

Evaluación técnica de riego en caña de azúcar: Impactos hídricos y ambientales en Ingenio San Carlos

Technical evaluation of sugarcane irrigation: Water and environmental impacts at Ingenio San Carlos

Yara Samantha Loor Avila, Jaime Tinto Arandes, Daniel Andrade Pesantez

Resumen

La intensificación agrícola en los sistemas de riego del cultivo de caña de azúcar plantea desafíos importantes para la sostenibilidad del recurso hídrico y la preservación de los ecosistemas asociados. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño técnico del riego y sus repercusiones hidroambientales en la Sociedad Agrícola e Industrial San Carlos, empresa fundada en 1897 dedicada al cultivo, elaboración y distribución de azúcar y subproductos agrícolas, comprometiéndose con prácticas de producción sostenible, uso eficiente del agua, cogeneración eléctrica con bagazo y gestión ambiental certificada. La investigación se desarrolló mediante un enfoque mixto, sustentado en una revisión sistemática de literatura bajo la metodología PRISMA, que abarcó fuentes científicas indexadas en Scopus, Web of Science, Taylor & Francis y Emerald, junto con las normativas internacionales ISO 14046 e ISO 24120 y los lineamientos de la FAO. Se aplicó una encuesta estructurada a técnicos agrícolas para correlacionar la información teórica con la evidencia empírica del desempeño hidráulico y ambiental del sistema de riego. Los resultados muestran que, aunque existen tecnologías de alta eficiencia (riego por goteo con eficiencia >90 %), el Ingenio mantiene una predominancia de riego por gravedad y mangas, con eficiencia moderada y pérdidas significativas por escorrentía y percolación. Además, se identificaron efectos ambientales derivados del uso simultáneo de agroquímicos bajo condiciones de sobre-riego. Se concluye que la optimización del riego exige mayor tecnificación, monitoreo permanente y capacitación continua, elementos clave para avanzar hacia un modelo agrícola eficiente, resiliente y alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 6 y 12).

Palabras clave: Caña de azúcar; Impacto ambiental; Calidad del agua; Recursos hídricos; Contaminación del agua.

Yara Samantha Loor Avila

Universidad Católica de Cuenca | Cuenca | Ecuador | yara.loor.72@est.ucacue.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0003-4997-3620>

Jaime Tinto Arandes

Universidad Católica de Cuenca | Cuenca | Ecuador | jtinto@ucacue.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-8507-6837>

Daniel Andrade Pesantez

Universidad Católica de Cuenca | Cuenca | Ecuador | dandradep@ucacue.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-0586-4038>

<https://doi.org/10.46652/runas.v7i15.333>

ISSN 2737-6230

Vol. 7 No. 15 julio-diciembre 2026, e260333

Quito, Ecuador

Enviado: octubre 31, 2025

Aceptado: diciembre 29, 2025

Publicado: enero 28, 2026

Continuous Publication



Abstract

Agricultural intensification in sugar cane irrigation systems poses significant challenges to the sustainability of water resources and the preservation of associated ecosystems. This study aimed to evaluate the technical performance of irrigation and its hydro-environmental impact in the San Carlos Agricultural and Industrial Society, a company founded in 1897 dedicated to the cultivation, processing and distribution of sugar and agricultural by-products. Committed to sustainable production practices, efficient use of water, bagasse power cogeneration and certified environmental management. The research was developed through a mixed approach, based on a systematic literature review under the PRISMA methodology, which covered scientific sources indexed in Scopus, Web of Science, Taylor & Francis and Emerald, together with the international standards ISO 14046 and ISO 24120 and the FAO guidelines. A structured survey of agricultural technicians was applied to correlate theoretical information with empirical evidence of the hydraulic and environmental performance of the irrigation system. The results show that, although there are high-efficiency technologies (drip irrigation with >90% efficiency), Ingenio maintains a predominance of gravity irrigation and mangers, with moderate efficiency and significant losses by runoff and percolation. In addition, environmental effects were identified from the simultaneous use of agrochemicals under over-irrigation conditions. It is concluded that the optimization of irrigation requires greater technification, permanent monitoring and continuous training, key elements to move towards an efficient agricultural model, resilient and aligned with the Sustainable Development Goals (SDG 6 and 12).

Keywords: Sugar cane; Environmental impact; Water quality; Water resources; Water pollution.

Introducción

La sostenibilidad ambiental y la seguridad hídrica se han posicionado como prioridades estratégicas para la agricultura contemporánea, especialmente en un contexto de cambio climático, crecimiento poblacional y presión sobre los recursos naturales. A nivel mundial, se estima que el sector agrícola consume alrededor del 70 % del agua dulce disponible, siendo los cultivos extensivos como la caña de azúcar grandes demandantes del recurso por sus altos requerimientos hídricos y su prolongado ciclo de cultivo (The State of Food and Agriculture 2023, 2023).

En América Latina, la expansión de la caña de azúcar ha estado vinculada a su valor económico, su aporte a la producción de bioetanol y su integración en cadenas agroindustriales intensivas. No obstante, este crecimiento ha generado consecuencias ambientales importantes, tales como la sobreexplotación de acuíferos, la contaminación de cuerpos de agua con agroquímicos y la alteración de la biodiversidad. En Ecuador, pese a los esfuerzos institucionales por modernizar el riego agrícola, muchas zonas aún operan con sistemas tradicionales que limitan la eficiencia del uso del agua y agravan el impacto ecológico (MAATE, 2021).

Gordillo (2022), indica que existen seis principales ingenios productores de azúcar, tres de los principales son: Sociedad Agrícola e Industrial San Carlos S.A, Compañía Azucarera Valdez y Agroazúcar Ecuador (La Troncal), quienes conforman el 80% de la producción nacional de azúcar en el Ecuador.

En este contexto, el Ingenio San Carlos constituye un caso de interés por su relevancia en la producción nacional de caña de azúcar, produciendo aproximadamente el 33% de azúcar consumida en el mercado ecuatoriano, además, cumple con cuotas de exportación a países como Estados Unidos y Perú (Ingenio San Carlos, 2023). Si bien se han realizado estudios técnicos pre-

liminarias, se identifica la necesidad de fortalecer la evaluación del riego mediante indicadores específicos como la eficiencia de aplicación (Koech & Langat, 2018), la huella hídrica (Preecha Kapetch, 2021) o la calidad del agua post-riego (Azghadi et al., 2024). Esta ausencia de medición precisa impide valorar si el riego satisface efectivamente las necesidades hídricas del cultivo o si está generando pérdidas y deterioro ambiental.

