


Huella hídrica del cultivo de caña de azúcar en el contexto de cambio climático. Análisis del periodo 2010-2023, Guatemala


Water footprint of sugarcane cultivation in the context of climate change Analysis of the 2010-2023 period, Guatemala


Ochoa Orozco, Wener Armando^{1*}
*González Chavajay, Bayron Geovany*²
*Araque Pérez, Joxual Josué*³

^{1,3} Universidad de San Carlos, Guatemala, Guatemala

² Centro de Estudios Urbanos y Regionales CEUR-USAC, Guatemala, Guatemala

¹ wochoa@postgrado.ingenieria.usac.edu.gt 

² bgeovany@profesor.usac.edu.gt 

³ 202490165@fausac.gt 

Recibido/received:29/12/2025 Corregido/revised:06/01/2026 Aceptado/accepted:06/05/2026

Resumen: La agricultura es uno de los mayores consumidores de agua dulce a nivel mundial, especialmente en cultivos intensivos como la caña de azúcar. En Guatemala, este cultivo podría incrementar su presión hídrica bajo escenarios de cambio climático antropogénico, esta investigación evaluó la magnitud de la huella hídrica de la caña de azúcar y su relación con la variabilidad climática. El estudio se desarrolló mediante revisión bibliográfica y análisis cuantitativo de datos secundarios, aplicando la metodología propuesta por Hoekstra y Mekonnen. Se emplearon datos climáticos y productivos del periodo 2010–2023 para estimar los componentes verde, azul y gris. Se analizó su relación con precipitación y temperatura por regresión lineal y múltiple para identificar los factores que explican su variabilidad interanual. Los resultados indican que la huella hídrica promedio fue de $1,429.34 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$, con una contribución relativa de 73.8% para la huella verde ($1,055.28 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$), 20.9% para la huella azul ($298.23 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$) y 5.3% para la huella gris ($75.80 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$). La huella verde mostró una dependencia directa de la precipitación, mientras que la huella azul se incrementó en años más cálidos y secos, evidenciando mayor dependencia del riego bajo déficit hídrico. La huella gris, se asoció indirectamente a la intensificación del riego y al manejo agrícola. Aunque el componente verde domina el consumo hídrico del cultivo, la huella azul representa el principal componente de vulnerabilidad frente a la variabilidad climática en Guatemala, por su sensibilidad al déficit hídrico y su implicación directa en la extracción de agua de riego.

* Autor de correspondencia
Correo: 202490165@fausac.gt



Palabras clave: Agroclimatología; cambio climático; riego; recursos hídricos; planificación agrícola

Abstract: Agriculture is one of the largest consumers of freshwater worldwide, especially in intensive crops such as sugarcane. In Guatemala, this crop could increase its water pressure under scenarios of anthropogenic climate change; therefore, this research evaluated the magnitude of the water footprint of sugarcane and its relationship with climate variability. The study was conducted through a literature review and quantitative analysis of secondary data, applying the methodology proposed by Hoekstra and Mekonnen. Climatic and productive data from the period 2010–2023 were used to estimate the green, blue, and grey components of the water footprint, and their relationships with precipitation and temperature were analyzed using linear and multiple regression to identify the factors explaining their interannual variability. The results indicate that the average water footprint was $1,429.34 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$, with a relative contribution of 73.8% for the green water footprint ($1,055.28 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$), 20.9% for the blue water footprint ($298.23 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$), and 5.3% for the grey water footprint ($75.80 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$). The green water footprint showed a direct dependence on precipitation, while the blue water footprint increased in warmer and drier years, evidencing greater dependence on irrigation under water deficit conditions. The grey water footprint was indirectly associated with irrigation intensification and agricultural management. Although the green component dominates the crop's water consumption, the blue water footprint represents the main component of vulnerability to climate variability in Guatemala, due to its sensitivity to water deficits and its direct implication in irrigation water extraction.

