídrico total</i>	57
<i>Proyección de mejora por bioinsumos (ciclo siguiente)</i>	58
Interfaz y monitoreo de variables simuladas	58
<i>Panel de métricas principales</i>	58
<i>Evolución simulada de la calidad del agua por etapas</i>	58
<i>Saturación de filtros y comportamiento operacional</i>	59
<i>Estabilización, bioinsumos y recirculación</i>	60
<i>Balance hídrico completo</i>	62
<i>Ciclo completo del sistema</i>	64

<i>Alertas y recomendaciones</i>	64
Selección de materiales del sistema propuesto	66
<i>Criterios de selección</i>	66
<i>Materiales estructurales del sistema</i>	67
<i>Selección de materiales plásticos</i>	67
<i>Viabilidad económica del sistema</i>	68
<i>Integración con el sistema propuesto</i>	68
Análisis de resultados	68
Propuesta de solución a la problemática	69
<i>Situación actual</i>	69
<i>Oportunidades identificadas</i>	69
<i>Propuesta de solución</i>	69
Resultado final del aporte	71
Discusión	72
Plan de divulgación	75
Limitaciones del estudio	76
Conclusiones	77
Referencias bibliográficas	79
Anexos	85
Anexo A. Código del modelo de simulación computacional	85

Introducción

El agua es un recurso fundamental para la agricultura, ya que permite el crecimiento de los cultivos y garantiza la producción de alimentos. Sin embargo, en el contexto agrícola colombiano, el uso intensivo de fertilizantes y plaguicidas ha generado impactos negativos sobre la calidad del recurso hídrico, debido a que estos compuestos son transportados por escorrentía y drenaje hacia fuentes superficiales y suelos cercanos (IDEAM, 2018; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, s.f.). Diversos autores han señalado que el uso inadecuado de agroquímicos representa un riesgo ambiental significativo para las fuentes hídricas y los ecosistemas asociados (Alfonso & Toro, 2010; Barragán Caballero, 2020). Ante esta problemática, la simulación computacional y el modelado conceptual han surgido como herramientas útiles para evaluar estrategias sostenibles de tratamiento y reutilización hídrica en contextos agrícolas con limitaciones técnicas y económicas (Sarria Villa et al., 2017).

En Colombia, esta problemática adquiere mayor relevancia debido a la alta dependencia del sector agrícola y al uso frecuente de agroquímicos en los cultivos. Diversos estudios han evidenciado que el agua residual agrícola puede contener residuos de plaguicidas que afectan la calidad del agua, se acumulan en el suelo y pueden ser absorbidos por los cultivos, generando riesgos para la salud humana y la inocuidad de los alimentos (Muñoz Villareal, 2024; Caro Gamboa & Cortés Puentes, 2021). Asimismo, investigaciones recientes han demostrado que, aunque existen alternativas como sistemas de filtración, biochar y procesos de depuración natural para el tratamiento de estas aguas, muchas de estas soluciones no son ampliamente adoptadas debido a sus altos costos o a su complejidad técnica (Bustos Murillo et al., 2023; Kaetzl et al.,

2020; Delgado-Rebolledo et al., 2024). En este escenario, los modelos de simulación computacional representan una alternativa preliminar para analizar el comportamiento de sistemas de tratamiento hídrico sin requerir implementación física inmediata.

En este contexto, la presente investigación se enmarca en el campo del manejo sostenible del recurso hídrico en la agricultura en Colombia, con énfasis en la reutilización del agua y la reducción del impacto ambiental generado por los agroquímicos. El problema central corresponde a la ausencia de estrategias técnicas accesibles para el tratamiento y reutilización del agua de drenaje agrícola en sistemas de producción a pequeña y mediana escala en Colombia, donde la contaminación por agroquímicos es recurrente y el agua residual es frecuentemente descartada sin tratamiento previo, con consecuencias documentadas sobre la calidad de los cuerpos de agua receptores. Esta situación no solo genera impactos ambientales asociados a la contaminación de suelos y fuentes hídricas cercanas, sino que también representa la pérdida de un recurso hídrico que podría ser teóricamente tratado y reutilizado mediante modelos conceptuales de filtración y recirculación hídrica (Jaramillo et al., 2020; Salazar Gómez, W y Ariza García, C. (2025), 2021).

Frente a esta situación, surge la necesidad de analizar alternativas conceptuales y de bajo costo que permitan modelar estrategias de tratamiento y reutilización del agua de drenaje agrícola mediante entorno de simulación. Estas soluciones buscan ser aplicables especialmente a pequeños y medianos productores, quienes presentan mayores limitaciones económicas para implementar tecnologías complejas. Estudios previos han demostrado el potencial de materiales como biochar, carbón activado y sistemas de filtración para mejorar la calidad del agua en procesos de tratamiento hídrico (Langergraber et al., 2018; García-Ávila et al., 2023; Serrano et

al., 2023).

Debido a las limitaciones técnicas y económicas asociadas al desarrollo de pilotajes físicos, la presente investigación adopta un enfoque de simulación computacional basado en información de segunda fuente. Para ello, se desarrolló un modelo computacional propio, orientado a modelar el comportamiento hidráulico y la eficiencia teórica de un sistema de filtración, adsorción y recirculación hídrica aplicado al contexto agrícola colombiano. El modelo integra parámetros relacionados con calidad del agua, saturación de filtros, recirculación hídrica y aprovechamiento de nutrientes, tomando como referencia investigaciones previas sobre tratamiento de aguas y reutilización agrícola (Romero Ladino et al., 2017; López Guerrero & Sánchez Ortiz, 2015).

En este sentido, la presente investigación se articula con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente con el ODS 6: Agua limpia y saneamiento, el ODS 12: Producción y consumo responsables y el ODS 13: Acción por el clima (Organización de las Naciones Unidas, s.f.). Estos objetivos promueven el uso eficiente del recurso hídrico, la reducción de contaminantes y la implementación de prácticas sostenibles en los sistemas productivos. Por lo tanto, el modelo de simulación propuesto y la reducción teórica del uso de agroquímicos se alinean con el cumplimiento de estas metas en el contexto agrícola colombiano.

Objetivos

Desarrollar un modelo conceptual de simulación computacional para el tratamiento y reutilización del agua de drenaje agrícola en Colombia mediante procesos de filtración y recirculación hídrica.

Objetivos específicos

- Identificar, a partir de literatura científica, los principales contaminantes presentes en el agua de drenaje agrícola en Colombia asociados al uso de agroquímicos.
- Caracterizar, a partir de información secundaria, los parámetros fisicoquímicos asociados a la contaminación del agua de drenaje agrícola por agroquímicos en Colombia, con el fin de establecer los rangos de entrada al modelo de simulación.
- Revisar tecnologías de tratamiento de agua basadas en filtración, adsorción y biochar aplicadas a procesos de reutilización hídrica agrícola.
- Diseñar un modelo conceptual de tratamiento y recirculación hídrica mediante simulación computacional en Python utilizando parámetros reportados en estudios científicos.
- Simular conceptualmente el comportamiento del sistema desarrollado en Python mediante variables relacionadas con calidad del agua, saturación de filtros y recirculación hídrica bajo escenarios teóricos.

A partir de lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿De qué manera un modelo conceptual de simulación computacional puede contribuir al análisis de estrategias de tratamiento y reutilización del agua de drenaje agrícola en Colombia?

En relación con esta pregunta, se formulan los siguientes supuestos:

Supuesto 1: La contaminación del agua utilizada en sistemas agrícolas está relacionada principalmente con el uso de agroquímicos, lo que afecta su calidad y limita su reutilización en procesos productivos.

Supuesto 2: Los sistemas de filtración, adsorción y recirculación hídrica representan

alternativas con potencial para el tratamiento y aprovechamiento del agua de drenaje agrícola, de acuerdo con la evidencia científica reportada en la literatura especializada

La presente investigación se desarrolló mediante análisis de información secundaria proveniente de artículos científicos, informes técnicos y literatura especializada enfocada en el contexto colombiano. Debido a las limitaciones técnicas y económicas para realizar pilotajes físicos, el estudio adoptó un enfoque de simulación computacional mediante Python, permitiendo modelar conceptualmente el comportamiento hidráulico y la eficiencia teórica del sistema propuesto.

Marco teórico

Uso del agua en la agricultura en Colombia

El agua es un recurso fundamental para la producción agrícola y la seguridad alimentaria. En Colombia, a pesar de contar con una alta disponibilidad hídrica, existen problemáticas relacionadas con su distribución, uso ineficiente y contaminación, especialmente en zonas rurales. Estudios desarrollados en el país evidencian que la falta de infraestructura de riego, tratamiento y gestión hídrica contribuye tanto a la escasez como al deterioro de las fuentes de agua utilizadas en actividades agrícolas (Serje Martínez, 2021; IDEAM, 2018).

Adicionalmente, el uso intensivo del agua en la agricultura genera presión sobre los recursos hídricos, particularmente cuando no se implementan estrategias de reutilización o aprovechamiento del agua residual agrícola. En muchos sistemas productivos, el agua de riego es descartada sin tratamiento previo, incrementando el desperdicio del recurso y afectando su disponibilidad futura (Jaramillo et al., 2020).

En este contexto, el manejo eficiente del recurso hídrico requiere el desarrollo de

estrategias orientadas al tratamiento, reutilización y recirculación del agua en sistemas agrícolas. Debido a las limitaciones económicas y técnicas existentes en pequeños y medianos productores, la simulación computacional y el modelado conceptual se presentan como herramientas preliminares para analizar alternativas sostenibles de gestión hídrica sin necesidad de implementación física inmediata (Sarria-Villa et al., 2017).

Contaminación del agua por actividades agrícolas

La contaminación del agua derivada de las actividades agrícolas representa una de las principales problemáticas ambientales en Colombia, especialmente en regiones con producción agrícola intensiva. El uso de agroquímicos como plaguicidas y fertilizantes favorece procesos de lixiviación y escorrentía que facilitan el transporte de contaminantes hacia fuentes hídricas superficiales y subterráneas (Alfonso & Toro, 2010).

En Colombia, la literatura científica especializada evidencia de manera consistente que la corriente agrícola constituye uno de los principales mecanismos de contaminación difusa, afectando ríos, quebradas y cuerpos de agua cercanos a zonas de cultivo (Villán Pacheco et al., 2023). Muñoz Villareal (2024) señala que este fenómeno contribuye significativamente al deterioro de la calidad del agua debido al arrastre de sustancias químicas desde el suelo hacia los sistemas hídricos.

Este tipo de contaminación es considerado difuso debido a que no proviene de un único punto de descarga, sino de múltiples fuentes distribuidas en el territorio, dificultando su monitoreo y control ambiental. Además, los residuos de plaguicidas pueden persistir en el ambiente y acumularse en los ecosistemas acuáticos, generando riesgos para la biodiversidad y la salud humana (Caro Gamboa & Cortés Puentes, 2021).

En este escenario, la evaluación de la calidad del agua y el análisis de tecnologías de

tratamiento representan elementos fundamentales para estudiar alternativas orientadas a la reducción teórica de contaminantes y al aprovechamiento sostenible del recurso hídrico en sistemas agrícolas.

Calidad del agua para riego

La calidad del agua para riego debe evaluarse mediante parámetros fisicoquímicos y biológicos que permitan determinar su aptitud para uso agrícola. Este aspecto es fundamental debido a que influye directamente en el desarrollo de los cultivos, la productividad agrícola y las características físicas y químicas del suelo (Guerrero Pacheco et al., 2021).

En Colombia, diferentes investigaciones han resaltado la importancia de analizar variables como pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, turbidez y presencia de contaminantes asociados al uso agrícola. El monitoreo de estos parámetros permite prevenir impactos negativos sobre los cultivos y garantizar condiciones adecuadas para el uso sostenible del agua en sistemas de riego (Roldán Pérez, 2021).

El uso de agua con baja calidad puede generar procesos de salinización, acumulación de sustancias tóxicas y deterioro de la estructura del suelo. Asimismo, puede afectar el funcionamiento de los sistemas de riego debido a fenómenos de corrosión y obstrucción, disminuyendo su eficiencia operativa.

En este sentido, la evaluación de la calidad del agua constituye un componente esencial dentro de modelos conceptuales de tratamiento y reutilización hídrica, especialmente en investigaciones basadas en simulación computacional orientadas al análisis teórico del comportamiento de sistemas agrícolas.

Reutilización del agua en la agricultura en Colombia

El reúso del agua en la agricultura se presenta como una alternativa sostenible para optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico, particularmente en contextos donde la disponibilidad de agua dulce es limitada o donde existen problemáticas asociadas a la contaminación de fuentes superficiales (Jaramillo et al., 2020).

En Colombia, diferentes investigaciones han evidenciado que la reutilización de aguas residuales tratadas puede contribuir a la reducción de la presión sobre las fuentes naturales y al uso más eficiente del agua en actividades agrícolas. Salazar Gómez, W y Ariza García, C. (2025) destacan que, bajo condiciones adecuadas de tratamiento, estas aguas pueden emplearse en procesos de riego sin comprometer significativamente la calidad del suelo ni de los cultivos.

Sin embargo, la implementación de tecnologías de reúso continúa siendo limitada debido a factores económicos, tecnológicos y de capacitación técnica, especialmente en pequeños y medianos productores agrícolas. Estas limitaciones dificultan el acceso a sistemas avanzados de tratamiento y restringen la adopción de prácticas sostenibles de gestión hídrica.

Frente a este panorama, los modelos de simulación computacional permiten analizar de manera conceptual diferentes escenarios de reutilización hídrica, facilitando la evaluación preliminar de sistemas de filtración y recirculación antes de una posible validación experimental futura.

Alternativas sostenibles al uso de plaguicidas

El tratamiento de aguas contaminadas por plaguicidas constituye un aspecto fundamental para garantizar su posible reutilización en actividades agrícolas y disminuir los impactos ambientales asociados al uso intensivo de agroquímicos. En el contexto colombiano, se han estudiado diferentes alternativas orientadas a la reducción de contaminantes presentes en aguas

provenientes de zonas agrícolas (Pinto Carvajal, 2017).

Entre las principales tecnologías se encuentran los procesos de filtración física, adsorción y tratamientos biológicos, los cuales permiten reducir parcialmente la concentración de compuestos contaminantes presentes en el agua. Investigaciones recientes han demostrado el potencial del biochar y del carbón activado como materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas residuales debido a su capacidad de remoción de contaminantes y su bajo costo relativo (Kaetzi et al., 2020; Langergraber et al., 2018).

De igual manera, García-Ávila et al. (2023) y Delgado-Rebolledo et al. (2024) destacan que los sistemas basados en biochar pueden contribuir a mejorar parámetros de calidad del agua relacionados con turbidez, materia orgánica y presencia de contaminantes. Asimismo, Serrano et al. (2023) reportan aplicaciones de biochar activado en procesos de remoción de metales y microorganismos en aguas residuales.

Complementariamente, las estrategias sostenibles en agricultura también incluyen la reducción del uso de plaguicidas mediante alternativas como el manejo integrado de plagas, el control biológico y el uso de bioinsumos agrícolas. Estudios realizados por Agrosavia y Stocco et al. (2024) evidencian que estas prácticas pueden contribuir a disminuir la dependencia de agroquímicos y reducir el riesgo de contaminación hídrica en sistemas agrícolas.

En el marco de la presente investigación, estas tecnologías y estrategias constituyen la base conceptual para el desarrollo del modelo de simulación computacional en Python, orientado al análisis teórico de procesos de filtración, adsorción y recirculación hídrica en el contexto agrícola colombiano.

Problemática de la calidad del agua en Colombia

La calidad del agua en Colombia se ha visto afectada por múltiples factores asociados a

actividades antrópicas, entre ellos el vertimiento de aguas residuales, el uso intensivo de agroquímicos y las limitaciones en los procesos de control y monitoreo ambiental (IDEAM, 2022).