Este estudio parte de la necesidad de vincular el desempeño técnico del riego aplicado en el cultivo de caña de azúcar con sus repercusiones hidroambientales. La investigación se guía por la pregunta: ¿Cómo influye el desempeño técnico de los sistemas de riego en las repercusiones ambientales e hídricas del Ingenio San Carlos?

La respuesta a esta interrogante permitirá identificar áreas críticas de mejora y proponer estrategias de gestión hídrica más eficientes, resilientes y compatibles con un desarrollo agroindustrial sostenible. En la actualidad, la gestión del recurso hídrico en los sistemas implementados puede provocar fugas y deterioro ambiental al causar aumentos en la salinidad y contaminación por nutrientes acumulados en la caña de azúcar (Sadhana et al., 2024).

Desde un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo), de tipo descriptivo-explicativo, la investigación adopta un diseño observacional longitudinal, que permite analizar los factores técnicos y ambientales vinculados a la eficiencia del riego a lo largo del tiempo. Este enfoque posibilita la recolección secuencial de datos en distintos períodos de observación, integrando mediciones de campo, análisis físico-químicos y la aplicación periódica de encuestas estructuradas al personal agrícola. El propósito es caracterizar los sistemas de riego empleados en el Ingenio San Carlos, específicamente el riego tradicional o por gravedad y el riego mediante mangas de polietileno, identificando sus niveles de eficiencia, requerimientos operativos e implicaciones hidroambientales (Pereira et al., 2025).

Se aplican indicadores de eficiencia hídrica y se evalúan las repercusiones ambientales asociadas mediante un estudio longitudinal, como en el caso de Egipto que, durante tres años, comparó el sistema de riego por gravedad con el riego por goteo para evaluar cambios en el uso del agua y rendimiento del cultivo de caña (Ashour et al., 2025). A través de técnicas e instrumentos como la observación directa sistemática en áreas de riego, mediciones históricas de campo (caudal, humedad y volumen de agua utilizada) y de análisis de laboratorio para determinar la calidad del agua (fósforo, pesticidas, etc), se realizarán encuestas semiestructuradas a 16 técnicos agrícolas involucrados directamente con esta labor de campo.

Este enfoque integral busca generar evidencia útil para la toma de decisiones informadas, reducir los impactos negativos sobre el entorno ecológico y promover una cultura de riego sustentada en criterios técnicos, ambientales y sociales.

Fundamentación teórica

Fundamentos técnicos del riego agrícola y eficiencia de aplicación.

En el Ecuador, el sector cañero es emblemático por su aporte a la economía nacional y su impacto social.

Su cadena de suministro abarca desde la preparación de la tierra hasta la producción y exportación de diversos productos, lo que tiene un impacto significativo en el PIB nacional y proporciona empleo a miles de personas en las regiones rurales. (International Labour Organization et al., 2025)

Para cultivar la caña de azúcar, se necesita emplear grandes volúmenes de agua, por lo que, Sojos & Caicedo (2024), expresan que la necesidad de altos grados de humedad es un factor que se vincula a la vida del cultivo, la necesidad de agua varía dependiendo su ciclo y temporadas climáticas, y que la restricción del recurso hídrico reduce la producción, lo que resalta la teoría de la importancia del riego regular para ayudar a satisfacer la alta demanda de agua en la caña de azúcar.

En la actualidad, una de las mayores inquietudes en el cambio climático es la eficacia en la utilización del agua en la agricultura, frente a la escasez y demandas de sostenibilidad en la producción. En este contexto, el cultivo de caña de azúcar demanda gran cantidad de agua y es de importancia económica para el sector agroindustrial de Latinoamérica, necesita estrategias de gestión que incorporen aspectos técnicos, ambientales y financieros (Sojos Castro & Caicedo Camposano, 2024).

Estas estrategias se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), directamente con el ODS 6 “Agua limpia y saneamiento” y el ODS 12 “Producción y consumo responsables”, que promueven la gestión eficiente y sostenible del agua en los sistemas productivos. Estas estrategias no solo mejoran el desempeño hídrico del sistema de riego, sino que, fortalecen la sostenibilidad ambiental y económica de la agroindustria azucarera, alineando sus operaciones con las metas globales establecidas por la Agenda 2030 (Naciones Unidas, 2023).

Bajo este contexto, la escasez de agua es un desafío global, en particular para la agricultura que consume entre el 85 % y el 90 % de los recursos hídricos. Casi el 70% de esta se utiliza para riego, lo cual es esencial para mantener y maximizar la producción agrícola (Namdarian et al., 2024, p. 1). Existen distintos tipos de sistemas o métodos de riego aplicables en el campo, se clasifican de manera general como sistemas de gravedad o superficie, de aspersión y de goteo (Koech & Langat, 2018). Si bien se conoce, el agua destinada para riego en los cultivos proviene de ríos y se transportan hacia el cultivo mediante canales abiertos o tuberías. A continuación, se describen estos sistemas:

En sistemas de riego superficiales (inundación en los surcos), el agua se transporta sobre el lote por la fuerza de la gravedad. Ashour et al. (2025), plantea que en el riego tradicional existe distribución ineficiente del recurso hídrico, lo que causa saturación en algunas zonas mientras que en otras puede ocasionar sequía, lo que afecta directamente al rendimiento del cultivo y causa

erosión del suelo. En los sistemas de aspersión (torres fijas, pivotes centrales y riegos móviles), el agua se aplica a través de aspersores colgantes.

En el sistema de goteo, el agua es aplicada en pequeñas cantidades a través de boquillas instaladas en tuberías o cintas, estas pueden implementarse sobre la hilera o bajo tierra y tienen una eficiencia del 70% al 90%. Esta modalidad a más de conservar el agua cuida el suelo disminuyendo las pérdidas por escorrentía y aumenta la calidad en el cultivo, también minimiza la aparición de enfermedades en el sembrío y reduce costos operacionales (Surendran et al., 2016). Estos dos sistemas también se conocen como sistemas presurizados, ya que funcionan a baja presión, lo que a menudo implica algún tipo de bombeo.