Keywords: Agroclimatology; climate change; irrigation; water resources; agricultural planning

Introducción

La agricultura es uno de los sectores que más agua dulce consume a nivel mundial. En particular, el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) puede requerir grandes cantidades de agua y producir una huella hídrica significativa. Esto ha sido registrado en diversas regiones cañeras. Las variaciones entre ingenios y zonas abastecedoras se asocian principalmente con la evapotranspiración y el rendimiento del cultivo (Garay-Jacome et al., 2022). En Guatemala, la caña de azúcar es un cultivo clave para la economía (local y extranjera) y para el equilibrio social y ambiental (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2025). Sin embargo, este cultivo enfrenta desafíos en la sostenibilidad y producción debido a la variabilidad climática y las presiones sobre los recursos hídricos (Boretti y Rosa, 2019).

Para cuantificar estas presiones sobre el recurso hídrico, la comunidad científica emplea el concepto de huella hídrica, entendida como el volumen total de agua dulce utilizada tanto directa como indirectamente en la producción de bienes y servicios (Barbosa et al., 2025). Estudios sobre la huella hídrica de la caña de azúcar en regiones tropicales y subtropicales indican un consumo considerable de los componentes verde y azul, agua de precipitación almacenada, de fuentes superficiales y de pozos subterráneos concesionados (Ramírez-Ríos et al., 2022).

La huella hídrica se mide en verde que representa el volumen de agua proveniente de la precipitación la cual es almacenado en el suelo y utilizado por el cultivo, siendo consumido por evapotranspiración durante el crecimiento, esta huella permite calcular la fracción de lluvia efectivamente aprovechada. Por otro lado, la huella hídrica azul corresponde al volumen de agua superficial o subterránea extraído para riego que es consumido por el sistema productivo (por evaporación, transpiración o incorporación al producto) y no retorna a la fuente original. Finalmente, la huella hídrica gris se puede definir como la cuantificación en el volumen de agua dulce requerido para diluir la carga de contaminantes generados por la producción hasta cumplir estándares de calidad (p. ej., fertilizantes y pesticidas), con el fin de estimar el volumen necesario de dilución hasta alcanzar concentraciones seguras a partir de las normativas locales o internacionales (Mora-González y Cruz- Zuñiga, 2024).

La magnitud de cada uno de estos componentes no es estática, sino que responde a condiciones climáticas cambiantes. En este contexto el cambio climático antropogénico ha incrementado la escasez de agua en Centroamérica, debido a la modificación de los patrones de precipitación y la regularidad en que ocurren las sequías que afectan directamente a la agricultura (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023). Particularmente en Guatemala, la variabilidad del clima y los eventos extremos, como las sequías prolongadas, han aumentado la dependencia del riego, intensificando la huella azul del cultivo de caña (Ochoa-Orozco et al., 2022). Pero no solo es el tema climático, también la gestión deficiente de los recursos hídricos agrava las tensiones entre comunidades y sectores a causa del uso inapropiado y la sobreexplotación de este recurso en varias actividades industriales y agrícolas (Rodríguez et al., 2022).

Ante este escenario de vulnerabilidad hídrica, el estudio de la huella hídrica de la caña de azúcar en Guatemala es imperativo para entender las demandas presentes y futuras de agua, sobre todo en un escenario de cambio climático antropogénico se han realizado esfuerzos para apoyar a comunidades porque Guatemala registra altos índices de inseguridad alimentaria Asociación de Azucareros de Guatemala [ASAZGUA], 2023. Investigaciones previas han demostrado que las prácticas agrícolas sostenibles y las tecnologías de riego eficientes tienen el potencial para disminuir la huella hídrica del cultivo de caña en áreas donde el acceso a información sobre coeficientes de cultivo y evapotranspiración es restringido como lo es por ejemplo Centroamérica (Olivos et al., 2024; Pereira et al., 2025). Asimismo, la implementación de políticas de gestión de recursos hídricos que integren los impactos del cambio climático es necesaria para la sostenibilidad hídrica a largo plazo (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2023).