Roldán Pérez (2021) señala que diversos cuerpos de agua presentan deterioro progresivo debido a actividades agrícolas y urbanas, afectando la disponibilidad del recurso para usos como consumo humano, riego y procesos productivos. Esta situación evidencia la necesidad de fortalecer estrategias de manejo sostenible orientadas a la protección y recuperación de las fuentes hídricas.

Dentro de estas estrategias se incluyen el tratamiento de aguas residuales, la implementación de buenas prácticas agrícolas y el uso de tecnologías orientadas a disminuir la carga contaminante generada por las actividades productivas. En este contexto, la simulación computacional constituye una herramienta de apoyo para analizar de manera conceptual posibles escenarios de tratamiento y reutilización hídrica aplicados al sector agrícola.

Enfoque de sostenibilidad en sistemas agrícolas

El manejo sostenible del agua en la agricultura implica la implementación de estrategias orientadas a reducir el consumo, minimizar la contaminación y optimizar el uso del recurso hídrico. En Colombia, este enfoque adquiere especial relevancia debido a las limitaciones económicas y tecnológicas presentes en muchos sistemas productivos agrícolas (Barragán Caballero, 2020).

En este sentido, los sistemas de filtración y recirculación hídrica de bajo costo representan alternativas conceptuales para mejorar la eficiencia en el uso del agua y disminuir el impacto ambiental asociado al desperdicio del recurso. Estas estrategias también pueden contribuir teóricamente a reducir la contaminación generada por escorrentía y lixiviación en

zonas agrícolas.

De manera complementaria, la sostenibilidad agrícola incluye la disminución del uso de agroquímicos mediante prácticas como el manejo integrado de plagas, el uso de bioinsumos y la implementación de alternativas biológicas para el control fitosanitario (Agrosavia; Stocco et al., 2024).

La integración de estrategias de reutilización hídrica, filtración y reducción de agroquímicos constituye la base conceptual del modelo desarrollado en Python, el cual permite analizar de manera teórica el comportamiento de sistemas de tratamiento y recirculación hídrica orientados al contexto agrícola colombiano.

Estado del arte

Metodología de revisión sistemática (PRISMA)

La presente revisión sistemática se desarrolló bajo la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), con el objetivo de identificar, seleccionar y analizar estudios científicos relacionados con el tratamiento y reutilización del agua en sistemas agrícolas mediante tecnologías de bajo costo, como filtros de arena y carbón activado de biomasa, en el contexto colombiano y suramericano.

El proceso de búsqueda se realizó de manera estructurada, transparente y replicable, priorizando literatura científica reciente y verificable, complementada con estudios relevantes de alto impacto y literatura académica institucional. El proceso de selección se sintetiza mediante un diagrama de flujo PRISMA, el cual permite visualizar las etapas de identificación, filtrado, elegibilidad e inclusión de los estudios analizados.

Debido a que la presente investigación se fundamenta en información secundaria y simulación computacional, la revisión sistemática constituyó la base conceptual y técnica para el

desarrollo del modelo en Python, permitiendo definir parámetros hidráulicos, variables de calidad del agua y eficiencias teóricas utilizadas en el entorno de simulación.

- **Bases de datos consultadas**
 - Scopus
 - ScienceDirect
 - Google Scholar
 - SciELO
 - Redalyc
 - eLibro
 - Repositorios universitarios colombianos (UNAL, UIS, UdeA, Uniandes, Agrosavia)
- **Ecuación de búsqueda**
 - “biochar wastewater treatment efficiency removal”
 - “slow sand filtration agricultural water reuse”
 - “low cost filtration wastewater agriculture Colombia”
 - “biochar sand filter removal efficiency South America”
 - “water reuse irrigation treatment efficiency Latin America”
- **Periodo de búsqueda**
 - 2020 - 2026 (prioridad $\geq 70\%$ de los estudios)
- **Idiomas incluidos**
 - Español
 - Ingles
- **Criterios de inclusión**
 - Estudios experimentales con datos cuantitativos de eficiencia (% remoción)

- Tecnologías de bajo costo: filtración en arena, biochar, carbón activado, sistemas híbridos
- Estudios desarrollados en Colombia o Suramérica, o aplicables al contexto
- Artículos científicos indexados o literatura académica verificable
- Investigaciones con enfoque técnico o de aplicabilidad en reúso agrícola
- **Criterios de exclusión**
 - Estudios sin datos cuantitativos de remoción
 - Revisiones sin soporte técnico aplicable
 - Tecnologías de alto costo no viables en contexto rural
 - Publicaciones sin acceso verificable

Proceso de selección de estudios (PRISMA)

La búsqueda permitió identificar un conjunto amplio de estudios, los cuales fueron depurados mediante criterios de inclusión y exclusión.

- Registros identificados en bases de datos: **61**
- Registros después de eliminar duplicados: **49**
- Registros filtrados por título y resumen: **25**
- Artículos evaluados a texto completo: **19**
- Artículos excluidos: **4**
 - Sin datos cuantitativos de remoción: **2**
 - Enfoque no aplicable al contexto agrícola: **1**
 - Falta de acceso completo verificable: **1**

- Estudios incluidos en la revisión final: **15**

Análisis de los estudios seleccionados

Los 15 estudios seleccionados evidencian una tendencia creciente hacia el uso de tecnologías de bajo costo basadas en procesos de filtración, adsorción y tratamiento natural para el tratamiento y reutilización del agua en sistemas agrícolas.

En primer lugar, las investigaciones relacionadas con biochar y carbón activado de biomasa reportan altas eficiencias de remoción de contaminantes en procesos de tratamiento hídrico. García-Ávila et al. (2023) reportan eficiencias de remoción de hasta 93.9% en turbidez, 90.75% en color y 95.7% en hierro mediante sistemas de filtración con biochar derivado de biomasa residual bajo condiciones experimentales específicas. De manera similar, Kaetzi et al. (2020) evidencian remociones de DQO de hasta 74%, superiores al desempeño obtenido con arena convencional.

Asimismo, Langergraber et al. (2018) reportan remociones superiores al 90% en materia orgánica y eficiencias entre 50% y 88% para nitrógeno y hasta 86% en fósforo utilizando biochar en humedales construidos. Estos resultados evidencian el potencial del biochar como material adsorbente y filtrante en sistemas de tratamiento de agua.

Adicionalmente, Serrano et al. (2023) demostraron que el biochar obtenido a partir de cáscara de arroz presenta altas eficiencias de remoción de metales y microorganismos, alcanzando valores cercanos al 95% en algunos parámetros evaluados. Estos hallazgos respaldan la utilización de biomasa residual como alternativa sostenible para procesos de filtración y adsorción.

En el contexto colombiano, López Guerrero y Sánchez Ortiz (2015) reportan remociones de DQO de hasta 60.2% mediante sistemas de filtración compuestos por arena, antracita y carbón

activado. De manera complementaria, Romero Ladino et al. (2017) evidencian reducciones superiores al 60% en sistemas de filtración biológica aplicados al tratamiento de aguas residuales.

Por otra parte, investigaciones como las desarrolladas por Jaramillo et al. (2020) y Salazar Gómez, W y Ariza García, C. (2025) destacan que el reúso de agua en agricultura es viable bajo condiciones adecuadas de tratamiento y monitoreo de calidad. Sin embargo, ambos estudios coinciden en señalar limitaciones relacionadas con infraestructura, costos de implementación y acceso a tecnologías avanzadas en zonas rurales.

Desde una perspectiva ambiental y económica, Ramírez López et al. (2024) destacan que el uso de biochar representa una alternativa sostenible y de bajo costo para procesos de tratamiento hídrico, aunque señalan la necesidad de estandarizar criterios de aplicación y operación para maximizar su desempeño.

En términos normativos, los estudios revisados evidencian que el tratamiento y reúso de agua en agricultura debe considerar parámetros relacionados con DBO, DQO, turbidez y calidad microbiológica, de acuerdo con los lineamientos establecidos en la normativa colombiana para vertimientos y reutilización hídrica.

En conjunto, la literatura revisada evidencia un respaldo científico significativo para el desarrollo de modelos conceptuales orientados al análisis de tecnologías de filtración y recirculación hídrica aplicadas al contexto agrícola colombiano.

Tabla 1.
Comparativa de estudios

Autor(es) / Año	Objetivo	Metodología	Variabes	Hallazgos	Limitaciones	Relación con el proyecto
Jaramillo, M. F., Cardona, D. A., & Galvis, A. (2020)	Evaluar la aplicabilidad de la reutilización de aguas residuales en la agricultura en Colombia	Estudio aplicado	Calidad del agua, reutilización, tratamiento previo	La reutilización del agua en agricultura es aplicable siempre que exista un tratamiento previo adecuado.	Limitada infraestructura para tratamiento en zonas rurales	Base para la propuesta de recirculación y reutilización del agua tratada
Sarría Villa, R. (2017).	Determinar la presencia de plaguicidas en el agua del río Cauca y sus afluentes	Análisis experimental de muestras de agua y sedimentos	Concentración de plaguicidas, calidad del agua	Los estudios reportan alta presencia de agroquímicos en cuerpos de agua asociados a la actividad agrícola	Monitoreo limitado en tiempo y espacio	Justifica la problemática de contaminación por plaguicidas
Bustos Murillo et al. (2023)	Analizar sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en tecnologías avanzadas	Revisión tecnológica	Tecnologías de tratamiento, eficiencia de remoción	Los estudios reportan alta eficiencia en la remoción de contaminantes	Altos costos y complejidad técnica	Base para proponer alternativas de bajo costo
Salazar Gómez, W y Ariza García, C. (2025)	Evaluar tecnologías de tratamiento de aguas residuales para su reúso en sistemas	Revisión y análisis comparativo de tecnologías de tratamiento	Eficiencia de remoción, tecnologías de filtración, reúso del agua	Las tecnologías de tratamiento permiten el reúso seguro del agua en agricultura	Requiere inversión inicial y mantenimiento técnico	Justifica la necesidad de soluciones sostenibles y aplicables en contextos rurales

	agrícolas en Colombia					
García-Ávila et al. (2023)	Evaluar el uso de biochar en sistemas de filtración de agua	Experimental	Turbidez, color, coliformes, hierro	Los estudios reportan valores de remoción de turbidez 93.9%, color 90.75%, coliformes 88.9%, hierro 95.7%	Dependencia del tipo de biomasa utilizada	Sustenta el uso de carbón activado de biomasa como material filtrante eficiente
Kaetzl, K., Lübken, M., & Wichern, M. (2020)	Analizar biochar como material filtrante en sistemas de tratamiento	Experimental	DQO, E. coli	Los estudios reportan valores de remoción de DQO hasta 74% con biochar frente a 61% con arena	Variabilidad en condiciones operativas	Justifica el uso de biochar en combinación con arena
Langergraber et al. (2018)	Evaluar biochar en sistemas de tratamiento de agua	Experimental	Nitrógeno, fósforo, materia orgánica	Los estudios reportan valores de remoción >90% materia orgánica, nitrógeno 50–88%, fósforo hasta 86%	Condiciones ambientales afectan eficiencia	Apoya el uso de materiales naturales en tratamiento
Serrano, M. F., López, J. E., & Saldarriaga, J. F. (2023)	Evaluar biochar de cáscara de arroz en tratamiento de agua	Experimental	Metales, microorganismos	Los estudios reportan valores de alta eficiencia en remoción de contaminantes y patógenos	Dependencia del tipo de biomasa	Sustenta uso de biomasa como material filtrante
Delgado-Rebolledo, D. V., Chica, E., & Rubio-Clemente, A.	Analizar biochar como material alternativo en tratamiento	Revisión	Contaminantes orgánicos y microbiológicos	Los estudios reportan valores de alta eficiencia en remoción de contaminantes	Falta de estandarización en aplicación	Sustenta el uso de biochar en contexto colombiano

(2024)	de agua					
López Guerrero, A. F., & Sánchez Ortiz, I. A. (2015)	Evaluar filtración con arena, antracita y carbón activado	Experimental	DQO	Los estudios reportan valores de remoción de DQO hasta 60.2%	Eficiencia depende de condiciones operativas	Relaciona directamente arena + carbón activado
Romero Ladino, Y. T., Rojas Ordóñez, L. F., & Rodríguez Miranda, J. P. (2017)	Evaluar filtro percolador en tratamiento de aguas residuales	Experimental	DQO, pH	Los estudios reportan valores de remoción de DQO >60%	Sistema requiere control técnico	Apoya uso de lechos filtrantes
Ramírez López, R. P., et al. (2024)	Evaluar el impacto ambiental del biochar en filtración de agua	Análisis de ciclo de vida	Eficiencia, costos, sostenibilidad	Biochar es alternativa sostenible y de bajo costo	Falta de estandarización	Refuerza viabilidad económica del sistema
Guerrero Pacheco, J., et al. (2021)	Evaluar la calidad del agua para riego en Colombia	Análisis de parámetros fisicoquímicos en fuentes hídricas	pH, conductividad, DBO, DQO, sólidos, calidad para riego	Se evidencian variaciones en la calidad del agua que requieren tratamiento previo para uso agrícola	Variabilidad espacial de las fuentes hídricas	Justifica la necesidad de tratamiento antes del reúso en riego
Barzan, R. R., Takahashi, H. W., Fregonezi, G. A. de F., Sampaio, M. D. L. Y., Firmano, R.	Evaluar el manejo de nutrientes en solución nutritiva mediante el control de la conductividad eléctrica y la	Estudio experimental con monitoreo de lixiviados y ajuste de solución nutritiva.	Conductividad eléctrica, concentración de iones (Nutrientes), lixiviados y rendimiento del cultivo.	El control de nutrientes mejoró el aprovechamiento de recursos y redujo pérdidas.	Resultados limitados a condiciones específicas del cultivo evaluado.	Aporta bases para el uso eficiente y reutilización de agua y nutrientes en sistemas agrícolas sostenibles.

F. y Contreras, H. A. S. (2020)	concentración de iones en lixiviados					
Pinto Carvajal, L. P. (2017)	Analizar el tratamiento de aguas contaminadas con plaguicidas en Colombia	Revisión aplicada de tecnologías de tratamiento	Plaguicidas, eficiencia de remoción, tecnologías	Se identifican tecnologías como filtración y adsorción como efectivas para reducir contaminantes	Limitación en implementación a gran escala	Refuerza el uso de filtración y adsorción en el proyecto

Nota. Elaboración propia

Los resultados reportados en los estudios seleccionados fueron utilizados como base conceptual para la parametrización y construcción del modelo de simulación computacional desarrollado en Python

Conclusión de los estudios seleccionados

El análisis del estado del arte evidencia un respaldo científico significativo para el uso de tecnologías de filtración y adsorción de bajo costo, como arena, biochar y carbón activado de biomasa, en procesos de tratamiento y reutilización de agua aplicada al sector agrícola.

Los estudios revisados reportan eficiencias relevantes en la remoción de contaminantes asociados a materia orgánica, turbidez, nutrientes y compuestos derivados de actividades agrícolas, especialmente en sistemas que integran procesos físicos y adsorbentes.

Asimismo, la literatura evidencia que el reúso de agua en agricultura presenta potencial de aplicación en el contexto colombiano, aunque su implementación continúa limitada por factores económicos, tecnológicos y de infraestructura, particularmente en pequeños y medianos productores rurales.

A partir del análisis bibliográfico, se identificó que la mayoría de investigaciones se enfocan en tecnologías individuales de tratamiento, como filtración en arena, biochar y sistemas

de adsorción. No obstante, la literatura revisada evidencia una limitada integración de estas tecnologías dentro de modelos completos de recirculación hídrica orientados al contexto agrícola colombiano.