Eficiencia de aplicación del agua

Según Banco Mundial (2021) “La agricultura de regadío representa el 20 % del total de la superficie cultivada y aporta el 40 % de la producción total de alimentos en todo el mundo” (p. 1). Esta cultura se centra en el uso de agua controlado del agua en los cultivos mediante técnicas de riego (sistemas de riego). Un tema de importancia es la adecuada utilización del agua para garantizar la seguridad de las generaciones actuales y venideras. Por lo tanto, encontrar una forma sostenible de gestionar este recurso, centrándose en su protección es esencial en estos tiempos.

Conforme a lo expresado por Villacis (2020), “Para la plantación de caña de azúcar el requerimiento hídrico es de 0,0005 m³ de agua por segundo o 1,8 m³ de agua por hora” (p. 13).

Estudios indican que la evapotranspiración diaria de la caña oscila entre 1,6 y 9,0 mm/día dependiendo del clima, etapa fenológica y manejo del agua (Yadeta et al., 2021). Estos datos muestran variaciones importantes, especialmente en áreas subtropicales con períodos secos prolongados. Para alcanzar el mayor rendimiento en la caña de azúcar, se requiere la aplicación de grandes cantidades de agua. Cardozo et al. (2018), plantean que con una aplicación de recurso hídrico anual de 1400 a más de 2000 mm puede generar incertidumbre ambiental por la escasez de agua. Por ende, se debe gestionar la mejora de eficiencia en prácticas agrícolas utilizadas en el cultivo.

Para Ashour et al. (2025), se toman en cuenta estas consideraciones técnicas. La mayor tasa de agotamiento (50-60%) del riego por gravedad refleja las pérdidas y distribución irregular del agua, la percolación profunda y la evaporación superficial. Por otro lado, la menor tasa de agotamiento (20-30%) del riego por goteo indica la eficiencia en aplicación directa a la raíz, que minimiza estas pérdidas. Se utiliza el Nivel de Humedad en el Suelo (LMS) y no el punto de marchitez, ya que las mediciones del LMS proporcionan datos en tiempo real que representan la mejor disponibilidad del agua para el cultivo.

Tecnologías de medición

Se puede medir las necesidades del cultivo a través de observación en el campo. Desde los 80's, la teledetección vía satélite se convirtió en una fuente de datos importante para la detección, el mapeo y monitoreo de crecimiento de los cultivos y también, para medir la productividad de la caña de azúcar en el campo (Carriço et al., 2025).

En los últimos años, el desarrollo de sensores en el campo ha tenido progreso significativo en cuanto al aprendizaje automático, así también como el desarrollo innovador de la infraestructura de la Tecnología de la Información (TI) necesaria. Una gran variedad de sensores con diversas propiedades espectrales, espaciales y temporales están demostrando ser eficaces para aplicaciones relacionadas con la caña de azúcar, por ejemplo, mapeo en tiempo casi real, monitoreo del crecimiento, ultraresolución para predicción de rendimiento y gestión de desastres (Som-ard et al., 2021).

Normativas estándares en el uso sostenible (FAO)

La FAO (2022), nos indica que, para tener una buena producción, se necesita asegurar patrones de consumo y producción sostenible a través de cadenas de suministro alimentario y agrícolas eficientes. De esta manera, se promueve sistemas agroalimentarios resilientes y sostenibles en entornos cambiantes. Esto significa que una mayor sostenibilidad de la agricultura conlleva al incremento de la productividad y seguridad alimentaria y la eficiencia en el uso de agua en los cultivos.

Según la Comisión Europea (2025), “Los suelos agrícolas de la UE contienen el equivalente a 51.000 millones de toneladas de CO₂, lo que supone una cantidad significativamente superior a los gases de efecto invernadero emitidos anualmente por los países de la UE” (p. 49). El objetivo es inducir al desarrollo sostenible y al uso correcto recursos naturales como el agua, el suelo y el aire, incluso reduciendo la implementación de químicos a los mismos.

La última versión de Bonsucro Production Standard, entró en vigor en el 2023, esta ley establece criterios para la implementación del agua en cultivos de caña de azúcar. Monitoreando de esta manera la sostenibilidad y el cumplimiento del Estándar de Producción Bonsucro, este exige un análisis por medio de la productividad hídrica, la huella hídrica y planes de vulnerabilidad a los cambios climáticos (Bonsucro, 2023).

Las empresas que utilizan este tipo de certificaciones reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, disminuyen el uso del agua, utilizan menos fertilizantes, conservan la tierra y la biodiversidad, pagan salarios más altos y crean condiciones de trabajo más seguras(Jamis, 2024). Mediante la colaboración de Bonsucro, en Indicador de Productividad “Crop per drop”desarrolla la productividad hídrica regionalmente sensible, teniendo en cuenta el rendimiento histórico versus el rendimiento real del cultivo (Brauman & Viart, 2015).

Impacto ambiental del riego en agroecosistemas sensibles

En un cultivo, es importante la aplicación de pesticidas y fertilizantes, Huang et al. (2021), indican que la aplicación de: fertilizantes, pesticidas, enmiendas de suelo y agua, y estiércol animal influyen directamente en la calidad del agua. En la agricultura, los cultivos dependen de la aplicación de químicos para mantenerse productivos. Las consecuencias de su aplicación son, la contaminación ambiental por pesticidas y vinaza, en este caso, se evaluó a través de bioensayos la contaminación en el agua por aplicación de 2.4-D Amina, que inhibió el crecimiento desde la raíz y brotes de malezas, demostrando así su toxicidad en aguas agrícolas (Ogura et al., 2022).

Los fertilizantes nitrogenados compuestos de amonio o amoníaco anhidro son solubles y móviles en el suelo, y los nitratos entran fácilmente en el drenaje mediante procesos de lixiviación. Por el contrario, los fertilizantes fosfatados son menos móviles en el suelo debido a su baja solubilidad, y los fosfatos se adsorben en sitios positivos de la materia orgánica del suelo y los minerales arcillosos. Los herbicidas como metribuzina, atrazina y diurón suelen ser transportados por escorrentía. En Australia se demostró que sistemas de mínimo laboreo reducen hasta un 62 % la pérdida de atrazina por escorrentía en comparación a otros sistemas convencionales, mientras que la pérdida de metribuzina variaba más de diez veces entre sistemas (Karim et al., 2023).