Con base en los vacíos de conocimiento identificados y la urgencia de contar con información cuantitativa para la toma de decisiones en gestión hídrica, este estudio evaluó la magnitud de la huella hídrica verde, azul y gris del cultivo de caña de azúcar en Guatemala durante el período 2010–2023, analizó su relación con variables climáticas (precipitación y temperatura), y propuso estrategias de

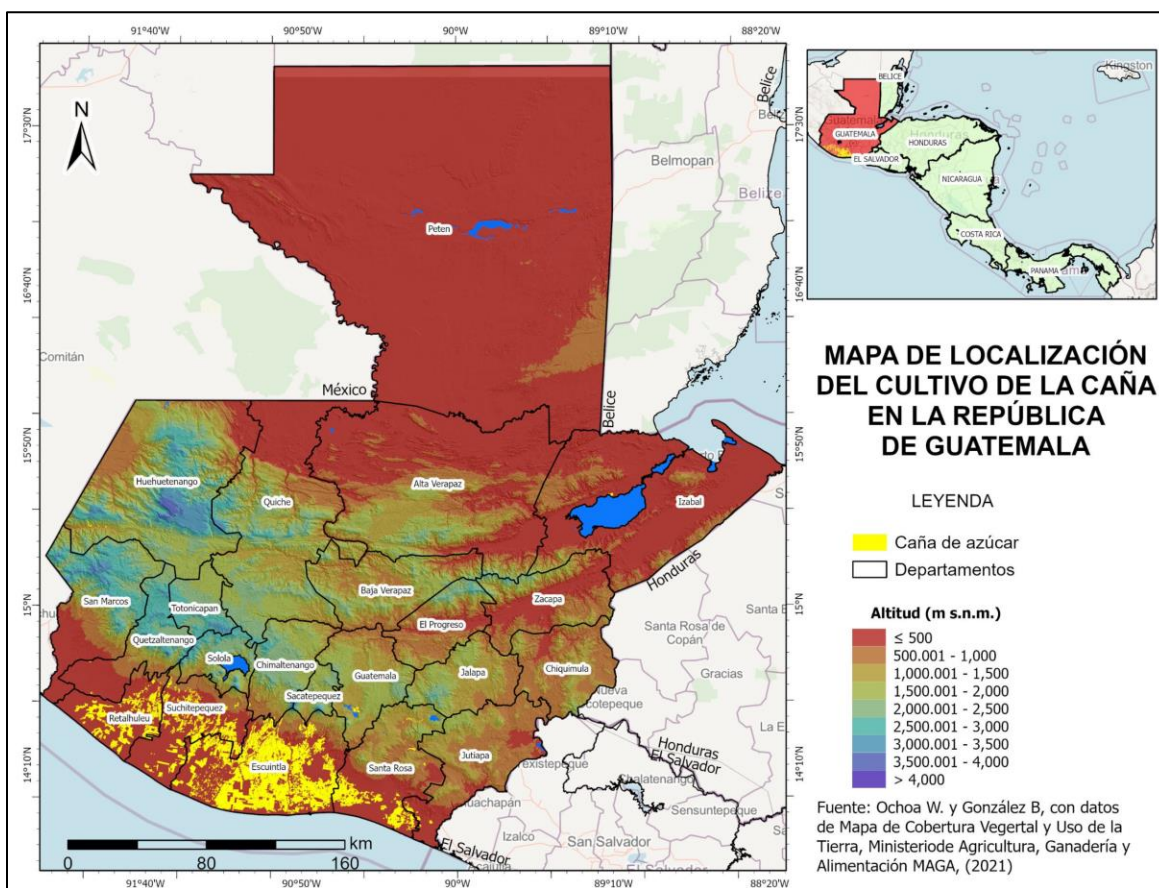
gestión que puedan mitigar los impactos negativos del cambio climático sobre el uso del agua en este sector.

Material y Métodos

Área de estudio: El área de estudio comprende la región sur de Guatemala, abarcando una superficie aproximada de 3,237.32 km² (323,731.84 ha) de zonas con cultivo activo de caña de azúcar (Figura 1). Esta región integra los departamentos de Escuintla, Santa Rosa y Suchitepéquez, ubicados en la vertiente del Pacífico guatemalteco, caracterizada por una franja costera de planicie aluvial con altitudes que oscilan entre los 0 y los 500 m s. n. m. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación [MAGA], 2021).