En este sentido, la presente investigación busca contribuir a este vacío mediante el desarrollo conceptual del modelo en Python, integrando procesos de filtración, adsorción y recirculación hídrica a partir de parámetros reportados en literatura científica y fuentes secundarias. El modelo permite analizar de manera teórica el comportamiento hidráulico y la eficiencia potencial del sistema bajo escenarios simulados, constituyendo una herramienta preliminar para la evaluación de estrategias sostenibles de tratamiento y reutilización hídrica en agricultura.

Metodología

Enfoque, alcance y diseño de la investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto con predominio documental y computacional con alcance descriptivo–propositivo, orientado al análisis de información científica secundaria y al desarrollo conceptual de un sistema de tratamiento y recirculación de agua de drenaje agrícola mediante simulación computacional.

El estudio presenta un alcance descriptivo debido a que analiza las condiciones del uso del agua en la agricultura colombiana, la problemática asociada a la contaminación por agroquímicos y las tecnologías reportadas para el tratamiento y reutilización hídrica, sin realizar manipulación experimental de variables ni pruebas piloto en campo.

El diseño metodológico corresponde a una investigación documental de tipo tecnológico conceptual, fundamentada en revisión sistemática de literatura bajo lineamientos PRISMA y complementada mediante modelado computacional desarrollado en Python.

La simulación computacional permitió representar de manera conceptual el comportamiento hidráulico del sistema propuesto y analizar teóricamente variables relacionadas con calidad del agua, procesos de filtración y recirculación hídrica bajo diferentes escenarios operativos.

Diseño metodológico

La investigación corresponde a un diseño tecnológico conceptual orientado al desarrollo de un modelo teórico de tratamiento y reutilización hídrica aplicado a sistemas agrícolas hortícolas.

El diseño se estructuró a partir de tres componentes principales:

- Revisión sistemática de literatura científica.
- Análisis comparativo de tecnologías de tratamiento de agua.
- Simulación computacional del sistema mediante Python con uso de las bibliotecas streamlit y matplotlib.

La construcción del modelo conceptual se realizó utilizando parámetros reportados en estudios científicos relacionados con eficiencia de remoción, comportamiento de materiales filtrantes y variables fisicoquímicas asociadas al tratamiento de agua agrícola.

Población y muestra

Debido al carácter documental y computacional de la investigación, no se definió población ni muestra estadística.

La unidad de análisis estuvo conformada por artículos científicos, tesis académicas, informes técnicos y literatura especializada seleccionada mediante criterios de inclusión y exclusión establecidos en la revisión sistemática PRISMA.

Instrumentos de recolección de información

Los instrumentos utilizados para la recolección y organización de la información fueron:

- Matriz de revisión documental para sistematización de información científica.
- Fichas de análisis bibliográfico para clasificación de tecnologías, variables y eficiencias reportadas.
- Diagrama PRISMA para depuración y selección estructurada de literatura científica.
- Entorno de simulación desarrollado en Python con uso de las bibliotecas streamlit y matplotlib para modelado conceptual del sistema.

Procedimiento de la investigación

El desarrollo metodológico se realizó en seis fases:

- Búsqueda de literatura científica en bases de datos especializadas.
- Aplicación de criterios de inclusión y exclusión.
- Organización y sistematización de información en matrices documentales.
- Análisis comparativo de tecnologías de filtración y adsorción.
- Diseño conceptual del sistema de tratamiento y recirculación hídrica.
- Desarrollo de simulación computacional en Python

Técnicas para el análisis de la información

El análisis de información se realizó mediante técnicas de análisis documental cualitativo y comparación sistemática de estudios científicos.

Posteriormente, la información obtenida fue utilizada para parametrizar el modelo computacional en Python, permitiendo analizar de manera teórica el comportamiento hidráulico y la eficiencia potencial del sistema bajo diferentes condiciones simuladas.

Criterios de diseño y viabilidad técnica

Para la evaluación conceptual del sistema se establecieron criterios técnicos fundamentados en literatura científica especializada:

- Eficiencia teórica de remoción de contaminantes físicos.
- Capacidad potencial de reducción de carga orgánica.
- Compatibilidad con sistemas de recirculación hídrica.
- Aplicabilidad conceptual en pequeños y medianos productores.
- Viabilidad técnica de implementación bajo esquemas de bajo costo.
- Compatibilidad entre procesos de fertilización y control biológico.

Estos criterios permitieron sustentar teóricamente la viabilidad conceptual del modelo propuesto.

Simulación computacional del sistema

La simulación computacional del sistema fue desarrollada mediante Python, con el propósito de representar conceptualmente el comportamiento hidráulico y la eficiencia teórica del sistema de tratamiento y recirculación hídrica. El modelo incorporó variables relacionadas con:

- Turbidez
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Conductividad eléctrica (CE)
- pH
- Saturación de filtros
- Eficiencia de adsorción
- Flujo de recirculación

La simulación permitió analizar escenarios teóricos de funcionamiento del sistema bajo diferentes condiciones de carga contaminante y eficiencia de filtración, utilizando parámetros reportados en literatura científica especializada.

Asimismo, el modelo permitió representar gráficamente el comportamiento del sistema mediante diagramas de flujo, curvas de eficiencia y simulaciones de recirculación hídrica generadas en Python.

Los resultados obtenidos corresponden a proyecciones teóricas derivadas de modelado computacional y no constituyen validaciones experimentales reales.

Diseño general del sistema propuesto

El sistema propuesto corresponde a un modelo de recirculación hídrica con tratamiento por etapas, diseñado bajo un enfoque de flujo continuo, en el cual el agua es sometida a procesos progresivos de depuración, estabilización y acondicionamiento antes de su reutilización en sistemas agrícolas hortícolas.

El sistema se estructura como un proceso secuencial compuesto por entradas (agua de drenaje agrícola y aguas lluvia), procesos de tratamiento (filtración física, estabilización y acondicionamiento nutricional) y salidas controladas (agua tratada para riego y aplicación de bioinsumos).

Este diseño se fundamenta en principios de producción hortícola bajo condiciones protegidas y en el manejo eficiente de nutrientes, donde se prioriza la recirculación del recurso hídrico y la reducción de insumos externos, en concordancia con enfoques de agricultura tecnificada y sostenible (Barzan, R. R, Agrosavia).

Descripción del sistema por etapas

Captación y recolección del agua

El sistema inicia con la captación y recolección del agua proveniente del riego agrícola, lluvias o de procesos de escorrentía superficial. Este recurso hídrico puede contener residuos de fertilizantes, materia orgánica, sedimentos, sales disueltas y trazas de agroquímicos asociados a las actividades productivas.

En esta etapa se realiza la primera recepción del agua en el sistema, la cual constituye el punto de entrada de todas las cargas contaminantes. Las principales variables presentes incluyen sólidos suspendidos totales (SST), turbidez, carga orgánica inicial, nutrientes (nitrógeno y fósforo) y posibles residuos de plaguicidas.

Filtración física

Posteriormente, el agua es conducida a un sistema de filtración física compuesto por capas de:

- Grava
- Arena
- Carbón activado
- Biochar (como material complementario de origen biológico)

Estos medios permiten la remoción progresiva de contaminantes mediante procesos de filtración, retención y adsorción. La grava y la arena actúan principalmente en la retención de sólidos de mayor y menor tamaño, mientras que el carbón activado y el biochar favorecen la adsorción de compuestos orgánicos, parte de los agroquímicos y reducción de color y olor.

Adicionalmente, el sistema puede complementarse de manera opcional con un proceso de desinfección mediante radiación ultravioleta (UV), orientado a la reducción de microorganismos

patógenos sin la adición de productos químicos.

En esta etapa se reduce principalmente la turbidez, SST, materia orgánica particulada, color aparente y carga microbiana, mejorando la calidad general del agua antes de su almacenamiento.

Punto de control 1 (válvula de evaluación físico-química)

Al finalizar la filtración física, el sistema incorpora un punto de control mediante válvulas o llaves de monitoreo, donde se evalúan parámetros básicos de calidad del agua antes de permitir su paso al siguiente tanque.

Las variables evaluadas en este punto incluyen:

- Turbidez
- SST
- pH
- Conductividad eléctrica (CE)

Si el agua cumple con los rangos establecidos por el sistema, se permite su ingreso al tanque de estabilización; de lo contrario, retorna a la etapa de filtración.

Tanque de estabilización

El agua filtrada se almacena en un tanque de estabilización, donde se busca la homogenización de las condiciones físico-químicas del recurso hídrico. En esta etapa se presentan procesos de sedimentación adicional y estabilización de parámetros como pH, conductividad eléctrica y carga residual de sólidos finos.

Este tanque permite reducir variaciones en la calidad del agua y asegurar condiciones más estables antes de la incorporación de nutrientes, lo cual es fundamental para la eficiencia del sistema productivo (Escobar Rivera).

Punto de control 2 (salida del tanque de estabilización)

Antes de pasar al sistema de nutrición mineral, se realiza una segunda verificación mediante válvulas de control, donde se evalúan nuevamente parámetros como:

- pH
- Conductividad eléctrica (CE)
- Turbidez residual

Este control garantiza que el agua mantenga condiciones adecuadas para la adición de nutrientes sin afectar su estabilidad química.

Tanque de nutrición mineral

En esta etapa se incorporan los nutrientes esenciales para el desarrollo de las hortalizas, principalmente nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), los cuales constituyen la base de la fertilización en sistemas agrícolas intensivos.

El manejo de la fertilización se realiza de manera controlada, combinando fertilizantes orgánicos y minerales, con el objetivo de optimizar la disponibilidad de nutrientes y mejorar la productividad del cultivo. En este punto también se regula la conductividad eléctrica (CE) para evitar concentraciones excesivas que puedan afectar el desarrollo vegetal.

Estudios han demostrado que una fertilización balanceada mejora el crecimiento y rendimiento de los cultivos hortícolas (Maya Álvarez & Quintero Gaviria, 2022).

Punto de control 3 (control de solución nutritiva)

Previo a la recirculación del agua al sistema de cultivo, se realiza un control final de la solución nutritiva mediante válvulas de salida, donde se verifica:

- CE final de la solución
- pH ajustado

- Concentración de nutrientes

Este punto asegura que el agua sea apta para su aplicación en el sistema productivo o su recirculación.

Tanque de bioinsumos (mejora del sistema)

Finalmente, el sistema incorpora dos tanques independientes destinados a la preparación y aplicación de bioinsumos, especialmente microorganismos benéficos utilizados en el control biológico de enfermedades en cultivos hortícolas. Este tipo de sistemas busca mejorar la sostenibilidad del manejo agrícola mediante la reducción del uso de insumos químicos y la incorporación de alternativas biológicas en la producción (CESGIR. (2024); Agrosavia).

El sistema será alimentado principalmente con agua lluvia almacenada y, en caso de ser necesario, con agua proveniente del acueducto. En el primer tanque se realiza el almacenamiento del agua de entrada, donde se evalúan sus condiciones fisicoquímicas antes de la incorporación de los microorganismos. Esta evaluación es fundamental debido a que las fuentes hídricas destinadas a uso agrícola pueden presentar variaciones en su calidad asociadas a contaminantes y residuos de agroquímicos, lo que puede comprometer su uso directo en sistemas biológicos.

En términos técnicos, el agua debe cumplir condiciones específicas para garantizar la viabilidad de microorganismos como *Trichoderma harzianum*. El pH debe mantenerse en un rango aproximado entre 5.5 y 7.5, considerado óptimo para la estabilidad de microorganismos benéficos. La conductividad eléctrica no debe superar valores cercanos a 1.5 dS/m, ya que niveles superiores pueden generar estrés osmótico. Adicionalmente, el agua debe presentar cloro residual igual a 0 mg/L, debido a su efecto inhibitorio sobre la actividad microbiana, y una turbidez baja, idealmente inferior a 5 NTU, con el fin de evitar interferencias físicas en la suspensión del bioinsumo. Estas condiciones son consistentes con los criterios de calidad de agua

para uso agrícola (Guerrero Pacheco et al., 2021; Roldán Pérez, 2021).

Una vez verificado el cumplimiento de estos parámetros, el agua es transferida al segundo tanque, donde se realiza la incorporación del bioinsumo. En este caso, se destaca el uso de *Trichoderma harzianum*, microorganismo ampliamente utilizado en el control biológico de fitopatógenos debido a su capacidad para reducir la incidencia de enfermedades en cultivos hortícolas.

Este microorganismo presenta alta sensibilidad a condiciones químicas adversas, especialmente a la presencia de cloro, variaciones extremas de pH y altas concentraciones de sales disueltas, por lo que el acondicionamiento previo del agua resulta determinante para garantizar su viabilidad y eficacia biológica. En este sentido, el control de calidad del agua se convierte en un factor crítico dentro del diseño del sistema (IDEAM, 2022; Guerrero Pacheco et al., 2021).

Finalmente, la separación física entre el tanque de bioinsumos y el sistema de fertilización mineral evita interferencias químicas que puedan afectar la estabilidad del microorganismo, permitiendo mantener su funcionalidad dentro del sistema productivo. Esta integración de etapas contribuye a optimizar el uso del recurso hídrico y fortalecer estrategias de producción agrícola sostenible.

Integración de líneas de aplicación al cultivo

El sistema propuesto funciona bajo un ciclo continuo de recirculación hídrica con tratamiento por etapas, en el cual el agua es captada, tratada, acondicionada y reutilizada dentro del sistema productivo, permitiendo la optimización del recurso hídrico y la reducción del desperdicio de agua en la producción agrícola.

El flujo general del sistema se estructura de la siguiente manera:

Captación → Filtración → Control de calidad → Estabilización → Control de estabilidad → Nutrición mineral / Bioinsumos → Control final de solución → Aplicación al cultivo → Recirculación del agua

Este esquema permite que el agua atraviese procesos progresivos de tratamiento, en los cuales se proyecta una posible disminución de contaminantes físicos, químicos y microbiológicos mediante procesos progresivos de tratamiento y acondicionamiento del agua, y posteriormente se ajustan las condiciones físico-químicas y nutricionales antes de su aplicación en el cultivo. La incorporación de puntos de control intermedios mediante sistemas de válvulas o llaves permite verificar parámetros como pH, turbidez y conductividad eléctrica (CE), asegurando que el agua cumpla con condiciones mínimas de calidad antes de avanzar a la siguiente etapa del sistema.

El modelo propuesto contribuye a la optimización del uso del recurso hídrico, la reducción de pérdidas por escorrentía y la reutilización controlada del agua dentro del sistema productivo, lo cual incrementa la eficiencia del sistema agrícola y mejora la sostenibilidad del proceso de producción.

Asimismo, este enfoque se articula con principios de manejo integrado de sistemas agrícolas, en los cuales se combinan prácticas culturales, nutricionales y biológicas para mejorar la sostenibilidad del sistema productivo. En este sentido, Agrosavia destaca la importancia del manejo integrado de hortalizas bajo condiciones protegidas, donde la integración de estos componentes permite mejorar la eficiencia productiva y ambiental del sistema (Agrosavia).

Integración de líneas de aplicación al cultivo

La aplicación final del sistema se realiza mediante dos líneas independientes de aspersión, diseñadas para evitar interferencias entre procesos nutricionales y biológicos y

garantizar la eficiencia de cada componente del sistema.

La primera línea de aplicación corresponde a la solución nutritiva proveniente del tanque de fertilización mineral, la cual contiene los macronutrientes esenciales (nitrógeno, fósforo y potasio) y es aplicada bajo condiciones controladas de pH y conductividad eléctrica (CE), asegurando la adecuada disponibilidad de nutrientes para el desarrollo del cultivo.