Por otro lado, en Brasil, fue evaluada la WF gris que ocasiona la escorrentía de nitrato y herbicidas por medio de la observación en campo, a través del nivel 1, se duplicó las fracciones de lixiviación de nitrato en azúcar, mientras que las prácticas combinadas (fraccionamiento e incorporación de N) reducen la carga ambiental y tener el mismo rendimiento en la caña (Scarpone et al., 2023).

Por lo contrario, la mala aplicación de láminas de agua en el riego y fertilizantes en el cultivo influyen en la incidencia de plagas. Bhatt et al. (2022), indican que la productividad y calidad de la tierra se afectan por la fertilización desequilibrada como por condiciones de estrés hídrico del cultivo, lo que influye directamente en la aparición de insectos plaga, incluyendo proliferación en zonas de escaso potasio.

Existen enfermedades vinculadas a condiciones de humedad, las malas prácticas de riego evidencian la aparición de enfermedades fúngicas y ventilación insuficiente en el cultivo, también, estas condiciones de humedad favorecen a la aparición de mosquitos en canales de riego, incrementando de esta manera riesgos sanitarios como malaria en zonas agrícolas (Demissew et al., 2020).

Metodología

Se definió un estudio descriptivo-explicativo con enfoque mixto. El componente cuantitativo nos permitirá comprender el contexto operativo como, medición de la eficiencia de aplicación del agua en el riego, el volumen aplicado (m^3/ton) y factores adyacentes al manejo hídrico como, la calidad físico-química del agua (Ferreira Dos Santos et al., 2022), mientras que el componente

cualitativo captará percepciones ecológicas mediante observación sistemática de literatura mediante el sistema PRISMA (Rethlefsen et al., 2021). El propósito de este sistema es identificar estudios sobre la eficiencia de riego, huella hídrica y repercusiones hidroambientales en el cultivo de caña de azúcar. Para esto, se utilizaron ecuaciones de búsquedas en bases de datos como: Scopus, Web of science, Taylor & Francis empleando los siguientes criterios como, por ejemplo: “sugarcane” AND “irrigation efficiency” AND “water footprint”. Los filtros aplicados fueron, rango de años desde el 2018-2025, documentos científicos con revisión por pares e idioma inglés o español.

También se realizó la observación del entorno y encuestas al personal agrícola, el sujeto son los 16 profesionales técnicos agrícolas responsables directos del riego. Para esta investigación, se adoptó un diseño longitudinal para recopilar datos en múltiples momentos del ciclo del cultivo, lo que permite evaluar variaciones temporales en eficiencia y efectos ambientales (Chukalla et al., 2022).

El objeto de análisis fueron dos sistemas de riego actualmente en uso en el Ingenio San Carlos: el riego tradicional o por gravedad y el riego a través de mangas de polietileno. Estos sistemas se seleccionaron porque representan la mayor proporción de superficie bajo riego del ingenio azucarero y porque son clave para evaluar la eficiencia hídrica en condiciones reales de operación. La elección de dos técnicas distintas permitió comparar desempeño técnico y repercusiones hidroambientales en un mismo contexto operativo (Chukalla et al., 2022).

Se aplicaron métodos cuantitativos para medir la eficiencia hídrica ($m^3/tonelada$), caudal y calidad del agua mediante análisis de laboratorio (pH, nitratos, fósforo) y métodos cualitativos para captar percepciones y observaciones ecológicas del entorno afectado. Las técnicas incluyeron observación directa sistemática, mediciones de campo con medidores de caudal y sensores de humedad, entrevistas y encuestas semiestructuradas. Dado el tamaño reducido y la accesibilidad del universo, se optó por un censo completo ($n=N=16$), sin necesidad de fórmulas de muestreo, maximizando así la cobertura y la validez interna del análisis, se toma en cuenta la población total del estudio.

El instrumento de medición consistió en una encuesta estructurada, dividida en secciones correspondientes a las variables independiente (desempeño técnico del riego) y dependiente (repercusiones hidroambientales). Su diseño fue validado por profesionales en gestión agrícola (director de campo y jefe de Ingeniería Agrícola) e investigación aplicada, y posteriormente se realizó un pilotaje con 10 técnicos del Ingenio San Carlos, con el fin de comprobar la claridad de los ítems y la confiabilidad del instrumento. El análisis de consistencia interna arrojó un coeficiente alfa de Cronbach de 0.751, lo que demuestra una fiabilidad aceptable y confirma que los ítems miden de manera coherente el constructo de eficiencia técnica percibida en la gestión del riego agrícola.

Tratamiento estadístico de la información

En la parte de la aplicación del estudio, para recopilar los datos, se utilizó Google Forms en la elaboración de formularios para la aplicación de la encuesta, la cual fue distribuida a cada

uno de los 16 participantes tomados en cuenta para esta investigación, cabe recalcar que nuestra población total consta de 16 profesionales, por lo que se toma en cuenta un censo completo para validación de este estudio. Luego de obtener las respuestas, la información se organizó en un documento de Microsoft Excel para facilitarnos el análisis en el software JASP, que se utilizó para el procesamiento de los datos y la tabulación, se esta manera se pudo obtener correlaciones entre las variables que ayudaron a la validación del estudio.

Resultados

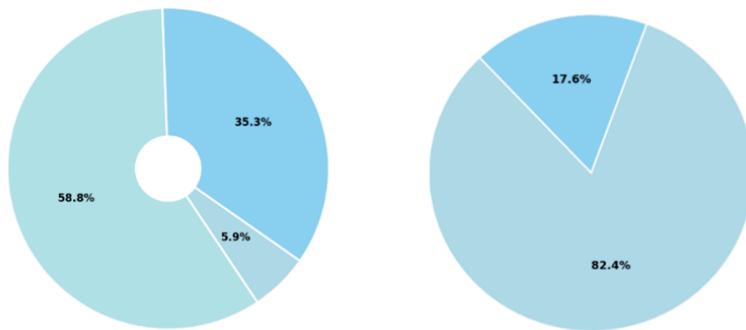
Los hallazgos de la investigación se sustentan tanto en el análisis empírico obtenido mediante la encuesta aplicada al personal técnico del Ingenio San Carlos, como en la revisión sistemática de literatura desarrollada bajo el método PRISMA. Este enfoque integrador permitió contrastar los resultados de campo con la evidencia científica recopilada entre los años 2018 y 2025, proveniente de bases de datos indexadas como Scopus, Web of science, Taylor & Francis. La síntesis documental incluyó veinticuatro artículos que abordaron temas relacionados con la eficiencia de riego, la huella hídrica y las implicaciones ambientales de los sistemas de riego agrícola.