Figura 1

Mapa del área de estudio y de su orografía (altitud en m s.n.m.) de color amarillo se observan áreas ocupadas para el cultivo de caña de azúcar



Nota. La altitud se expresa en metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.). Los límites departamentales se incluyen como referencia espacial. Elaboración a partir de datos del MAGA, 2021

Tipo de Estudio: Se adoptó un diseño cuantitativo no experimental, de tipo transversal y correlacional. Se utilizó modelamiento hidrológico con base en datos secundarios validados y procesados conforme adaptados a los estándares de Water Footprint Network. Se descartaron datos secundarios recopilados

para el período 2010–2023 (Tabla 1) de las siguientes fuentes: temperatura, precipitación y evapotranspiración obtenidos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) y datos globales de alta resolución espacial por medio de los datos históricos mensuales de WorldClim v2.1 para el período 2010–2023, generados a partir de CRU-TS 4.09 y procesados con corrección de sesgo mediante WorldClim 2.1 (Harris et al., 2020; Fick y Hijmans, 2023)

Tabla 1

Datos climáticos utilizados con la serie del 2010–2023

Año	Precipitación anual (mm)	Temperatura media anual (°C)	ETP anual (mm)
2010	1,620	25.3	1,380
2011	1,740	25.1	1,360
2012	1,580	25.6	1,410
2013	1,490	25.8	1,430
2014	1,460	26	1,450
2015	1,320	26.4	1,500
2016	1,510	26.1	1,470
2017	1,430	26.3	1,490
2018	1,390	26.6	1,520
2019	1,280	26.9	1,550
2020	1,340	26.7	1,530
2021	1,290	27	1,560
2022	1,240	27.2	1,580
2023	1,210	27.4	1,600

Nota. Datos del INSIVUMEH y WorldClim v2.1

Datos de uso de agua y riego: Información sobre sistemas de riego y consumo de agua para la agricultura provenientes de informes del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA, 2024). Datos de producción de caña de azúcar: las estadísticas de producción y rendimiento agrícola facilitadas por la ASAZGUA, (2023) y estudios previos relevantes (Tabla 2).

La estimación de la huella hídrica se realizó con base en la metodología de la Water Footprint Network, fundamentada en el manual de evaluación de la Huella Hídrica y actualizada mediante las directrices para el componente gris, adaptada al contexto productivo y climático de Guatemala para cuantificar los componentes verde, azul y gris de la caña de azúcar, a partir de la estimación del consumo de agua directo e indirecto a lo largo del ciclo de vida del cultivo (Tabla 2). Este modelo no solo permite medir el volumen total de agua utilizada, sino que también diferencia el origen y la naturaleza del uso hídrico según sus tres componentes (Demir y Muratoglu, 2025).

Tabla 2*Parámetros de cultivo y riego utilizados en la evaluación de la huella hídrica*

Parámetro	Valor
Cultivo	<i>Saccharum officinarum</i> , L
Duración del ciclo	12 meses
Coefficiente de cultivo (Kc inicial)	0.5
Coefficiente de cultivo (Kc medio)	1.15
Coefficiente de cultivo (Kc final)	0.75
Rendimiento promedio	110 ton. ha ⁻¹
Área promedio considerada	250,000 ha
Método de riego predominante	Gravedad y aspersión

Nota. Recopilada a partir de los trabajos de Pereira et al. (2025); MAGA (2024)

En la Huella hídrica verde, se analizaron los datos de precipitación junto con las tasas de evapotranspiración de la caña de azúcar, utilizando coeficientes de cultivo que indican cuánta de esta precipitación es efectivamente utilizada por el cultivo. Huella azul: Se descargaron datos secundarios sobre el riego utilizado en los cultivos de caña de azúcar el cálculo se basó identificando cuánta agua se extrae para el riego y cuánta de esta agua es consumida (evaporada o transpirada) en lugar de retornar a la fuente original.