La segunda línea de aplicación corresponde al sistema de bioinsumos, donde se aplican microorganismos benéficos como *Trichoderma harzianum*, utilizados en el control biológico de enfermedades en los cultivos hortícolas. Esta línea opera de manera independiente con el fin de preservar la viabilidad de los microorganismos y evitar su interacción con compuestos de origen químico.

Ambas líneas de aplicación funcionan en tiempos diferenciados de riego, lo que permite optimizar la absorción de nutrientes y la efectividad del control biológico, reduciendo interferencias entre procesos y mejorando el desempeño general del sistema productivo.

Este esquema de aplicación independiente refuerza la eficiencia del sistema de recirculación hídrica, al integrar de manera controlada la nutrición mineral y el manejo biológico dentro de un modelo de producción agrícola sostenible.

Variables del sistema

Las variables consideradas en el diseño del sistema de recirculación hídrica corresponden a los principales parámetros físicos, químicos y biológicos que influyen en la calidad del agua y en la eficiencia del sistema productivo. Estas variables permiten evaluar el comportamiento del sistema a lo largo de sus diferentes etapas de tratamiento y aplicación.

Entre las variables principales se incluyen:

- **Calidad del agua**, evaluada a partir de parámetros como turbidez y presencia de residuos

sólidos y disueltos.

- **Concentración de nutrientes en la solución**, especialmente nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), esenciales para el desarrollo vegetal.
- **Compatibilidad entre fertilizantes**, relacionada con la estabilidad de la solución nutritiva y la prevención de reacciones químicas no deseadas.
- **Actividad de microorganismos benéficos**, asociada a la eficacia de bioinsumos como *Trichoderma harzianum* en el control biológico.
- **Eficiencia del sistema de recirculación**, entendida como la capacidad del sistema para reutilizar el agua tratada manteniendo condiciones adecuadas para la producción agrícola.

Análisis conceptual del sistema propuesto

El esquema conceptual desarrollado plantea la integración de procesos de tratamiento, acondicionamiento y reutilización del agua dentro de un sistema agrícola de recirculación hídrica.

De acuerdo con la literatura científica analizada y los escenarios simulados en Python, el sistema propuesto podría contribuir teóricamente a:

- La reducción de sólidos suspendidos y turbidez mediante procesos de filtración física.
- La disminución potencial de contaminantes orgánicos mediante adsorción con biochar y carbón activado.
- La optimización conceptual del uso del recurso hídrico mediante recirculación controlada.
- La integración de estrategias biológicas complementarias orientadas a disminuir el uso de agroquímicos.

Los resultados obtenidos corresponden a proyecciones derivadas de simulación computacional y revisión documental, por lo que constituyen una aproximación conceptual sin

validación experimental en campo.

Simulación computacional del sistema en Python

Con el fin de complementar el análisis documental y fortalecer la viabilidad conceptual del sistema propuesto, se desarrolló una simulación computacional mediante Python. Esta simulación permitió representar teóricamente el comportamiento hidráulico y funcional del sistema de tratamiento y recirculación hídrica planteado para aplicaciones agrícolas.

El modelo fue estructurado considerando las diferentes etapas del sistema: captación, filtración física, estabilización, acondicionamiento nutricional y recirculación del agua. Asimismo, se incorporaron variables relacionadas con turbidez, sólidos suspendidos, flujo hidráulico, eficiencia de filtración y comportamiento general del sistema bajo condiciones simuladas.

Los resultados obtenidos corresponden a proyecciones teóricas derivadas de modelado computacional y no constituyen validaciones experimentales reales.

Estructura conceptual del sistema en Python

La simulación representa la estructura general del sistema de recirculación hídrica propuesto para aplicaciones agrícolas. Se observan las diferentes etapas del proceso, incluyendo captación del agua, filtración física, estabilización, acondicionamiento nutricional y reutilización dentro del sistema productivo.

El modelo permite visualizar el flujo continuo del agua y la interacción entre los diferentes componentes hidráulicos y de tratamiento considerados dentro del diseño conceptual.

Configuración computacional del modelo

La simulación representa la estructura general del sistema de recirculación hídrica propuesto para aplicaciones agrícolas. Se observan las diferentes etapas del proceso, incluyendo

captación del agua, filtración física, estabilización, acondicionamiento nutricional y reutilización dentro del sistema productivo.

El modelo permite visualizar el flujo continuo del agua y la interacción entre los diferentes componentes hidráulicos y de tratamiento considerados dentro del diseño conceptual.

Simulación del comportamiento hidráulico del sistema

La simulación representa el comportamiento conceptual del sistema bajo condiciones teóricas de operación. El modelo permite observar la circulación del agua entre las diferentes etapas del tratamiento y analizar de manera conceptual el comportamiento del flujo dentro del sistema.

Asimismo, la simulación facilita la evaluación preliminar de la interacción entre procesos de filtración, estabilización y reutilización del recurso hídrico en sistemas agrícolas.

Parámetros de simulación y configuración del sistema

El modelo computacional desarrollado en Python fue configurado mediante parámetros hidráulicos, fisicoquímicos y operacionales obtenidos a partir de literatura científica especializada y criterios conceptuales de simulación. Estos parámetros permitieron representar el comportamiento preliminar del sistema de recirculación hídrica bajo diferentes escenarios de operación agrícola.

Tabla 2.

Parámetros de simulación

Categoría	Parámetro	Rango configurado	Valor utilizado	Unidad
Agua de drenaje agrícola	Horas de operación	1 – 24	8	h/día
	Caudal de drenaje	10 – 500	100	L/h
	Volumen diario estimado	—	800	L/día
	Área de captación	10 – 500	80	m ²

Captación de agua lluvia	Precipitación mensual	20 – 400	120	mm
	Aporte de lluvia estimado	—	320	L/día
Sistema de riego	Área de cultivo	50 – 500	100	m ²
	Consumo hídrico	1 – 10	5	L/m ² /día
Calidad inicial del agua	DQO inicial	50 – 500	200	mg/L
	DBO ₅ inicial	20 – 400	150	mg/L
	Turbidez inicial	10 – 200	80	NTU
	TDS inicial	100 – 1000	500	mg/L
	pH inicial	4.00 – 8.00	5.5	pH
Dimensionamiento de filtros	Volumen filtro de arena	10 – 100	35	L
	Volumen filtro biochar	5 – 60	15	L
	Volumen filtro carbón activado	5 – 50	10	L
TN-01 Tanque de nutrientes	pH objetivo	6.00 – 7.50	6.5	pH
	Nitrógeno (N)	0 – 200	80	mg/L
	Fósforo (P)	0 – 100	30	mg/L
	Potasio (K)	0 – 150	50	mg/L
TB-01 Tanque de bioinsumos	Bioinsumo utilizado	—	<i>Trichoderma harzianum</i>	—
	Concentración	0.50 – 10.00	2	mL/L
	Reducción potencial de agroquímicos	0 – 80	30	%
Recirculación hídrica	Porcentaje de recirculación	0 – 80	20	%

Nota. Elaboración propia

Los parámetros incorporados dentro del entorno de simulación permitieron establecer condiciones hidráulicas, operacionales y fisicoquímicas para el análisis conceptual del sistema de tratamiento y recirculación hídrica. La configuración del modelo consideró variables asociadas a calidad inicial del agua, dimensionamiento de filtros, aprovechamiento de agua lluvia,

recirculación y dosificación conceptual de nutrientes y bioinsumos.

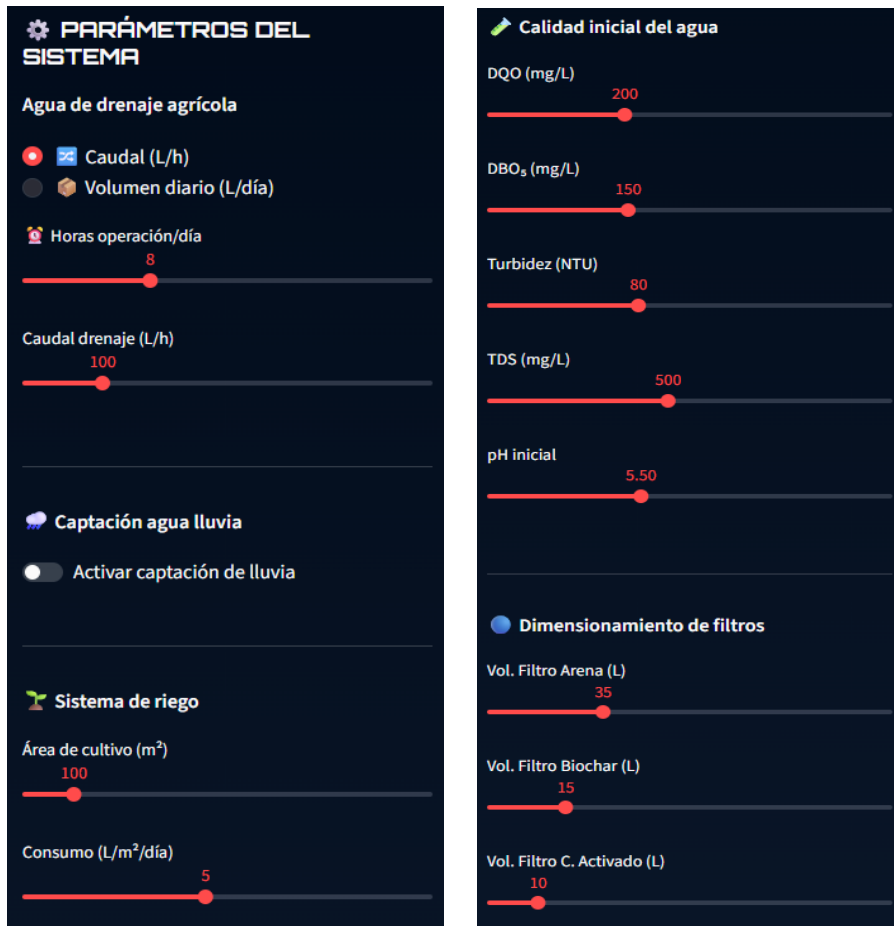
Los parámetros incorporados dentro del entorno de simulación fueron seleccionados a partir de rangos reportados en estudios científicos relacionados con tratamiento de aguas agrícolas, procesos de adsorción y reutilización hídrica, priorizando valores representativos para escenarios agrícolas de pequeña y mediana escala

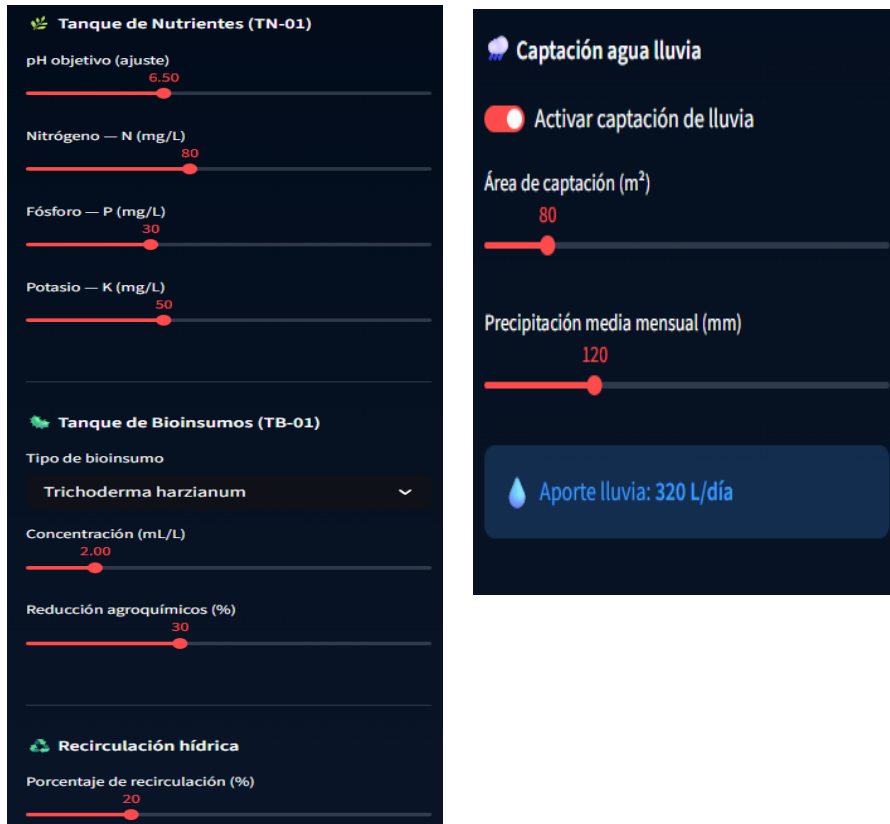
Interfaz y configuración del entorno de simulación

La Figura 1 presenta la interfaz desarrollada para la simulación computacional del sistema de tratamiento y recirculación hídrica, en la cual se integraron variables de calidad del agua, indicadores operativos y métricas de desempeño hidráulico.

Figura 1.

Interfaz principal del sistema de simulación computacional desarrollado en Python.





Nota Elaboración propia

La interfaz permitió visualizar dinámicamente parámetros relacionados con eficiencia de remoción, comportamiento hidráulico, saturación de filtros y balance hídrico del sistema. Asimismo, facilitó el análisis preliminar de tendencias operativas bajo diferentes configuraciones simuladas.

Código fuente del modelo computacional

El modelo computacional fue desarrollado mediante Python con el propósito de representar conceptualmente el comportamiento hidráulico y funcional del sistema de tratamiento y recirculación hídrica propuesto.

La programación permitió integrar variables relacionadas con turbidez, sólidos suspendidos, eficiencia de filtración, conductividad eléctrica, flujo hidráulico y recirculación del agua, facilitando la simulación teórica de diferentes escenarios operativos.

Debido a la extensión del código fuente desarrollado, el script completo se presenta en el

Anexo A como material complementario del proyecto.

Resultados gráficos de la simulación

Las gráficas obtenidas mediante la simulación permiten analizar de manera teórica el comportamiento de variables relacionadas con la calidad del agua y el desempeño del sistema de tratamiento.

Los escenarios evaluados mediante simulación evidenciaron una tendencia hacia la reducción gradual de los contaminantes físicos y una mayor estabilidad de los parámetros hidráulicos durante el proceso de recirculación del agua.

No obstante, es importante precisar que los resultados obtenidos corresponden a una aproximación teórica sustentada en simulaciones computacionales y en información reportada por la literatura científica. En consecuencia, estos resultados no deben considerarse como mediciones experimentales directas, sino como una representación del comportamiento esperado del sistema bajo las condiciones establecidas en el modelo.

Aporte de la simulación al desarrollo del proyecto

La aplicación de herramientas de simulación en Python contribuyó al fortalecimiento técnico de la propuesta conceptual para el tratamiento y la reutilización del recurso hídrico. Esta metodología permitió analizar de manera preliminar el desempeño potencial del sistema sin recurrir a la implementación de pruebas piloto, lo que facilitó la evaluación inicial de su viabilidad operativa.

Adicionalmente, el modelado computacional favoreció la representación gráfica de los procesos involucrados y proporcionó un soporte teórico para la integración de tecnologías de filtración, adsorción y recirculación hídrica descritas en estudios previos.

Por tanto, la simulación constituyó una herramienta de apoyo para la valoración

conceptual de estrategias orientadas al tratamiento y aprovechamiento sostenible del agua en sistemas agrícolas colombianos.

Conclusión metodológica

La metodología empleada permitió articular la revisión sistemática de la literatura, el análisis comparativo de diferentes tecnologías y la simulación computacional como herramientas complementarias para el desarrollo conceptual de un sistema de tratamiento y reutilización de agua orientado al sector agrícola colombiano.

Mediante el uso de Python fue posible representar de manera teórica los procesos de filtración, adsorción y recirculación hídrica a partir de parámetros reportados en investigaciones especializadas. Esto facilitó la evaluación preliminar del comportamiento esperado del sistema bajo distintas condiciones de operación.