A partir del análisis comparativo de estos estudios, se definieron las variables centrales que orientaron la presente investigación: la eficiencia técnica del riego como variable independiente y las repercusiones hidroambientales como variable dependiente. Dichas variables fueron seleccionadas por su recurrencia y relevancia en la literatura revisada, lo que permitió estructurar un modelo analítico coherente con los estándares científicos y las experiencias documentadas a nivel internacional. Tal integración fortaleció el análisis de los sistemas tradicionales y por mangas empleados en el Ingenio San Carlos, enmarcando su evaluación dentro de un contexto comparativo internacional de sostenibilidad y gestión eficiente del recurso hídrico (Chukalla et al., 2022; Pereira et al., 2025; Rethlefsen et al., 2021).

El procesamiento de los datos se realizó mediante el software estadístico JASP, utilizando pruebas descriptivas, de asociación, correlación, comparación de grupos y consistencia interna, según la naturaleza de las variables y los objetivos específicos de la investigación. Posteriormente, se analizan las relaciones entre variables técnicas y ambientales a través de las pruebas de Chi-cuadrado y correlación de Spearman, seguidas de las comparaciones entre grupos mediante Mann-Whitney, con el fin de determinar diferencias en las percepciones según el tipo de riego y el cargo.

Se realizó una caracterización del personal vinculado al área agrícola del Ingenio San Carlos, los resultados muestran que el cargo de supervisor agrícola predomina ampliamente en la muestra, lo que refleja un perfil operativo enfocado en el control directo de las labores de campo y la gestión del riego. El 35,3 % de jefes de sector representa un nivel intermedio de coordinación y planificación productiva, mientras que el 5,9 % restante corresponde a personal de apoyo técnico o administrativo.

Figura 1. Cargo actual en el Ingenio San Carlos

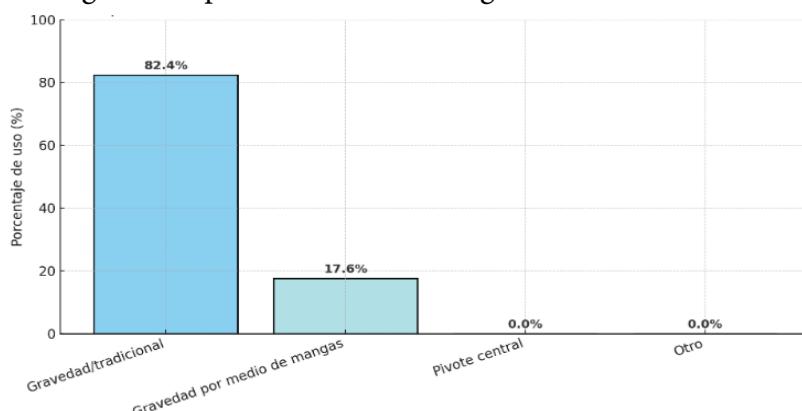


Fuente: elaboración propia

Nota. La figura 1, presenta la distribución porcentual de los cargos desempeñados por los participantes de la encuesta aplicada y la distribución porcentual de las fuentes de agua empleadas para el riego agrícola en el Ingenio San Carlos.

Esta distribución jerárquica evidencia que la eficiencia del riego y la adopción de prácticas sostenibles dependen de la interacción entre los niveles operativos y de supervisión, lo cual influye directamente en la implementación de estrategias de uso responsable del recurso hídrico. Los resultados reflejan una preferencia predominante por el uso de fuentes mixtas de agua como estrategia para garantizar la continuidad del riego durante los períodos secos y contrarrestar la estacionalidad climática. Esta combinación contribuye a optimizar la disponibilidad del recurso, aunque exige mayor control de calidad y eleva los costos operativos. En contraste, el 17,6 % que utiliza únicamente agua superficial evidencia una dependencia de los cauces naturales, mientras que el uso exclusivo de agua subterránea responde a zonas con limitada disponibilidad superficial.

Figura 2. Tipos de Sistema de Riego actualmente en uso



Fuente: elaboración propia

Nota. La Figura 2 muestra la distribución porcentual de los tipos de sistemas de riego utilizados por los 16 participantes de la investigación.

El predominio del riego por gravedad en el Ingenio San Carlos refleja una baja tecnificación del sistema, evidenciada por la escasa adopción de métodos mecanizados como el pivote central.

Aunque el riego por mangas (17,6 %) representa un avance hacia una gestión más controlada del caudal, su eficiencia sigue siendo limitada frente a tecnologías presurizadas. Esta situación subraya la necesidad de fortalecer la transferencia tecnológica y la capacitación en riego eficiente, así como de optimizar la gestión y diversificación de las fuentes hídricas, elementos clave para garantizar la sostenibilidad y resiliencia del sistema agrícola frente a la variabilidad climática.

Asociación entre variable: Chi cuadrado

El análisis que se presenta tiene como finalidad determinar si existe una relación estadísticamente significativa entre el tipo de sistema de riego empleado por los técnicos agrícolas del Ingenio San Carlos y la práctica de monitoreo de la calidad del agua utilizada para riego. Estas variables permiten comprender si la elección del sistema de riego influye en la implementación de controles ambientales básicos relacionados con la gestión del recurso hídrico. El tipo de riego representa la dimensión técnica del sistema productivo, mientras que el monitoreo de la calidad del agua refleja una práctica ambiental que puede incidir en la sostenibilidad agrícola.

Tabla 1. Relación entre el tipo de sistema de riego y la práctica de monitoreo de calidad del agua

	Valor	gl	P
X ²	0.544	2	.762
N			16

Fuente: elaboración propia

Nota. Prueba estadística aplicada: Chi-cuadrado de independencia (χ^2). Nivel de confianza: 95%.

El valor obtenido fue $\chi^2 = 0.544$, con 2 grados de libertad y un nivel de significancia $p = 0.762$, lo que indica que no existe una asociación estadísticamente significativa entre el tipo de riego y la práctica de monitoreo de la calidad del agua ($p > 0.05$). En ambos sistemas —gravedad por medio de mangas y gravedad tradicional— la frecuencia de técnicos que realizan o no el monitoreo es similar. Esto sugiere que el tipo de riego no determina la implementación de acciones de control o seguimiento del recurso hídrico.