La huella gris se calculó a partir de los datos de los contaminantes presentes en el agua de descarga, como fertilizantes y pesticidas utilizados en el cultivo de caña (Tabla 3). Se usó para estimar la cantidad de agua necesaria para diluir estos contaminantes hasta niveles seguros, según normativas locales o internacionales (Jamshidi, 2021).

Tabla 3*Insumos agrícolas para huella gris*

Insumo	Aplicación (kg/ha/año)	Concentración máxima permisible
Nitrógeno (N)	150	10 mg/L
Fósforo (P)	60	0.1 mg/L
Plaguicidas	2–5	Según norma FAO/OMS

Herramientas de cálculo: Para la estimación de la huella hídrica se empleó la plataforma en línea Water Footprint Assessment Tool (WFAT), desarrollada por la Water Footprint Network (WFN), que permite ingresar datos del cultivo, condiciones climáticas y prácticas de manejo del agua para obtener estimaciones cuantitativas de los componentes verde, azul y gris de la huella hídrica (Water Footprint Network, s. f.). El procesamiento se realizó siguiendo las directrices del Global Water Footprint Standard, marco metodológico internacional para el cálculo, la evaluación de sostenibilidad y el reporte de la huella hídrica.

Con el propósito de corregir la colinealidad entre predictores climáticos ($r = -0.99$ entre precipitación y temperatura), se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA) a las variables

estandarizadas de precipitación y temperatura, con el fin de sintetizar el forzante climático dominante en un único eje ortogonal (PC1). Este componente se interpreta como un gradiente integrado hacia condiciones más secas y cálidas, y permite reducir la redundancia entre predictores altamente correlacionados sirviendo en el análisis climático (Poudel et al., 2025). Con base en PC1 como predictor único (β), se ajustaron regresiones lineales simples independientes para cada componente de la huella hídrica (verde, azul y gris) con el fin de estimar su respuesta diferencial al gradiente climático y evitar la inestabilidad numérica asociada a la colinealidad (Davino et al., 2022).

La capacidad predictiva de cada modelo se evaluó mediante validación cruzada leave-one-out (LOOCV), y los resultados se reportaron con los estadísticos Q^2 , RMSE y MAE expresados en unidades originales ($m^3 \cdot ton^{-1}$) (Yates et al., 2023). Los cálculos estadísticos y la generación de gráficos se realizaron en R (R-CoreTeam, 2025), empleando los paquetes tidyverse, ggplot2 y patchwork. Los datos utilizados para el análisis de correlaciones y regresiones entre variables climáticas y componentes de la huella hídrica se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4

Datos utilizados para análisis estadístico (correlaciones y regresión)

Año	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Huella verde ($m^3 \cdot ton^{-1}$)	Huella azul ($m^3 \cdot ton^{-1}$)	Huella gris ($m^3 \cdot ton^{-1}$)
2010	1,620	25.3	1,120	260	62
2012	1,580	25.6	1,090	280	68
2014	1,460	26.0	1,040	305	72
2016	1,510	26.1	1,070	290	70
2018	1,390	26.6	1,010	325	78
2020	1,340	26.7	980	340	82
2022	1,240	27.2	940	370	90
2023	1,210	27.4	920	398	99

Adicionalmente, se ajustó un modelo de regresión lineal múltiple para cuantificar el efecto conjunto de la precipitación y la temperatura sobre la huella hídrica azul. La variable dependiente fue la huella azul ($m^3 \cdot ton^{-1}$), expresada como el volumen de agua de riego consumida por unidad de producción, mientras que las variables independientes fueron la precipitación anual (mm) y la temperatura media anual (°C). El modelo se expresa mediante la Ecuación 1:

$$Hazul = \beta_0 + (\beta_1)(T) + (\beta_2)(P) + \varepsilon \quad (1)$$

donde *Hazul* representa el componente de huella hídrica azul, T es la temperatura media anual, P es la precipitación anual y ε es el término de error aleatorio. Los resultados del ajuste final de este modelo, incluyendo los coeficientes estimados y los estadísticos de bondad de ajuste.