En conjunto, la propuesta desarrollada puede considerarse una aproximación conceptual para el estudio de alternativas sostenibles de gestión del recurso hídrico en la agricultura. Su aplicación resulta particularmente relevante en entornos rurales donde las restricciones económicas y tecnológicas limitan la implementación de soluciones convencionales para el tratamiento y la reutilización del agua.

Resultados

Descripción de la labor de investigación y procesamiento de datos

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto con predominio documental y computacional sustentado en la metodología PRISMA, orientada a la identificación, selección y análisis sistemático de literatura científica relacionada con tecnologías de tratamiento y reutilización del agua en sistemas agrícolas.

A partir del proceso de revisión se seleccionaron 15 estudios científicos, de los cuales se

extrajo información técnica relacionada con eficiencia de remoción de contaminantes, parámetros de calidad del agua, tecnologías de tratamiento y aplicabilidad en contextos agrícolas.

La información recopilada se organizó en matrices comparativas con el propósito de facilitar su análisis e interpretación. A partir de esta organización fue posible reconocer tendencias entre los estudios revisados, así como identificar los niveles de eficiencia reportados y los principales aspectos relacionados con la viabilidad técnica de tecnologías de bajo costo aplicables al sector agrícola colombiano.

Adicionalmente, los resultados documentales fueron utilizados como base para la construcción conceptual del modelo computacional desarrollado en Python.

Resultados de eficiencia de tecnologías de tratamiento

Los estudios analizados reportan que el biochar presenta altas eficiencias de remoción de contaminantes, especialmente en parámetros asociados a turbidez, color y metales, alcanzando valores superiores al 90% en algunos casos.

Asimismo, la literatura evidencia que la filtración mediante arena presenta eficiencias moderadas cuando es utilizada de manera independiente, mientras que los sistemas combinados con carbón activado o biochar mejoran significativamente el desempeño del tratamiento.

De igual forma, tecnologías naturales como humedales artificiales y filtros biológicos muestran resultados favorables en la reducción de materia orgánica y carga contaminante, aunque su implementación puede depender de condiciones operativas específicas.

En conjunto, los estudios revisados sugieren que la integración de tecnologías físicas y de adsorción representa una alternativa técnicamente viable para el tratamiento de agua en sistemas agrícolas.

Tabla 3.

Eficiencia de remoción de contaminantes en tecnologías de bajo costo

Tecnología	Parámetro evaluado	Eficiencia (%)
Biochar	Turbidez	93.9
Biochar	Color	90.75
Biochar	Hierro	95.7
Biochar	DQO	74
Arena	DQO	61
Arena + carbón activado	DQO	60.2
Filtro biológico	DQO	>60
Biochar (biomasa)	Metales	≈95
Humedales artificiales	Materia orgánica	>70

Nota. Adaptado de García-Ávila et al. (2023); Kaetzel et al. (2020); López Guerrero & Sánchez (2015); Serrano et al. (2023)

Interpretación

- El biochar presenta el mayor desempeño en la remoción de contaminantes, especialmente en metales, turbidez y color, alcanzando eficiencias superiores al 90%, lo que lo posiciona como una tecnología altamente efectiva en procesos de adsorción.
- La filtración con arena muestra una eficiencia moderada, principalmente en la reducción de materia orgánica, lo que limita su uso como tratamiento independiente.
- La combinación de arena y carbón activado permite mejorar la remoción de contaminantes mediante la integración de procesos físicos y químicos.
- Los filtros biológicos y humedales artificiales presentan eficiencias aceptables, destacándose como alternativas sostenibles, aunque condicionadas por factores operativos como el espacio y el tiempo de tratamiento.

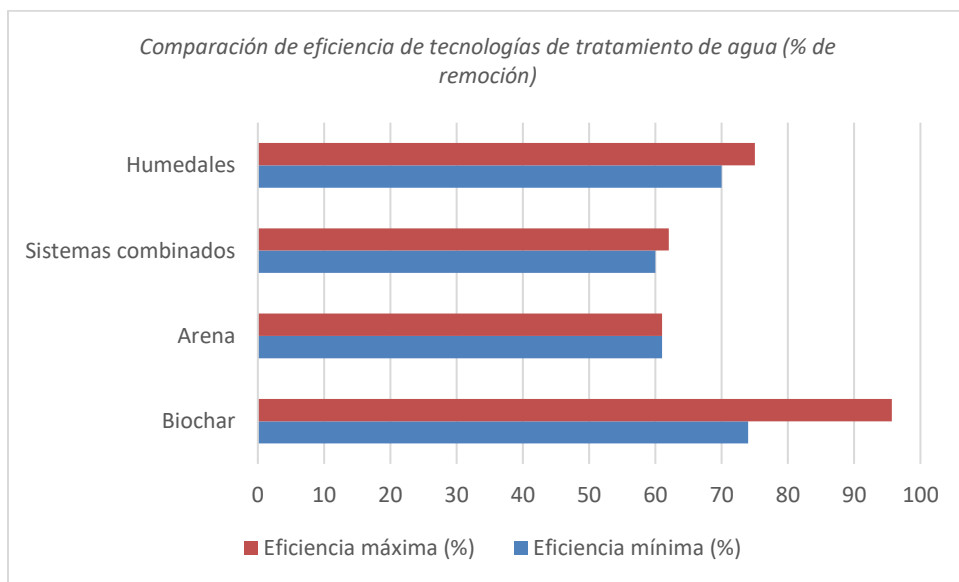
En conjunto, estos resultados evidencian que la integración de tecnologías es clave para optimizar la eficiencia del tratamiento del agua en sistemas agrícolas.

Análisis gráfico de eficiencia

En la Figura 2 se presenta la comparación general de la eficiencia de remoción de contaminantes según el tipo de tecnología, con el fin de visualizar de manera integrada el desempeño de cada alternativa. Los rangos de eficiencia reportados en la literatura fueron utilizados como referencia conceptual para la parametrización preliminar del modelo computacional desarrollado en Python.

Figura 2.

Comparación de eficiencia de tecnologías de tratamiento de agua (% de remoción)



(Biochar: 74–95.7%; Arena: 61%; Sistemas combinados: ~60%; Humedales: >70%)

Nota. Adaptado de García-Ávila et al. (2023) y Kaetzl et al. (2020).

Interpretación

El análisis gráfico permite identificar que:

- El biochar presenta la mayor eficiencia global, consolidándose como la tecnología más efectiva.
- La arena tiene un desempeño limitado en comparación con otras alternativas.

- Los sistemas combinados mejoran la eficiencia respecto a tecnologías individuales.
- Los humedales artificiales son eficientes en la remoción de materia orgánica, pero presentan limitaciones prácticas.

Estos resultados confirman la necesidad de implementar sistemas híbridos, como el propuesto en la investigación, para maximizar la eficiencia del tratamiento.

Resultados sobre calidad del agua en sistemas agrícolas

La literatura analizada evidencia que las fuentes de agua utilizadas en sistemas agrícolas pueden presentar variaciones importantes en parámetros fisicoquímicos y presencia de contaminantes asociados al uso de agroquímicos.

Los estudios revisados reportan concentraciones elevadas de materia orgánica, sólidos disueltos y residuos de plaguicidas, condiciones que pueden limitar la reutilización directa del recurso hídrico sin tratamiento previo.

En la **Tabla 4** se resumen las principales problemáticas identificadas.

Tabla 4.

Condiciones de calidad del agua en sistemas agrícolas

Parámetro	Condición identificada	Implicación
pH	Variable	Afecta la disponibilidad de nutrientes
DQO/DBO	Elevada	Indica contaminación orgánica
Sólidos disueltos	Altos	Riesgo de salinización del suelo
Plaguicidas	Presencia confirmada	Riesgo ambiental y sanitario

Nota. Adaptado de Guerrero Pacheco et al. (2021); Muñoz Villareal (2024); IDEAM (2022).

Interpretación

Los resultados indican que:

- El agua de origen agrícola presenta altos niveles de contaminación, principalmente asociados al uso de agroquímicos.
- La presencia de materia orgánica y sólidos disueltos afecta la calidad del suelo y del cultivo.
- La variabilidad del pH influye directamente en la absorción de nutrientes.
- La presencia de plaguicidas genera impactos ambientales y riesgos para la salud.

Por tanto, se establece que el agua no puede ser reutilizada sin un tratamiento previo adecuado.

Resultados del análisis del sistema propuesto

Con base en los hallazgos obtenidos, se diseñó un sistema de recirculación hídrica estructurado en etapas funcionales.

En la **Tabla 5** se presenta la relación entre cada etapa y su función dentro del sistema.

Tabla 5.

Relación entre etapas del sistema y función técnica

Etapa	Función	Resultado esperado
Captación	Recolección de agua residual/lluvias	Ingreso al sistema
Filtración	Remoción física y adsorción	Reducción de contaminantes
Estabilización	Homogeneización fisicoquímica	Control de pH y sólidos
Nutrición	Ajuste de nutrientes	Mejora del rendimiento del cultivo
Bioinsumos	Control biológico	Disminución de patógenos

Nota. Elaboración propia con base en la literatura analizada.

Resultados de la simulación computacional

Con el fin de complementar el análisis documental, se desarrolló una simulación computacional conceptual mediante Python con uso de las bibliotecas streamlit y matplotlib. La

simulación permitió representar el comportamiento teórico del sistema de recirculación hídrica bajo diferentes condiciones de operación, considerando variables relacionadas con flujo hidráulico, filtración, estabilización y reutilización del agua.

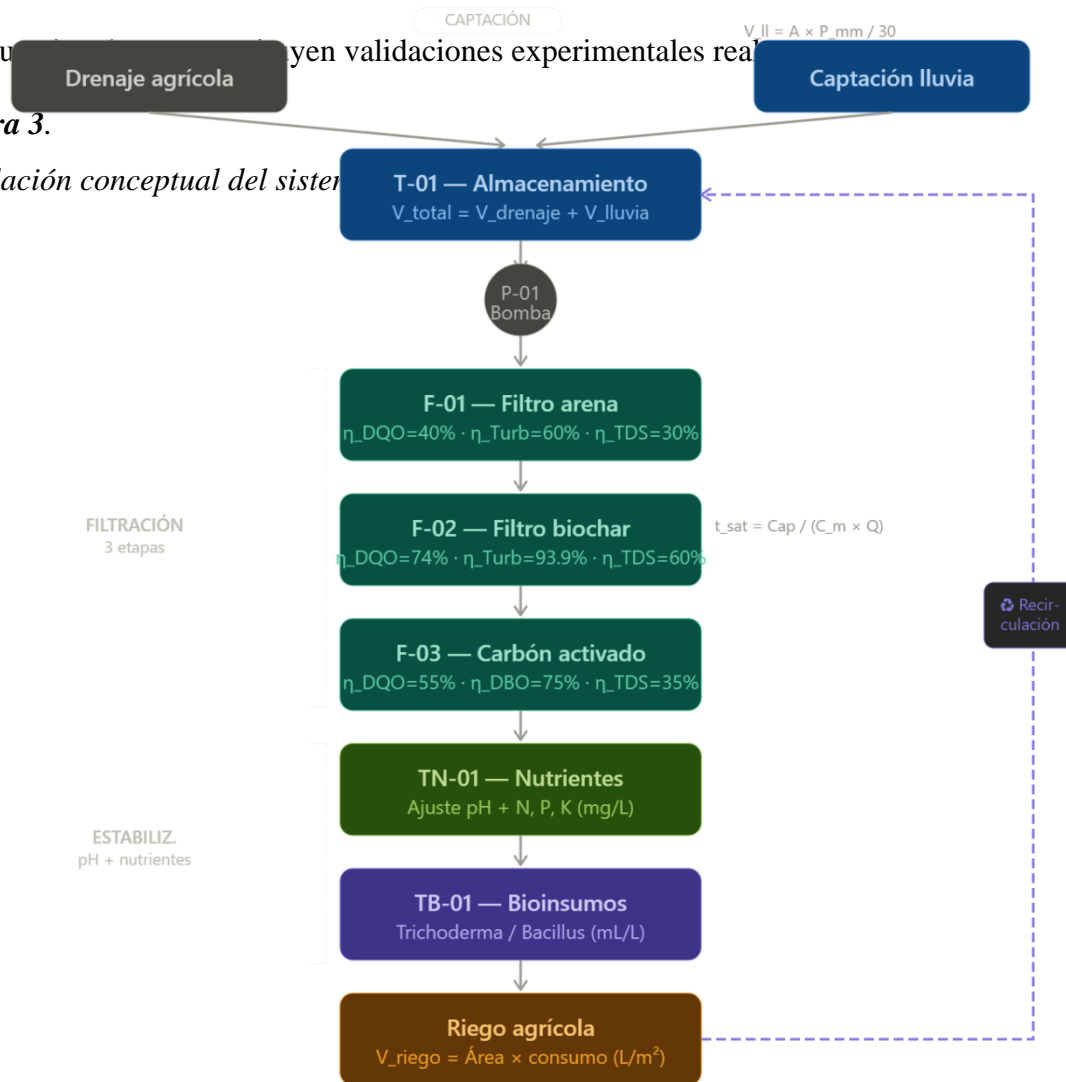
Los escenarios simulados sugieren una tendencia potencial de reducción progresiva de contaminantes físicos a lo largo de las etapas de tratamiento, así como una estabilización conceptual de parámetros asociados a turbidez y sólidos suspendidos.

Asimismo, el modelo permitió representar gráficamente la interacción entre las etapas del sistema y analizar de manera conceptual la integración de procesos de filtración, adsorción y recirculación hídrica.

Los resultados obtenidos corresponden a proyecciones teóricas derivadas del modelado computacional y en validaciones experimentales reales.

Figura 3.

Simulación conceptual del sistema



Referencias de color:

- Fuentes
- Almacenamiento
- Filtración
- Nutrientes
- Bioinsumos
- Riego

Nota. Elaboración propia

Las ecuaciones implementadas en el modelo computacional fueron adaptadas conceptualmente a partir de parámetros reportados en literatura especializada:

Filtración por etapa

- **Concentración de salida (contaminantes):**

$$C_{sal} = C_{ent} \times (1 - \eta)$$

- **Ajuste de pH:**

$$pH_{sal} = \min(pH_{ent} + \eta_{pH}, 7.0)$$

Donde η es la eficiencia de remoción de cada filtro (adimensional, entre 0 y 1).

Eficiencias de remoción por etapa (basadas en literatura)

Tabla 6.

Eficiencias de remoción de contaminantes.