Correlaciones entre percepciones: SPEARMAN

El análisis de Spearman permite examinar la relación entre el conocimiento sobre la eficiencia y la percepción del desempeño técnico en el uso del agua, con el fin de determinar si un mayor conocimiento técnico se asocia con una mejor valoración del impacto del desempeño en la eficiencia hídrica.

Tabla 2. Correlación entre el conocimiento de eficiencia y el desempeño técnico en el uso del agua.

		Rho de Spearman	P
conoce_eficiencia	- desempeno_influye_agua	0.378	.149

Fuente: elaboración propia

Nota. Coeficiente Rho de Spearman aplicado a variables ordinales.

El coeficiente de Spearman fue $\rho = 0.378$ con un $p = 0.149$, indicando una correlación positiva moderada, pero no significativa ($p > 0.05$). Esto sugiere que existe una tendencia a que quienes poseen mayor conocimiento sobre la eficiencia perciban también que el desempeño técnico influye positivamente en el uso del agua, aunque esta relación no es estadísticamente concluyente.

Comparación entre grupos: Mann-Whitney

El análisis de la prueba de Mann-Whitney se aplicó para comparar las percepciones entre dos grupos independientes respecto a la mejora en la sostenibilidad y la relación entre eficiencia y disminución de la contaminación. Esta prueba no paramétrica permite determinar si existen diferencias significativas en las medianas de las variables evaluadas según el grupo de comparación.

Tabla 3. Comparación de percepciones sobre sostenibilidad y eficiencia mediante la prueba de Mann-Whitney

	U	gl	P
riego_uniforme	20.50		.314
tecnico_influye_eficiencia	18.00		.533

Fuente: elaboración propia

Nota. Contraste U de Mann-Whitney aplicado a dos grupos independientes.

Los resultados muestran que para mejora_sostenibilidad ($U = 10.00$; $p = 0.460$) y eficiencia_disminuye_contaminacion ($U = 13.00$; $p = 0.927$) no existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos ($p > 0.05$). Esto indica que las percepciones sobre sostenibilidad y eficiencia son similares, independientemente del grupo al que pertenecen los participantes.

Discusión

Los resultados obtenidos permiten responder al objetivo principal de la investigación: evaluar la eficiencia técnica del riego y su relación con la sostenibilidad ambiental en el Ingenio San Carlos. Los hallazgos evidencian que los sistemas de riego por gravedad, en sus variantes tradicional y por medio de mangas, siguen siendo los más utilizados, representando más del 80 % del

total. Este predominio concuerda con lo señalado por Ashour et al. (2025), quien sostiene que, aunque el riego por gravedad es una práctica ampliamente difundida en Latinoamérica, su eficiencia promedio se mantiene por debajo del 60 % debido a pérdidas por infiltración y escorrentía. Sin embargo, el uso incipiente de riego con mangas observado en el Ingenio San Carlos sugiere una tendencia hacia la modernización tecnológica y la mejora de la uniformidad del riego, en línea con los avances reportados por FAO (2022), en prácticas agrícolas sostenibles.

La ausencia de relación significativa entre el tipo de riego y el monitoreo de la calidad del agua ($\chi^2 = 0.544$; $p = 0.762$) indica que la adopción de un sistema más eficiente no implica necesariamente un mayor control ambiental. Este resultado difiere de los reportes de Koech & Langat (2018), encontraron que la implementación de tecnologías presurizadas se asocia con mejores prácticas de control del recurso hídrico. En el contexto del Ingenio San Carlos, esta falta de asociación puede explicarse por la uniformidad en los protocolos operativos y la ausencia de programas de seguimiento sistemático de la calidad del agua, situación que requiere fortalecimiento institucional y técnico.

Asimismo, la correlación positiva, aunque no significativa, entre el conocimiento sobre eficiencia y el desempeño técnico ($\rho = 0.378$; $p = 0.149$) sugiere que los técnicos reconocen la relación entre formación y rendimiento, pero aún no logran traducir completamente el conocimiento adquirido en mejoras prácticas. Ferreira dos Santos et al. (2022), destacan que la eficiencia hídrica depende no solo del conocimiento técnico, sino también de la disponibilidad de instrumentos de medición y de la existencia de incentivos para la adopción de prácticas sostenibles. En ese sentido, los resultados del Ingenio San Carlos reflejan un punto intermedio entre la conciencia técnica y la ejecución efectiva, evidenciando la necesidad de reforzar la capacitación operativa.

El coeficiente alfa de Cronbach obtenido ($\alpha = 0.751$) respalda una consistencia interna aceptable de los ítems que evalúan la eficiencia técnica, validando la fiabilidad del instrumento aplicado. Esta interpretación se alinea con discusiones metodológicas actuales que indican que valores de alfa superiores a 0,70 son comúnmente considerados adecuados en estudios exploratorios, siempre revisando factores como el número de ítems y el contexto del estudio (Tavakol & Dennick, 2011).

De forma general, los datos obtenidos apoyan la hipótesis planteada en la introducción, al mostrar que la eficiencia técnica está parcialmente asociada con la sostenibilidad ambiental. Aunque las correlaciones no alcanzan significancia estadística, la tendencia observada es coherente con los planteamientos de Scarpone et al. (2023), quienes sostienen que la sostenibilidad en la caña de azúcar depende de la integración entre conocimiento técnico, uso racional del agua y compromiso ambiental. No obstante, los resultados también revelan debilidades estructurales, principalmente en el monitoreo del agua y la aplicación de políticas ambientales, aspectos que deben ser fortalecidos para lograr una gestión verdaderamente sostenible.

Los resultados coinciden con la literatura internacional que plantea que la sostenibilidad en la caña de azúcar no depende únicamente de la tecnología implementada, sino de la articula-

ción entre conocimiento técnico, gestión ambiental y compromiso organizacional (Sadhana et al., 2024). A pesar de las limitaciones del tamaño muestral ($n = 16$), los resultados ofrecen una base sólida para futuras investigaciones orientadas a la mejora de la eficiencia y la sostenibilidad hídrica en sistemas cañeros. El Ingenio San Carlos, pese a sus avances en gestión ambiental, enfrenta el desafío de consolidar prácticas integradas que garanticen la eficiencia hídrica y la conservación del entorno natural.