Resultados y discusión

Huella hídrica total de la caña de azúcar en Guatemala

La huella hídrica total estimada para el cultivo de caña de azúcar en Guatemala durante el período 2010–2023 fue de $1,429.34 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$, con una distribución por componentes de 73.8% para la huella verde ($1,055.28 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$), 20.9% para la huella azul ($298.23 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$) y 5.3% para la huella gris ($75.80 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$) (Tablas 5 y 9). Este valor es consistente con los rangos reportados en la literatura internacional para cultivos de caña en regiones tropicales, donde el componente verde predomina debido a la dependencia de la precipitación estacional, aunque la magnitud del componente azul supera lo documentado en sistemas con mayor gestión hídrica (Ramírez-Ríos et al., 2022).

Tabla 5

Datos de riego utilizados para huella azul

Departamento	Volumen de riego ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$)	Huella azul estimada ($\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$)
Escuintla	3,100	270.5
Santa Rosa	4,200	330.2
Suchitepéquez	2,800	255.1
Promedio nacional	3,360	298.23

Nota. La huella hídrica total de la caña de azúcar en Guatemala se estimó en aproximadamente $1,430 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$, con una contribución dominante de la huella verde ($\approx 74\%$), seguida por la huella azul ($\approx 21\%$) y la huella gris ($\approx 5\%$).

El diagnóstico de colinealidad reveló una correlación de Pearson de $r = -0.99$ entre precipitación y temperatura, con un Factor de Inflación de la Varianza (VIF) de 48.4, valor que supera ampliamente el umbral crítico de $\text{VIF} > 10$ y que clasifica la colinealidad como severa (Davino et al., 2022). En presencia de colinealidad de esta magnitud, los coeficientes de una regresión múltiple convencional se vuelven numéricamente inestables e interpretablemente ambiguos; por ello, se justifica la reducción dimensional mediante PCA para sintetizar ambas variables en un único gradiente climático ortogonal (PC1) (Tabla 6).

Tabla 6

Matriz de correlaciones de Pearson (r) entre variables climáticas y huellas hídricas

Variable	Precipitación (mm)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Huella verde ($\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$)	Huella azul ($\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$)	Huella gris ($\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$)
Precipitación (mm)	1	-0.99	0.998	-0.989	-0.976
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	-0.99	1	-0.985	0.98	0.973
Huella verde ($\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$)	0.998	-0.985	1	-0.992	-0.981
Huella azul ($\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$)	-0.989	0.98	-0.992	1	0.997

Variable	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Huella verde (m ³ ·ton ⁻¹)	Huella azul (m ³ ·ton ⁻¹)	Huella gris (m ³ ·ton ⁻¹)
Huella gris (m ³ ·ton ⁻¹)	-0.976	0.973	-0.981	0.997	1

Nota. Correlaciones fuertes ($P = |r| \geq 0.70$)

Los modelos de regresión basados en el componente principal/dimensional β (PC1) mostraron alta capacidad explicativa para los tres componentes de la huella hídrica (Tabla 7) con $R^2 = 0.98$ para la huella verde, $R^2 = 0.97$ para la huella azul y $R^2 = 0.95$ para la huella gris, con todos los valores de $p < 0.001$.

Tabla 7
Modelos con base al componente principal de Huella Hídrica

Respuesta	Intercepto	β (PC1)	R^2	P value
Huella verde (m ³ ·ton ⁻¹)	1,021.25	-50.46	0.98	4.83e-07
Huella azul (m ³ ·ton ⁻¹)	321.00	32.73	0.97	5.60e-06
Huella gris (m ³ ·ton ⁻¹)	77.62	8.50	0.95	2.97e-05

Nota: β dimensional del modelo el cual permite validar la capacidad predictiva de las regresiones bajo la no inflación de variables.