Filtro	η_{DQO}	η_{DBO}	$\eta_{Turbidez}$	η_{TDS}	η_{pH}	Fuente
F-01 Arena	0.4	0.35	0.6	0.3	0.2	López Guerrero & Sánchez (2015)
F-02 Biochar	0.74	0.7	0.939	0.6	0.5	Kaetzl (2020); García-Ávila (2023)
F-03 C. Activado	0.55	0.75	0.45	0.35	0.1	Delgado-Rebolledo (2024)

Nota. Elaboración propia

- **Remoción total del sistema (3 etapas)**

$$R_{total}(\%) = (1 - C_{final} / C_{inicial}) \times 100$$

Modelo de saturación de filtros

- **Carga másica retenida por litro de agua tratada:**

$$C_m = \sum (C_{entrada,p} - C_{salida,p}) \text{ para } p \in \{DQO, DBO, Turbidez, TDS\}$$

- **Capacidad total del filtro:**

$$Cap_{total} = Cap_{específica} \times Vol_{filtro} \text{ (mg)}$$

Donde $Cap_{específica}$ (mg/L de medio filtrante):

- Arena: 20 000 mg/L
- Biochar: 200 000 mg/L
- Carbón Activado: 80 000 mg/L
- **Tasa de carga másica:**

$$Tasa = C_m \times Q \text{ (mg/h)}$$

- **Tiempo hasta saturación:**

$$t_{sat} \text{ (h)} = Cap_{total} / Tasa$$

$$t_{sat} \text{ (días)} = t_{sat} \text{ (h)} / \text{horas}_{operación_día}$$

Captación de agua lluvia

$$V_{lluvia} = A_{captación} \times P_{mensual} / 30 \text{ (L/día)}$$

Donde:

- $A_{captación}$ = área de captación (m^2)
- $P_{mensual}$ = precipitación media mensual (mm/mes)
- Factor 1 mm/mes sobre 1 $m^2 = 1 \text{ L/m}^2$

Balance hídrico total

$$V_{total} = V_{drenaje} + V_{lluvia} \text{ (L/día)}$$

$$V_{recirculado} = V_{total} \times (\%_{recirc} / 100)$$

$$V_{disponible_riego} = V_{total} - V_{recirculado}$$

$$V_{demanda_riego} = \text{Área}_{cultivo} \times \text{consumo} \text{ (L/día)}$$

$$\text{Balance} = V_{disponible_riego} - V_{demanda_riego}$$

Si $\text{Balance} > 0 \rightarrow$ excedente hídrico Si $\text{Balance} < 0 \rightarrow$ déficit hídrico

Proyección de mejora por bioinsumos (ciclo siguiente)

$$DQO_{(n+1)} = DQO_n \times (1 - \%_reducción \times 0.60 / 100)$$

$$DBO_{(n+1)} = DBO_n \times (1 - \%_reducción \times 0.51 / 100)$$

Interfaz y monitoreo de variables simuladas

Panel de métricas principales

La simulación permitió visualizar indicadores operacionales relacionados con desempeño hidráulico, comportamiento de los medios filtrantes y disponibilidad de agua para reutilización agrícola.

Figura 4.

Panel de métricas



Nota. Elaboración propia

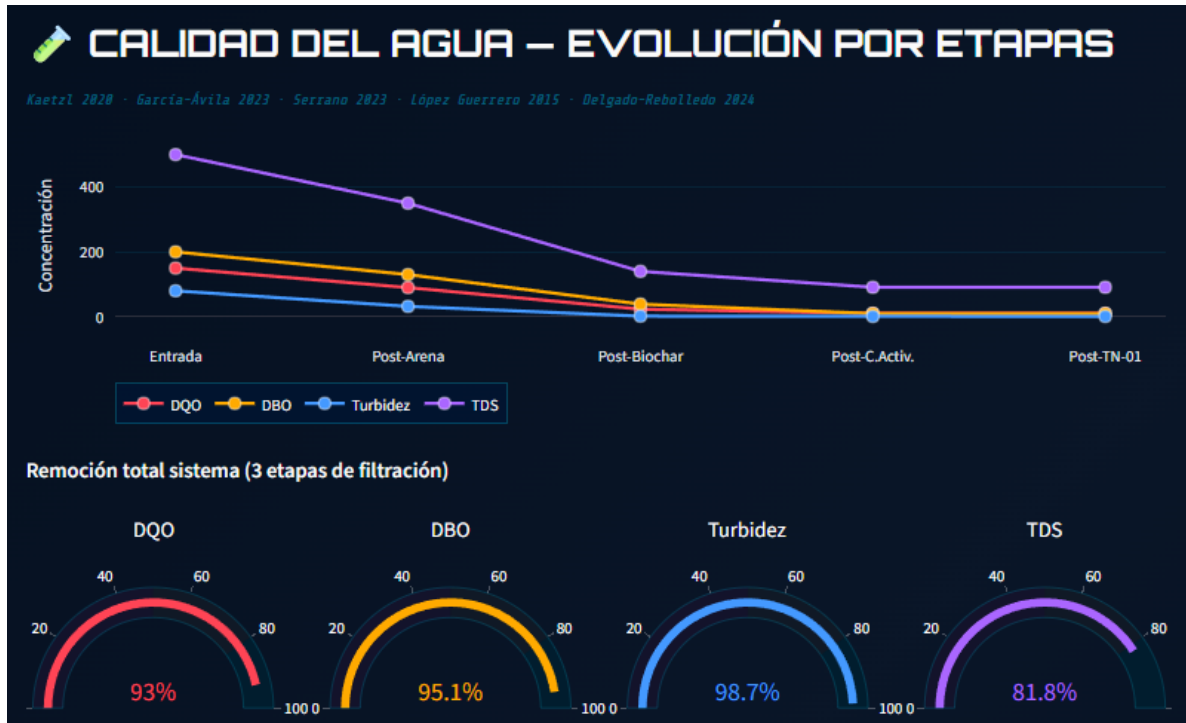
Los resultados simulados sugieren que la incorporación de múltiples etapas de filtración podría favorecer una reducción progresiva de contaminantes y una mejora potencial en la calidad final del agua destinada a recirculación y riego agrícola. Asimismo, el modelo permitió estimar tendencias de saturación de los materiales filtrantes bajo condiciones operativas continuas.

Evolución simulada de la calidad del agua por etapas

La simulación permitió analizar el comportamiento potencial de diferentes parámetros fisicoquímicos del agua a través de las etapas de tratamiento implementadas dentro del sistema de recirculación hídrica.

Figura 5.

Evolución por etapas



Nota. Elaboración propia

Los escenarios simulados muestran una tendencia progresiva de disminución en las concentraciones de DQO, DBO, turbidez y TDS a medida que el agua atraviesa las diferentes etapas de filtración y adsorción. Sin embargo, estas variaciones corresponden a proyecciones computacionales derivadas de parametrización teórica y no constituyen mediciones experimentales reales.

Saturación de filtros y comportamiento operacional

El modelo computacional permitió representar tendencias de saturación de los materiales filtrantes bajo escenarios de operación continua y recirculación hídrica.

Figura 6.

Saturación filtros



Nota. Elaboración propia

Los resultados simulados sugieren que la saturación progresiva de los medios filtrantes podría influir directamente sobre la eficiencia global del sistema, particularmente en condiciones de operación prolongada. Asimismo, la simulación permitió estimar intervalos potenciales de mantenimiento y reemplazo de materiales adsorbentes según el volumen de agua tratado.

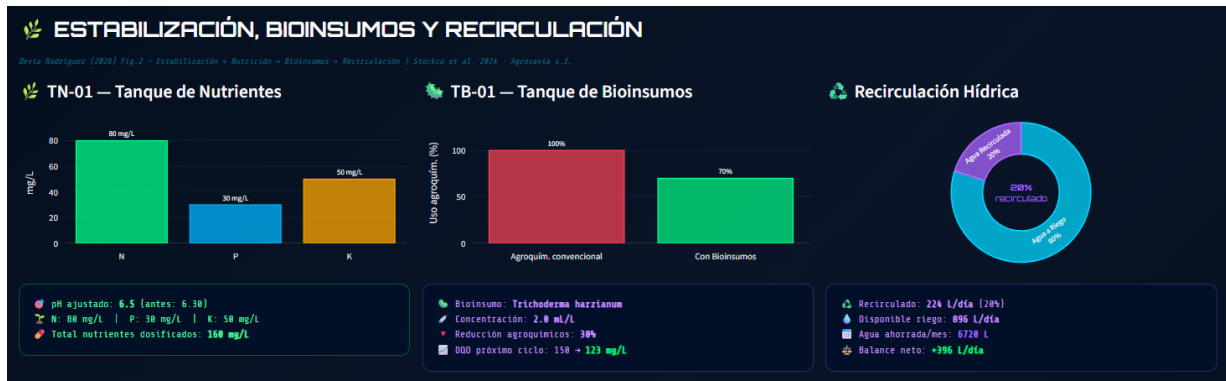
Estabilización, bioinsumos y recirculación

El sistema incorporó de manera conceptual estrategias de estabilización, bioinsumos y

recirculación hídrica orientadas a favorecer el aprovechamiento eficiente del recurso hídrico dentro del proceso agrícola.

Figura 7.

Entorno de los tanques y recirculación hídrica.



Nota. Elaboración propia

TN-01 Tanque nutrientes:

Dentro del entorno de simulación se incorporó el tanque TN-01, destinado a la dosificación conceptual de nutrientes para reutilización agrícola. La configuración simulada consideró un pH de 6.5 y concentraciones aproximadas de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) de 80 mg/L, 30 mg/L y 50 mg/L, respectivamente, alcanzando una dosificación total estimada de nutrientes de 160 mg/L.

La incorporación conceptual de nutrientes dentro del sistema de recirculación hídrica sugiere una posible integración entre tratamiento de agua y aprovechamiento agrícola, permitiendo proyectar escenarios orientados hacia estrategias de fertirriego y reutilización parcial de recursos dentro del modelo simulado.

TB-01 Tanque Bioinsumos:

El sistema también incorporó el tanque TB-01, orientado a la simulación conceptual de bioinsumos biológicos mediante el uso de *Trichoderma harzianum*. La configuración del modelo

consideró una concentración aproximada de 2.0 mL/L y una reducción potencial de agroquímicos cercana al 30% dentro de los escenarios simulados.

Adicionalmente, la simulación proyectó una posible disminución de la DQO para ciclos posteriores de operación, pasando de valores aproximados de 200 mg/L a 123 mg/L bajo condiciones asociadas a la incorporación del bioinsumo. Sin embargo, estas variaciones corresponden exclusivamente a tendencias simuladas derivadas de parametrización teórica y no representan validaciones microbiológicas experimentales reales.

Recirculación hídrica:

La simulación permitió representar un esquema conceptual de recirculación hídrica en el cual aproximadamente 224 L/día del flujo tratado fueron proyectados para recirculación interna, equivalentes al 20% del volumen total procesado. Asimismo, el modelo estimó una disponibilidad potencial de 896 L/día para riego agrícola.

Bajo las condiciones simuladas, el sistema proyectó un ahorro hídrico aproximado de 6720 L mensuales y un balance neto positivo cercano a +396 L/día. Estos resultados sugieren un posible potencial de aprovechamiento hídrico mediante estrategias de reutilización parcial del agua tratada dentro de contextos agrícolas de pequeña y mediana escala.

No obstante, dichos valores corresponden a proyecciones computacionales derivadas de escenarios simulados y requieren validación experimental futura para determinar su comportamiento bajo condiciones reales de operación.

Balance hídrico completo

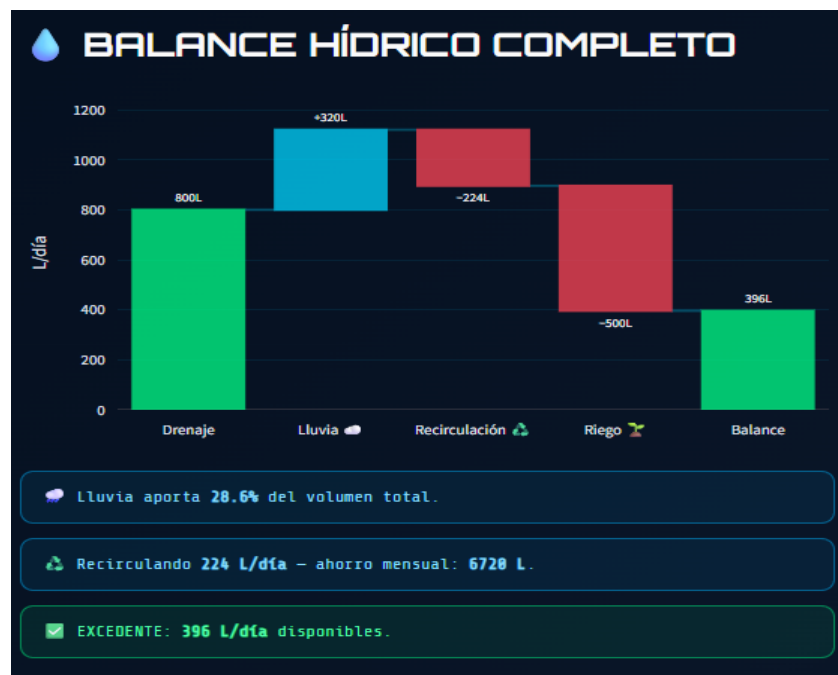
El modelo computacional incorporó un balance hídrico conceptual orientado a representar las principales entradas, salidas y flujos de recirculación dentro del sistema agrícola simulado. La integración de variables relacionadas con drenaje, precipitación, reutilización y

distribución para riego permitió analizar preliminarmente el comportamiento hidráulico general del sistema bajo diferentes condiciones operativas.

Los escenarios simulados consideraron un volumen de drenaje aproximado de 800 L/día como flujo principal de entrada al sistema. Adicionalmente, se incorporó un aporte de precipitación equivalente a 320 L/día, representando aproximadamente el 28.6% del volumen total de agua procesado dentro del entorno de simulación.

Figura 8.

Balance Hídrico



Nota. Elaboración propia

El balance hídrico general del sistema presentó un excedente simulado aproximado de 396 L/día disponibles dentro de los escenarios evaluados. Estos resultados sugieren un posible potencial de aprovechamiento eficiente del recurso hídrico mediante procesos de recirculación y reutilización parcial en contextos agrícolas.

Los resultados simulados evidencian que la incorporación de estrategias de recirculación

hídrica podría contribuir potencialmente a disminuir la demanda de agua fresca dentro del sistema agrícola. Asimismo, la integración de aportes de precipitación y reutilización parcial del agua tratada favorece una aproximación orientada hacia esquemas de aprovechamiento hídrico más sostenibles desde una perspectiva conceptual.

No obstante, los valores obtenidos corresponden exclusivamente a proyecciones derivadas del modelo computacional desarrollado y requieren validación experimental futura para verificar su comportamiento bajo condiciones reales de operación agrícola.

Ciclo completo del sistema

Figura 9.

Ciclo del sistema



Nota. Elaboración propia

La Figura 9 presenta el ciclo operacional completo del sistema de tratamiento y recirculación hídrica desarrollado dentro del entorno de simulación.

Alertas y recomendaciones

El entorno de simulación incorporó mecanismos conceptuales de alertas operacionales orientados a identificar posibles condiciones críticas relacionadas con saturación de filtros, mantenimiento preventivo, comportamiento hidráulico y calidad del agua dentro del sistema de recirculación hídrica.

Figura 10.

Alertas y recomendaciones



Nota. Elaboración propia

Las alertas generadas por la simulación permitieron representar posibles escenarios operacionales asociados a saturación progresiva de medios filtrantes, mantenimiento preventivo y desempeño hidráulico del sistema. Los resultados sugieren que el filtro de arena presentaría una saturación más rápida en comparación con los demás materiales adsorbentes, lo cual podría relacionarse con su función inicial dentro de la secuencia de tratamiento y con la acumulación progresiva de sólidos suspendidos.

Asimismo, los escenarios simulados proyectaron una remoción potencial de DQO cercana al 93%, manteniendo valores asociados teóricamente a parámetros contemplados en la Resolución 631 de 2015 para vertimientos. Sin embargo, estos resultados corresponden exclusivamente a proyecciones derivadas del modelo computacional y no constituyen evidencia experimental de cumplimiento normativo real.

De igual manera, la incorporación conceptual de *Trichoderma harzianum* dentro del tanque TB-01 permitió proyectar una reducción potencial parcial del uso de agroquímicos y una posible disminución de la DQO en ciclos posteriores de operación. No obstante, dichas variaciones corresponden a parametrizaciones teóricas y requieren validación microbiológica

experimental futura.

En términos hidráulicos, el sistema proyectó un balance positivo aproximado de 396 L/día y una recirculación equivalente al 20% del flujo tratado, representando un ahorro hídrico potencial cercano a 6720 L mensuales. Estos resultados sugieren un posible aporte conceptual hacia estrategias de reutilización y aprovechamiento eficiente del recurso hídrico en sistemas agrícolas.