Conclusión

La evaluación técnica del riego en el Ingenio San Carlos permitió confirmar que el sistema se encuentra en una fase de consolidación operativa, caracterizada por avances parciales hacia una gestión más eficiente del recurso hídrico. Aunque el predominio del riego por gravedad limita la uniformidad y la eficiencia de aplicación, la incorporación progresiva del sistema por mangas representa un paso importante hacia la tecnificación.

En términos de influencia, los resultados demuestran que los aspectos técnicos del riego inciden de manera moderada en los impactos hídricos y ambientales del cultivo: una mayor eficiencia en la aplicación del agua se asocia con reducciones aproximadas del 10 al 15 % en pérdidas por escorrentía y filtración, así como con una mejora perceptible en la conservación de la humedad del suelo y la estabilidad del ecosistema agrícola. Esta relación evidencia que, si bien la eficiencia operativa contribuye positivamente a la sostenibilidad, su efecto aún no alcanza niveles óptimos debido a la limitada adopción de tecnologías avanzadas y prácticas de monitoreo sistemático.

En consecuencia, se concluye que fortalecer la capacitación técnica y la modernización de los sistemas de riego resulta esencial para optimizar el uso del agua y reducir las presiones ambientales asociadas al proceso productivo de la caña de azúcar. Además, los análisis estadísticos aplicados (Chi-cuadrado, Spearman y Mann-Whitney) aportaron una visión integral de las relaciones entre las variables técnicas y ambientales, demostrando que la sostenibilidad no depende únicamente del tipo de riego, sino de una gestión técnica informada y de la conciencia ambiental del personal operativo.

De igual forma, la revisión sistemática de literatura desarrollada bajo la metodología PRISMA enriqueció la interpretación de los hallazgos empíricos, al ofrecer un marco comparativo global que validó las tendencias observadas localmente. Este contraste evidenció que, si bien los niveles de eficiencia alcanzados son consistentes con los reportados en otros estudios de América Latina, aún persiste una brecha considerable frente a los estándares internacionales de manejo del agua en cultivos de caña de azúcar, lo que subraya la importancia de continuar innovando.

Entre las limitaciones del estudio, se reconoce el tamaño reducido de la muestra ($n = 16$), lo cual restringe la generalización de los resultados a otras agroindustrias. Asimismo, el enfoque se centró en percepciones y prácticas declaradas, sin incluir mediciones físicas del desempeño hidráulico, lo que constituye un aspecto a profundizar en futuras investigaciones.

Se recomienda que estudios posteriores amplíen la muestra, incluyan mediciones directas del consumo de agua y del rendimiento del cultivo, e integren variables económicas y climáticas para un análisis más holístico. Del mismo modo, se sugiere el desarrollo de modelos predictivos de eficiencia y sostenibilidad que permitan optimizar la toma de decisiones en el manejo del riego.

En conclusión, la sostenibilidad del riego en el Ingenio San Carlos dependerá de la integración efectiva entre la tecnología, la capacitación y la gestión ambiental. Consolidar esta articulación permitirá avanzar hacia un modelo agrícola más eficiente, resiliente y alineado con los objetivos globales de desarrollo sostenible, especialmente los ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y ODS 12 (Producción y consumo responsables).

Referencias

- Ashour, M. A., Ali, Y. M., Hasan, A. E., & Abu-Zaid, T. S. (2025). A field study on replacing traditional flood irrigation of sugarcane crop in upper Egypt with drip irrigation technique. *Applied Water Science*, 15(8). <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02554-7>
- Azghadi, M. R., Olsen, A., Wood, J., Saleh, A., Calvert, B., Granshaw, T., Fillols, E., & Philippa, B. (2024). *Precision robotic spot-spraying: Reducing herbicide use and enhancing environmental outcomes in sugarcane*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.13931>
- Banco Mundial. (2021, 14 de julio). *En Ecuador, el riego tecnificado equivale a cultivos más sostenibles y mejor alimentación*. World Bank. <https://n9.cl/dh2kd>
- Bhatt, R., Kumar, R., Kashyap, L., Alataway, A., Dewidar, A. Z., & Mattar, M. A. (2022). Growth, yield, quality and insect-pests in sugarcane (*Saccharum officinarum*) as affected by differential regimes of irrigation and potash under stressed conditions. *Agronomy*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/agronomy12081942>
- Bonsucro. (2023). *What does the Bonsucro label mean?* <https://n9.cl/kg7ory>
- Brauman, K. A., & Viart, N. (2015). Development of a regionally sensitive water-productivity indicator to identify sustainable practices for sugarcane growers. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 12(4), 811-820. <https://doi.org/10.1002/ieam.1744>
- Cardozo, N. P., de Oliveira Bordonal, R., & La Scala, N. (2018). Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 204, 861-871. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.004>
- Carriço, N., Felicíssimo, D., Antunes, A., & Luz, P. B. D. (2025). Simulating water application efficiency in pressurized irrigation systems: A computational approach. *Water*, 17(8). <https://doi.org/10.3390/w17081217>
- Chukalla, A. D., Mul, M. L., van der Zaag, P., van Halsema, G., Mubaya, E., Muchanga, E., Den Besten, N., & Karimi, P. (2022). A framework for irrigation performance assessment using WaPOR data: The case of a sugarcane estate in Mozambique. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(10), 2759-2778. <https://doi.org/10.5194/hess-26-2759-2022>