Patrones de predicción de las huellas hídricas

La validación cruzada LOOCV confirmó la predicción de los modelos (Tabla 8), con $Q^2 = 0.98, 0.94$ y 0.90 respectivamente, valores casi idénticos a los R^2 , lo que indica ausencia de sobreajuste a pesar del tamaño muestral. La dirección de los coeficientes β es físicamente coherente: el signo negativo para la huella verde ($\beta = -50.46$) indica que el avance hacia condiciones más secas y cálidas reduce el agua de lluvia disponible para el cultivo, mientras que los signos positivos para la huella azul ($\beta = +32.73$) y gris ($\beta = +8.50$) reflejan el aumento progresivo del requerimiento de riego y de la carga contaminante asociada a su intensificación (Wongso et al., 2020).

No obstante, debe reconocerse que la serie temporal disponible ($n = 8$ años con datos completos) limita la generalización de estos resultados, por lo que su interpretación debe circunscribirse al período de estudio 2010–2023.

Tabla 8
Modelación final bajo componente β y estadísticas para el número de muestras

Modelo	Q^2	RMSE	MAE
Huella verde (m ³ ·ton ⁻¹) $\sim \beta$	0.98	8.69	7.06
Huella azul (m ³ ·ton ⁻¹) $\sim \beta$	0.94	10.24	8.63
Huella gris (m ³ ·ton ⁻¹) $\sim \beta$	0.90	3.62	3.03

Tabla 9
Resultados de huella hídrica calculada para caña (2010–2023)

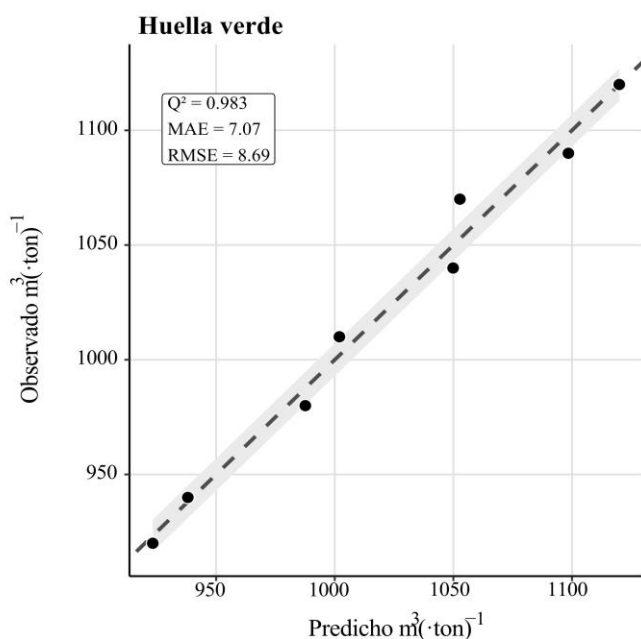
Componente	Promedio (m ³ ·ton ⁻¹)	Mínimo	Máximo
Huella verde	1,055.28	901.52	1,197.02
Huella azul	298.23	202.88	398.10
Huella gris	75.80	50.54	99.65
Huella total	1,429.34	-	-

Estado actual y tendencia de la huella hídrica en la producción de caña de azúcar

La huella hídrica verde presentó un valor promedio de 1,055.28 m³·ton⁻¹ para el período 2010–2023, con un rango de variación entre 901.52 m³·ton⁻¹ (año más seco y cálido) y 1,197.02 m³·ton⁻¹ (año más lluvioso) (Tabla 9). La tendencia temporal muestra una disminución progresiva de este componente a lo largo de la serie analizada, congruente con la reducción observada en la precipitación anual de 1,620 mm en 2010 a 1,210 mm en 2023 (Tabla 1).

El modelo basado en PC1 captura esta relación con mejor precisión (R² = 0.98; RMSE = 8.69 m³·ton⁻¹), indicando que la variación interanual de la huella verde está controlada casi en su totalidad por el régimen de lluvia (Figura 2), resultado consistente con lo documentado por la evidencia reciente de Mbewu et al. (2024), quienes confirman la sensibilidad del componente verde a la variabilidad de precipitación bajo cambio climático.