La incorporación de alertas operacionales dentro del entorno de simulación representa una aproximación preliminar hacia sistemas de monitoreo y soporte de decisión aplicados a procesos de tratamiento y recirculación hídrica. Este tipo de herramientas podría contribuir en futuras investigaciones al desarrollo de esquemas de mantenimiento predictivo y optimización operacional en sistemas agrícolas sostenibles.

Selección de materiales del sistema propuesto

Con el propósito de favorecer la viabilidad técnica, económica y operativa del sistema de recirculación hídrica propuesto, la selección de materiales se realizó con base en criterios de resistencia, disponibilidad, costo y compatibilidad con los procesos de tratamiento de agua en contextos agrícolas. En este sentido, se prioriza el uso de materiales plásticos como el PVC y el polietileno de alta densidad (PEAD), debido a su alta resistencia química, durabilidad y viabilidad económica. Asimismo, su elección se encuentra respaldada por la normativa técnica colombiana, la cual establece que los materiales empleados en sistemas hidráulicos deben garantizar la calidad del agua y la eficiencia operativa del sistema (Ministerio de Vivienda, 2022; ICONTEC, 2023).

Criterios de selección

La selección de materiales se fundamentó en los siguientes criterios:

- Resistencia a la corrosión y a compuestos químicos presentes en el agua agrícola
- Disponibilidad en el mercado local colombiano
- Facilidad de instalación, operación y mantenimiento
- Bajo costo para facilitar su implementación en pequeños y medianos productores
- Adaptabilidad a sistemas modulares y escalables

Materiales estructurales del sistema

En la **Tabla 7** se presentan los materiales seleccionados para cada componente del sistema de tratamiento.

Tabla 7.

Materiales propuestos para la construcción del sistema de tratamiento

Componente	Material recomendado	Justificación técnica
Tanques	Polietileno (PEAD)	Alta resistencia química y durabilidad
Tuberías	PVC	Bajo costo y facilidad de instalación
Medios filtrantes	Arena, grava, biochar	Alta eficiencia de remoción
Contenedores	Plástico reciclado o PEAD	Económico y resistente
Soportes	Estructura metálica ligera	Estabilidad estructural

Nota. Elaboración propia con base en criterios de ingeniería y disponibilidad en el mercado.

Selección de materiales plásticos

Los materiales plásticos representan una solución eficiente debido a su relación costo-beneficio. Se destacan:

- Polietileno de alta densidad (PEAD):
 - Alta resistencia a agentes químicos
 - Larga vida útil
 - Aplicación en tanques y almacenamiento

- Policloruro de vinilo (PVC):
 - Económico y de fácil instalación
 - Adecuado para tuberías y conexiones
- Plásticos reciclados:
 - Alternativa sostenible y de bajo costo
 - Aplicable en sistemas de filtración

Viabilidad económica del sistema

La selección de materiales permite reducir significativamente los costos de implementación en comparación con tecnologías convencionales.

Además:

- Facilita la adopción del sistema en contextos rurales
- Reduce costos de mantenimiento
- Promueve el uso de materiales sostenibles

Integración con el sistema propuesto

Los materiales seleccionados son compatibles con el diseño por etapas del sistema, permitiendo:

- Modularidad en la instalación
- Escalabilidad del sistema
- Facilidad de operación

Análisis de resultados

Los hallazgos identificados en la revisión documental respaldan el supuesto relacionado con la influencia del uso de agroquímicos sobre la calidad del agua en sistemas agrícolas.

Asimismo, la literatura científica revisada sugiere que las tecnologías de bajo costo

basadas en filtración y adsorción presentan potencial para contribuir al tratamiento y reutilización del agua en contextos agrícolas.

Propuesta de solución a la problemática

Situación actual

- Uso intensivo de agroquímicos
- Contaminación de fuentes hídricas
- Baja reutilización del agua
- Limitaciones tecnológicas en pequeños productores

Oportunidades identificadas

- Disponibilidad de tecnologías de bajo costo (biochar, arena, carbón activado)
- Alta eficiencia en la remoción de contaminantes
- Posibilidad de integrar sistemas por etapas
- Uso de control biológico como alternativa sostenible
- Disponibilidad de materiales económicos (PEAD, PVC)

Propuesta de solución

Con base en los hallazgos documentales y en los resultados obtenidos mediante simulación conceptual, se propone un modelo conceptual de recirculación hídrica que integra procesos físicos, químicos y biológicos orientados al tratamiento y reutilización del agua en sistemas agrícolas.

El sistema incluye:

- Captación de agua de drenaje agrícola y, de manera complementaria, recolección de agua lluvia como fuente alternativa en periodos de baja disponibilidad hídrica
- Filtración física mediante arena y grava

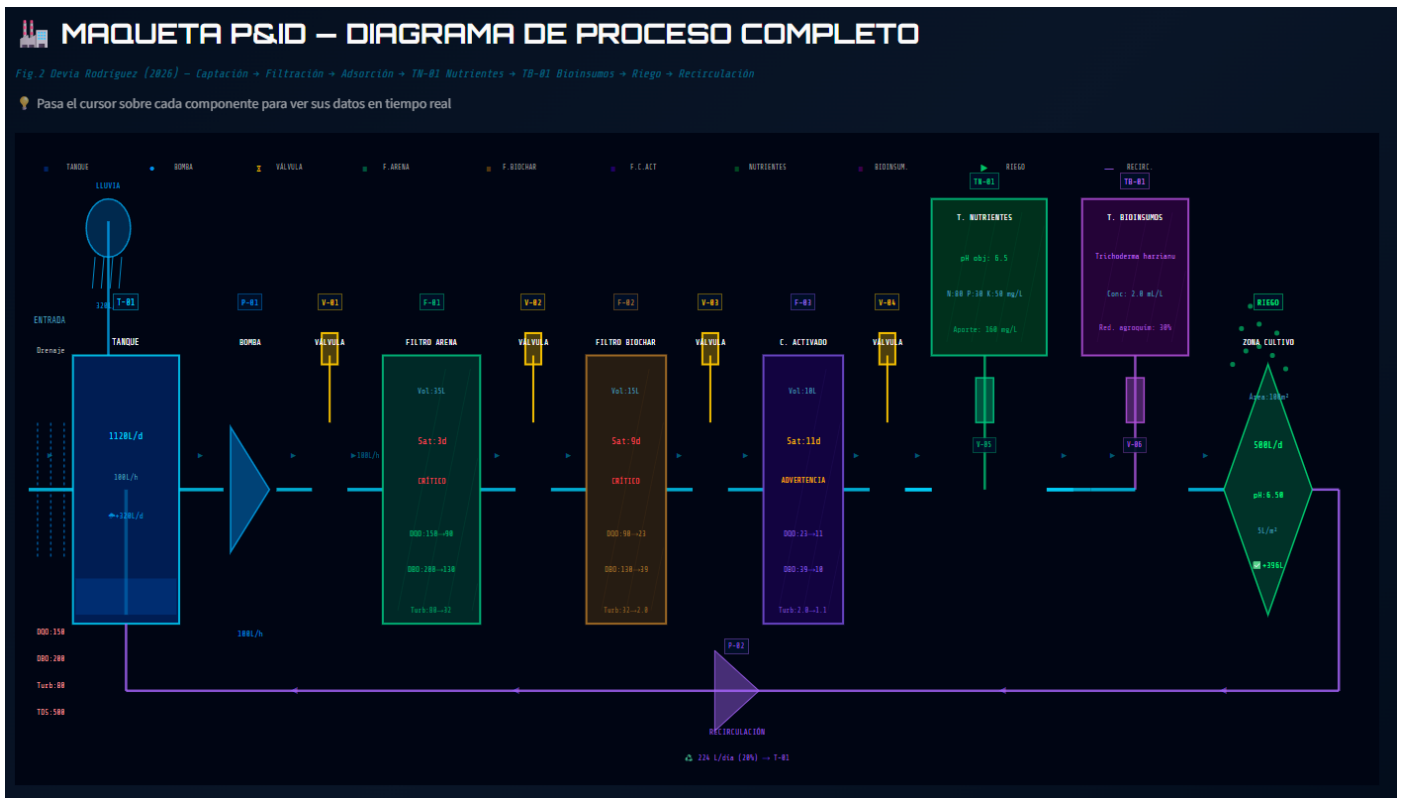
- Adsorción con biochar y carbón activado
- Estabilización fisicoquímica del agua
- Ajuste de nutrientes para uso agrícola
- Aplicación independiente de bioinsumos

Maqueta P&ID — Diagrama conceptual del sistema de tratamiento y recirculación hídrica

La **Figura 11** presenta la maqueta P&ID conceptual desarrollada para representar el funcionamiento general del sistema de tratamiento y recirculación hídrica modelado dentro del entorno de simulación computacional. El diagrama integra las diferentes etapas de captación, filtración, adsorción, dosificación de nutrientes, incorporación de bioinsumos, distribución para riego y recirculación parcial del agua tratada.

Figura 11.

Diagrama de proceso



Nota. Elaboración propia

El diagrama permitió representar de manera integrada el comportamiento conceptual del sistema hidráulico y operacional bajo diferentes escenarios simulados. La secuencia de tratamiento incorpora etapas progresivas de filtración mediante arena, biochar y carbón activado, orientadas a proyectar una disminución potencial de parámetros asociados a calidad del agua, como DQO, DBO, turbidez y TDS.

La inclusión de los módulos TN-01 y TB-01 permitió considerar, dentro del modelo conceptual, elementos relacionados con el fertirriego y el uso de bioinsumos en el sistema de recirculación hídrica. En particular, el tanque TN-01 se empleó para representar la dosificación teórica de nutrientes, mientras que el módulo TB-01 se incorporó con el fin de simular la aplicación potencial de *Trichoderma harzianum* como una alternativa para reducir parcialmente el uso de agroquímicos en los escenarios analizados.

Adicionalmente, el sistema contempló una línea de recirculación equivalente al 20 % del flujo tratado. Esta configuración permitió evaluar de forma teórica el posible aprovechamiento del agua recuperada y su contribución a la disminución del consumo de agua fresca dentro del esquema agrícola planteado.

Aunque el diagrama presenta una representación organizada del funcionamiento general del sistema, las condiciones hidráulicas, las eficiencias de remoción y los tiempos de saturación utilizados provienen de los parámetros definidos en la simulación computacional. Por esta razón, los resultados obtenidos no deben interpretarse como una validación experimental del desempeño operativo, sino como una aproximación basada en el comportamiento proyectado por el modelo.

Resultado final del aporte

El principal aporte de esta investigación radica en la formulación conceptual de un

sistema de tratamiento y recirculación hídrica construido a partir de la revisión de literatura especializada y del desarrollo de una herramienta de simulación computacional.

La propuesta reúne tecnologías de bajo costo ampliamente reportadas en estudios previos, entre ellas procesos de filtración física, adsorción mediante biochar y alternativas complementarias de control biológico con potencial de aplicación en sistemas agrícolas.

Por otra parte, el modelo implementado en Python facilitó el análisis del comportamiento esperado del sistema bajo diferentes condiciones de operación, aportando elementos para una valoración inicial de su viabilidad técnica en el contexto agrícola colombiano.

En términos generales, los resultados obtenidos constituyen una base conceptual para futuras investigaciones orientadas al uso eficiente del recurso hídrico y a la búsqueda de estrategias que contribuyan a disminuir los impactos ambientales asociados a la actividad agrícola.

Discusión

La presente investigación tuvo como objetivo desarrollar una propuesta computacional para analizar alternativas de tratamiento y reutilización de aguas de drenaje agrícola mediante la combinación de procesos de filtración, adsorción y recirculación hídrica. La revisión de literatura especializada, junto con los escenarios simulados en Python, permitió examinar el comportamiento esperado del sistema frente a diferentes variables fisicoquímicas relacionadas con la calidad del agua utilizada para riego.

Los resultados obtenidos sugieren que la integración secuencial de filtros de arena, biochar y carbón activado podría favorecer la reducción de contaminantes físicos y orgánicos presentes en aguas agrícolas. Esta tendencia coincide con lo reportado en diversos estudios que destacan la capacidad de los materiales adsorbentes y de los sistemas híbridos para mejorar la

calidad del agua. Sin embargo, las eficiencias descritas en la literatura fueron obtenidas bajo condiciones experimentales específicas, por lo que su aplicación a otros contextos agrícolas requiere procesos adicionales de validación antes de extrapolar los resultados.

A diferencia de investigaciones centradas únicamente en procesos individuales de filtración o adsorción, la propuesta planteada integra varias etapas de tratamiento dentro de un mismo esquema de recirculación hídrica. Esta integración permite analizar de manera conjunta la relación entre las variables hidráulicas, la calidad del agua y las posibilidades de reutilización en actividades agrícolas. Desde esta perspectiva, el modelo ofrece una visión más amplia del sistema de tratamiento que la obtenida mediante el estudio aislado de cada tecnología.

La simulación incluyó variables como DQO, DBO, turbidez, TDS, pH, saturación de filtros y porcentaje de recirculación, con el propósito de explorar posibles comportamientos del sistema bajo diferentes condiciones de operación. La incorporación de estos parámetros permitió identificar tendencias generales de funcionamiento y posibles variaciones en el desempeño de los procesos de tratamiento. No obstante, los resultados obtenidos corresponden a estimaciones teóricas construidas a partir de información reportada en fuentes secundarias y no deben interpretarse como evidencia experimental del desempeño real del sistema.

Los hallazgos sugieren que la combinación de diferentes etapas de tratamiento podría representar una alternativa favorable frente a sistemas basados en una única tecnología, debido a que permitiría abordar simultáneamente distintos tipos de contaminantes presentes en el agua agrícola. Aun así, la eficiencia global del sistema dependería de factores adicionales como la compatibilidad hidráulica entre las etapas, la velocidad de flujo, el tiempo de retención, el grado de saturación de los materiales adsorbentes y las características particulares del agua tratada. Estas variables no fueron evaluadas experimentalmente dentro del alcance de la presente

investigación.

Desde el punto de vista metodológico, uno de los aportes más relevantes del estudio corresponde a la incorporación de herramientas de simulación computacional para el análisis preliminar de sistemas de reúso hídrico aplicados a la agricultura. Aunque numerosos trabajos han abordado tecnologías de tratamiento de agua de forma independiente, la revisión bibliográfica realizada permitió identificar una menor presencia de modelos orientados al análisis integral de procesos de recirculación hídrica en pequeños y medianos sistemas agrícolas. En este contexto, la investigación aporta una base inicial que puede servir de apoyo para futuras evaluaciones técnicas y experimentales.

Es importante considerar que el comportamiento del modelo depende directamente de los parámetros incorporados a partir de la literatura científica consultada. Por esta razón, modificaciones en las eficiencias de remoción, las condiciones hidráulicas, la composición química del agua o las características de los materiales filtrantes podrían generar variaciones significativas en los resultados proyectados. En consecuencia, el modelo debe entenderse como una herramienta de análisis preliminar y no como una representación exacta de las condiciones que podrían presentarse durante la operación real de un sistema de tratamiento.

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentra la ausencia de validación experimental y de pruebas piloto en condiciones de campo. Factores como la variabilidad climática, la colmatación de filtros, las necesidades de mantenimiento, el crecimiento microbiológico y los cambios en la composición del agua pueden influir de manera importante en el desempeño del sistema y no fueron incorporados completamente en la simulación. De igual forma, el modelo no incluyó procedimientos avanzados de calibración matemática ni análisis de sensibilidad, aspectos que podrían fortalecer la precisión de futuras investigaciones.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, la propuesta muestra potencial para contribuir al aprovechamiento más eficiente del recurso hídrico en sistemas agrícolas con restricciones económicas y tecnológicas. El empleo de materiales de bajo costo, entre ellos biochar, arena y PEAD, podría facilitar la implementación preliminar de alternativas de tratamiento orientadas a pequeños y medianos productores. Asimismo, la incorporación de estrategias complementarias de control biológico y la reducción parcial del uso de agroquímicos podrían generar beneficios ambientales asociados a una menor contaminación de fuentes hídricas y a la conservación de la calidad del suelo.