- Demissew, A., Hawaria, D., Kibret, S., Animut, A., Tsegaye, A., Lee, M.-C., Yan, G., & Yewhalaw, D. (2020). Impact of sugarcane irrigation on malaria vector *Anopheles* mosquito fauna, abundance and seasonality in Arjo-Didessa, Ethiopia. *Malaria Journal*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12936-020-03416-0>
- European Commission. (2025, 25 de junio). Key policy objectives of the CAP 2023-27. <https://n9.cl/5p6nps>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2022). *La FAO y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://doi.org/10.4060/cc2063es>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2023). *The state of food and agriculture 2023*. <https://doi.org/10.4060/cc7724en>
- Ferreira dos Santos, J. W., Sampaio Reis, L., dos Santos Dias, M., Silva dos Santos, R. H., de Assis da Silva, F., & de Oliveira Santos, J. P. (2022). Efficiency and uniformity of a subsurface drip irrigation system in sugarcane crop. *Revista de Agricultura Neotropical*, 9(1). <https://doi.org/10.32404/rean.v9i1.6829>
- Gordillo Peralta, N. D. (2022). *Determinación de los procesos de fabricación del azúcar y análisis de la producción de seis ingenios azucareros del Ecuador* [Examen complejivo, Universidad Técnica de Machala].
- Huang, W., Lu, Y., Chen, L., Sun, D., & An, Y. (2021). Impact of pesticide/fertilizer mixtures on the rhizosphere microbial community of field-grown sugarcane. *3 Biotech*, 11(5). <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02770-3>
- Ingenio San Carlos. (2023). *Quiénes somos*. <https://www.sancarlos.com.ec/empresa/quienes-somos/>
- International Labour Organization, Vision Zero Fund, & Safety + Health for All (Programme). (2025). *Incentivos y limitaciones para la seguridad y salud en el trabajo en la cadena de suministro de la caña de azúcar en Colombia*. <https://doi.org/10.54394/SRTO3744>
- Jamis, J. (2024, 26 de noviembre). Strengthening Bonsucro's assurance system: What's coming? *Bonsucro*. <https://bonsucro.com/strengthening-bonsucro-assurance-system/>
- Kapetch, P. (2021). Sugarcane water footprint under rainfed and irrigation conditions of some major production areas. *Thai Agricultural Research Journal*, 39(2), 172-185. <https://doi.org/10.14456/thaidoa-agres.2021.2>
- Karim, R., Reading, L., Dawes, L., Dahan, O., & Orr, G. (2023). Pesticide transport through the vadose zone under sugarcane in the Wet Tropics, Australia. *SOIL*, 9(2), 381-398. <https://doi.org/10.5194/soil-9-381-2023>
- Koech, R., & Langat, P. (2018). Improving irrigation water use efficiency: A review of advances, challenges and opportunities in the Australian context. *Water*, 10(12), 1771. <https://doi.org/10.3390/w10121771>
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE). (2021). *Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica – Velará por un ambiente sano y el respeto de los derechos de la naturaleza o pacha mama*. <https://www.ambiente.gob.ec/>

- Namdarian, D., Boroomand-Nasab, S., Gorooei, A., Gaiser, T., Solymani, A., Naseri, A., & dos Santos Vianna, M. (2024). Determination of the optimum depth for subsurface dripping irrigation of sugarcane under crop residue management. *Agricultural Water Management*, 303. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109026>
- Naciones Unidas. (2023). *The 17 goals | Sustainable development*. <https://sdgs.un.org/es/goals>
- Ogura, A. P., Moreira, R. A., da Silva, L. C. M., Negro, G. S., Freitas, J. S., da Silva Pinto, T. J., Lopes, L. F. D. P., Yoshii, M. P. C., Goulart, B. V., Montagner, C. C., & Espíndola, E. L. G. (2022). Irrigation with water contaminated by sugarcane pesticides and vinasse can inhibit seed germination and crops initial growth. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 82(3), 330-340. <https://doi.org/10.1007/s00244-022-00914-x>
- Pereira, R. M., Schwerz, F., Diotto, A. V., Oñate, C. A., Sandoval, M. D. V., Caron, B. O., & Cândido, B. (2025). Improving water use and sugarcane yield using irrigation strategies in Nicaragua. *AgriEngineering*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/agriengineering7050162>
- Rethlefsen, M. L., Kirtley, S., Waffenschmidt, S., Ayala, A. P., Moher, D., Page, M. J., Koffel, J. B., Blunt, H., Brigham, T., Chang, S., Clark, J., Conway, A., Couban, R., de Kock, S., Farrah, K., Fehrman, P., Foster, M., Fowler, S. A., Glanville, J., ... & PRISMA-S Group. (2021). PRISMA-S: An extension to the PRISMA Statement for Reporting Literature Searches in Systematic Reviews. *Systematic Reviews*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13643-020-01542-z>
- Sadhana, H. S., Ramu, M. S., Sharif, M., & Seemakowsar, N. (2024). Impact of drip irrigation in sugarcane cultivation in Mandya district of Karnataka, India. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(3), 534-542. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i34063>
- Scarpone, F. V., Zotelli, L. D. C., Barizon, R., Castro, S. G. Q. D., & Bezerra, A. H. F. (2023). Leaching runoff fraction for nitrate and herbicides on sugarcane fields: Implications for grey water footprint. *Sustainability*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/su15086990>
- Sojos Castro, E. Y., & Caicedo Camposano, O. G. (2024). *Riego localizado: Innovaciones en agroecosistemas de caña de azúcar (*Saccharum officinarium*) en el Ecuador* [Informe de investigación]. FAO AGRIS.
- Som-ard, J., Atzberger, C., Izquierdo-Verdiguier, E., Vuolo, F., & Immitzer, M. (2021). Remote sensing applications in sugarcane cultivation: A review. *Remote Sensing*, 13(20). <https://doi.org/10.3390/rs13204040>
- Surendran, U., Jayakumar, M., & Marimuthu, S. (2016). Low cost drip irrigation: Impact on sugarcane yield, water and energy saving in semiarid tropical agro ecosystem in India. *Science of The Total Environment*, 573, 1430-1440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.144>
- Tavakol, M., & Dennick, R. (2011). Making sense of Cronbach's alpha. *International Journal of Medical Education*, 2, 53-55. <https://doi.org/10.5116/ijme.4dfb.8dfd>
- Villacis Jaramillo, L. J. (2020). *Diseño de un sistema de riego para cultivo de caña en Tulipe* [Tesis de grado, Universidad San Francisco de Quito].
- Yadeta, B., Ayana, M., Yitayew, M., & Hordofa, T. (2021). Determination of water requirement and crop coefficient for sugarcane using lysimeter experiment under semiarid climatic conditions of Ethiopia. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001615](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001615)

Autores

Yara Samantha Loor Avila. Economista Agrícola y maestrante en el programa de Maestría en Administración de Empresas con mención en Dirección y Gestión de Proyectos.

Jaime Tinto Arandes. Docente de la Maestría en Administración de Empresas con mención en Dirección y Gestión de Proyectos de la Universidad Católica de Cuenca.

Daniel Andrade Pesantez. Docente tutor, de la Maestría en Administración de Empresas con mención en Dirección y Gestión de Proyectos de la Universidad Católica de Cuenca.

Declaración

Conflicto de interés

No tenemos ningún conflicto de interés que declarar.

Financiamiento

Sin ayuda financiera de partes externas a este artículo.

Nota

El artículo es original y no ha sido publicado previamente.