No obstante, la implementación práctica de este tipo de sistemas requiere estudios adicionales relacionados con costos de operación, mantenimiento, disposición de materiales saturados, monitoreo continuo de la calidad del agua y cumplimiento de la normativa aplicable al reúso para riego agrícola. Por ello, futuras investigaciones deberían considerar el desarrollo de pruebas piloto, procesos de calibración hidráulica, análisis de sensibilidad del modelo y validaciones bajo condiciones reales de operación. Estos elementos permitirían fortalecer la aplicabilidad técnica y el sustento científico de la propuesta presentada.

Plan de divulgación

Para Para la divulgación de los resultados de la presente investigación se propone como estrategia principal la elaboración de un artículo científico orientado a revistas académicas relacionadas con gestión ambiental, tratamiento de agua o sostenibilidad agrícola.

Esta estrategia se considera adecuada debido a que el trabajo presenta un enfoque técnico y comparativo sustentado en revisión documental, análisis de tecnologías de tratamiento y modelado conceptual mediante simulación computacional.

El artículo será estructurado a partir del documento de investigación, priorizando los resultados más relevantes relacionados con:

- Tecnologías de filtración de bajo costo,
- Recirculación hídrica en agricultura,
- Integración de procesos de tratamiento,
- Simulación conceptual desarrollada en Python

Asimismo, se plantea la posibilidad de socializar el proyecto en espacios académicos como semilleros de investigación, encuentros institucionales y eventos relacionados con sostenibilidad ambiental e ingeniería agrícola, con el propósito de recibir retroalimentación técnica que permita fortalecer futuras etapas de desarrollo experimental.

El proceso de divulgación contempla actividades relacionadas con:

- Preparación del manuscrito,
- Adaptación a normas editoriales,
- Revisión técnica del contenido,
- Ajustes metodológicos y estructurales.

Debido al carácter documental y conceptual de la investigación, los requerimientos económicos para la divulgación son limitados, aunque se requiere tiempo para la preparación y adecuación del documento a formato publicable.

Limitaciones del estudio

Finalmente, la divulgación del proyecto busca contribuir a futuras investigaciones relacionadas con reutilización hídrica y promover el análisis de alternativas sostenibles

aplicables al contexto agrícola colombiano.

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque conceptual y de simulación computacional, por lo cual los resultados obtenidos corresponden a proyecciones teóricas derivadas de parametrizaciones establecidas a partir de literatura científica y criterios de modelado hidráulico.

En consecuencia, el estudio presenta limitaciones relacionadas con la ausencia de validación experimental en laboratorio y pruebas operativas en condiciones reales de campo. Asimismo, variables asociadas al comportamiento microbiológico, eficiencia real de remoción, degradación de materiales filtrantes y dinámica hidráulica compleja no fueron verificadas experimentalmente.

De igual manera, las eficiencias de tratamiento, tiempos de saturación y parámetros de recirculación incorporados dentro del entorno de simulación corresponden a aproximaciones conceptuales orientadas al análisis preliminar del sistema y no representan valores operacionales confirmados.

Por lo anterior, se recomienda que futuras investigaciones desarrollen procesos de validación experimental, calibración hidráulica y monitoreo fisicoquímico bajo condiciones reales de operación agrícola, con el fin de evaluar el desempeño efectivo del sistema propuesto.

Conclusiones

A Los resultados obtenidos permiten concluir que la reutilización y recirculación del agua en sistemas agrícolas constituye una alternativa con potencial para mejorar el aprovechamiento del recurso hídrico y disminuir la presión ejercida sobre las fuentes de agua empleadas en las actividades productivas del sector agrícola.

La revisión de literatura realizada durante el desarrollo de la investigación permitió identificar diversas tecnologías de tratamiento con posible aplicación en el ámbito agrícola. Entre ellas destacan los procesos de filtración física, la adsorción mediante biochar y algunos sistemas de tratamiento biológico, tecnologías que han mostrado resultados favorables en diferentes estudios reportados en la literatura científica.

De igual manera, el análisis de las investigaciones consultadas indica que la recirculación hídrica puede contribuir a reducir la demanda de agua proveniente de fuentes externas, especialmente cuando se implementan mecanismos adecuados de tratamiento y seguimiento de la calidad del agua utilizada en los procesos de riego.

Como resultado del desarrollo metodológico del estudio, se formuló un modelo conceptual de recirculación hídrica organizado por etapas, el cual contempla procesos de captación, filtración, estabilización, acondicionamiento nutricional e incorporación de bioinsumos con potencial de aplicación en sistemas de producción agrícola sostenible.

El uso de herramientas de simulación en Python permitió representar de forma teórica el comportamiento hidráulico del sistema y explorar su funcionamiento bajo diferentes condiciones operativas. Esto aportó elementos para una evaluación preliminar de la viabilidad técnica de la propuesta a partir de parámetros reportados en investigaciones previas.

No obstante, es importante señalar que la principal limitación del estudio corresponde a la ausencia de pruebas experimentales y validaciones en condiciones reales de operación. Por esta razón, los resultados deben interpretarse como una aproximación teórica sustentada en información documental y en modelado computacional, más que como una demostración empírica del desempeño del sistema.

En términos generales, la investigación aporta una base conceptual para el análisis de

estrategias de tratamiento y reutilización del agua en el sector agrícola. La combinación de tecnologías de bajo costo, esquemas de recirculación hídrica y prácticas orientadas a disminuir la dependencia de agroquímicos podría favorecer el desarrollo de sistemas productivos más sostenibles y eficientes en el manejo del recurso hídrico dentro del contexto colombiano.

Referencias bibliográficas

- Alfonso, F. L., & Toro, I. (2010). Riesgo ambiental por el uso de agroquímicos. *Inventum*, 5(8), 34–41. <https://revistas.uniminuto.edu/index.php/Inventum/article/view/19>
- Agrosavia Corporación, M. (2025). Los microorganismos como una herramienta dentro del manejo integrado de plagas. Recovered from: <https://hdl.handle.net/20.500.12324/41621>
- Barragán Caballero, M. (2020). *Fuentes hídricas contaminadas por plaguicidas en Colombia*. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12494/28588>
- Barzan, R. R., Takahashi, H. W., Fregonezi, G. A. de F., Sampaio, M. D. L. Y., Firmano, R. F., & Contreras, H. A. S. (2020). Manejo de nutrientes en solución basado en la conductividad eléctrica y concentración de iones en lixiviados de cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Acta agronomica (Palmira)*, 69(3), 196-202. <https://doi.org/10.15446/acag.v69n3.81441>
- Beltrano, J. & Gimenez, D. O. (2015). *Cultivo en hidroponía: (ed). D - Editorial de la Universidad Nacional de La Plata*. <https://elibro-net.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/es/lc/bibliotecaeaan/titulos/66458>
- Bustos Murillo et al. (2023) – *Tratamiento de aguas residuales en Colombia y sistemas bioelectroquímicos: usos y perspectivas* (Revista Tecnura). <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/19390>
- Caro, L. J. & Cortés, P. T. (2021). Estado del arte de los efectos de plaguicidas de uso agrícola

- para la salud y el ambiente en Colombia (2007-2019). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11349/26486>
- CESGIR. (2024). 'Proteger cultivos, eje para productividad del campo': Andi: María Helena Latorre, directora de la Cámara de Procultivos, aseguró que Colombia está en capacidad de atender la apuesta de los bioinsumos. *Portafolio*, <https://login.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/login?url=https://www-proquest-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/trade-journals/proteger-cultivos-eje-para-productividad-del/docview/3071009249/se-2>
- Delgado-Rebolledo, D. V., Chica, E., & Rubio-Clemente, A. (2024). Biochar as an alternative material for water treatment. *Processes*, 12(10), 2283. <https://www.mdpi.com/2227-9717/12/10/2283>
- Escobar Rivera, J. C., Gutierrez Marín, J. P., Gutiérrez, H. M., Delgado Cabrera, L. G., Ospina Rodríguez, J., Ramírez Medina, L. M., Torres Lozada, P., Pérez Vidal, A., Vidal Guerrero, A. J., & Porras Castro, C. F. (2025). Influencia del Tipo de Alcalinizante Sobre el Proceso de Estabilización Química del Agua Tratada en Plantas de Tratamiento Convencional. *Revista EIA*, 22(43). <https://doi.org/10.24050/reia.v22i43.1767>
- García-Ávila, F., et al. (2023). Integration of high-rate filtration using waste-derived biochar for water treatment. *Environmental Processes*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s42773-023-00256-4>
- Gavilánez, F. C. & Gómez, M. J. (2022). Definición de dosis de nitrógeno, fósforo y potasio para una máxima producción del maíz híbrido Advanta 9313 mediante el diseño central compuesto. Agrosavia <http://hdl.handle.net/20.500.12324/37467>
- Guerrero Pacheco, J., et al. (2021). Calidad del agua para riego en Colombia. *Revista AAS*, 12(2).

<https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/article/view/2573>

IDEAM. (2018). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <https://ideam.gov.co/nuestra-entidad/hidrologia/estudio-nacional-del-agua-2018>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2017). *Código Colombiano de Fontanería* (NTC 1500)

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020). *Tuberías de policloruro de vinilo (PVC) para conducción de agua potable* (NTC 382).

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2022). *Estudio nacional del agua 2022*. IDEAM. <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/informes/publicacion-jue-23032023-1200>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2024). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua*. https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/boletines/2024-08-23/lineamientos_conceptuales_y_metodologicos_para_la_evaluacion_regional_del_agua.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (s. f.). *Boletín de calidad del agua en Colombia*. <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/boletines/Bolet%C3%ADn-de-calidad-del-agua>

Jaime Ariza, S. (2022). Modelo teórico de innovación tecnológica y recirculación en el tratamiento de aguas residuales industriales en Colombia. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10882/12318>

Jaramillo, M. F., Cardona, D. A., & Galvis, A. (2020). Reutilización de aguas residuales en

- agricultura en Colombia. *Ingeniería y Competitividad*, 22(2).
https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/9412
- Kaetzl, K., Lübken, M., & Wichern, M. (2020). Application of biochar in constructed wetlands for wastewater treatment. *Scientific Reports*, 10. <https://www.nature.com/articles/s41598-020-57981-0>
- Langergraber, G., et al. (2018). Biochar as filter material in constructed wetlands. *Water*, 10(12), 1835. <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/12/1835>
- López Guerrero, A. F., & Sánchez Ortiz, I. A. (2015). Postratamiento de lixiviados mediante filtración con arena, antracita y carbón activado. *Revista de Ingeniería*. <https://revistas.uniandes.edu.co/index.php/rdi/article/view/7396>
- Maria Serrano, M.F., López, J.E. & Saldarriaga, J.F. Use of activated rice husk biochar for the removal of metals and microorganisms from treated leachates from landfills. *J Mater Cycles Waste Manag* 25, 3414–3424 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01762-0>
- Maya Álvarez, M. (2014). *Operaciones culturales, riego y fertilización*. AGAH0108: (1 ed.). IC Editorial. https://elibro-net.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/es/lc/bibliotecaean/titulos/221358_
- Mesa Vanegas, A, Marín Pavas, D y Calle Osorno, J. (2019). Metabolitos secundarios en *Trichoderma* spp. y sus aplicaciones biotecnológicas agrícolas. Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Instituto de Biología. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10495/19775>
- Metroflor. (s.f.). *Aspectos generales para la selección y evaluación analítica de fertilizantes*.

- Revista Metroflor. <https://www.metroflorcolombia.com/aspectos-generales-para-la-seleccion-y-evaluacion-analitica-de-fertilizantes/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s. f.). *Gestión integral del recurso hídrico en Colombia*. <https://www.minambiente.gov.co/>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (s.f.). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS: Reglamento técnico de tuberías y sus accesorios*. <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico-reglamento-tecnico-sector-reglamento-tecnico-de-tuberias-y-sus-accesorios>
- Monje Carvajal, J. J., Aguirre Buenaventura, E. A., González Sánchez, O., & Vega Castro, D. A. (2019). Sistema de monitoreo y control de un modelo hidropónico del tipo Nutrient Film Technic NFT, para la producción de hortalizas en ambientes controlados. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 6(1), 41–51. <https://doi.org/10.23850/24220582.1830>
- Muñoz Villareal, L. L. (2024). Contaminación de fuentes hídricas por agroquímicos en Colombia. *Revista SENA*. <https://revistas.sena.edu.co/index.php/RUCD/article/view/6420>
- Organización de las Naciones Unidas. (s. f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- Pinto Carvajal, L. P. (2017). *Tratamiento de aguas contaminadas por plaguicidas en Colombia*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/21639>
- Ramírez López, R. P., et al. (2024) Life Cycle Assessment of biochar for wastewater filtration <https://www.mdpi.com/2313-4321/9/6/125>.

- Reyes-Medina, A. J., Fraile-Robayo, D., & Álvarez-Herrera, J. G. (2019). Evaluación de la mezcla de sustratos en un cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) var. Verónica. *Temas Agrarios* (Montería, Córdoba, Colombia), 24(1), 34–41. <https://doi.org/10.21897/rta.v24i1.1776>
- Roldán Pérez, G. (2021). *Calidad del agua en Colombia*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/4975>
- Romero Ladino, Y. T., Rojas Ordóñez, L. F., & Rodríguez Miranda, J. P. (2017). Evaluación de un filtro percolador sin recirculación para tratamiento de aguas residuales. *I+D Revista de Investigaciones*, 9(1), 38–48. <https://sievi.udi.edu.co/ojs/index.php/ID/article/view/114>
- Salazar Gómez, W y Ariza García, C. (2025). Diseño de un sistema de tratamiento y reutilización de agua coproducida en campos petroleros para el riego de vías rurales y cultivos agrícolas, bajo un enfoque de sostenibilidad, economía circular y transformación digital. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10882/15422>
- Sarria Villa, R. (2017). Desarrollo de una herramienta para la gestión de la calidad del agua del río Cauca en su paso por el Departamento del Valle basado en sistemas inteligentes. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/entities/publication/b07f9ac5-4974-46ef-a6b4-9d76ba9aca53>
- Serje Martínez, L. (2021). *Fuentes hídricas para irrigación en Colombia*. Universidad de los Andes. <https://hdl.handle.net/1992/55635>
- Stocco, M., Rolleri, J., Moya, P., Peñalba, J. & Mónaco, C. (2024). Preliminary findings on biocontrol of bacterial wilt and canker of tomato (*Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*) using *Trichoderma harzianum* after biofumigation. *Agronomía*

Colombiana, 42(2), e114659. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v42n2.114659>

Vásquez F., S., Cruz Guayacundo, W. ., y Peñarete Moreno, D. . (2023). Sistema de fertirriego inteligente, para optimizar la producción de vegetales cultivados en invernaderos. *Revista Ontare*, 11(1). <https://doi.org/10.21158/23823399.v11.n1.2023.3695>

Villán Pacheco, V., Ardila Aragón, D. P., Rey Romero, D. C., & Oviedo Ocaña, É. R. (2023). Vulnerabilidad a la contaminación difusa del agua superficial por nitrógeno de origen agrícola en el páramo de Berlín, Santander (Colombia). *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*. <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/3115>

Anexos

Anexo A. Código del modelo de simulación computacional

Debido a la extensión del código fuente utilizado en la simulación, este se adjunta como documento complementario al artículo.