Figura 2
Valores predichos con base al componente β para huella Verde



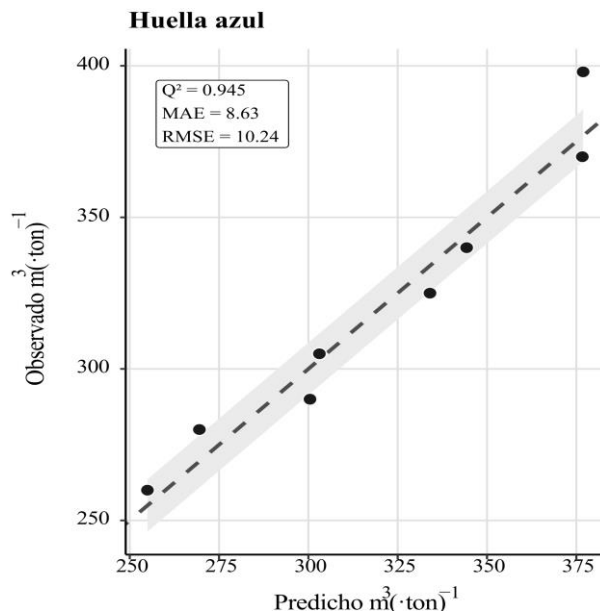
Para la huella verde, los valores observados en la serie ($920\text{--}1120\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$) implican que para un año determinado, el valor esperado se estima de $\sim\pm 7\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$ dentro de un rango anual de $\sim 200\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$; esto es consistente con la definición del componente verde como consumo de agua proveniente de precipitación efectiva además está fuertemente controlada por el régimen de lluvia y la dinámica de evapotranspiración del cultivo, concuerda con Mbewu et al. (2024), que reafirma la sensibilidad de la huella hídrica (especialmente el componente verde) a variaciones de lluvia y temperatura bajo cambio climático.

Huella azul: La huella hídrica azul registró un promedio de $298.23\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$ para el período analizado, con valores que oscilaron entre 202.88 y $398.10\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$ (Tabla 9), reflejando una tendencia creciente a lo largo de la serie temporal congruente con la reducción progresiva de la precipitación y el aumento de la temperatura (Figura 3). Este valor supera el rango de $60\text{--}180\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$ reportado por Ramírez et al. (2022) para regiones tropicales con menor estrés hídrico, lo que evidencia mayor presión sobre los recursos de agua superficial y subterránea en el sistema productivo de Guatemala.

A escala departamental, Santa Rosa presentó el mayor requerimiento de riego, con una huella azul de $330.2\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$ (Tabla 5), equivalente al 23.1% de la huella total, seguido por los departamentos de Escuintla ($270.5\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$) y Suchitepéquez ($255.1\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$). Esta variabilidad espacial responde a diferencias en la disponibilidad hídrica local y en los sistemas de riego predominantes, tal como documentan Wade et al. (2022) para la región del Pacífico guatemalteco.

Figura 3

Valores predichos con base al componente β para huella Azul



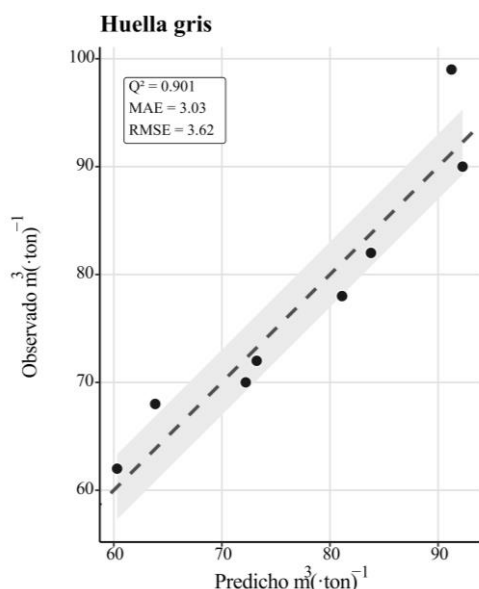
En la huella azul ($260\text{--}398\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$) muestran valores variables que indican aumento en el riego bajo condiciones más secas y cálidas (Figura, 3). El error de predicción se sitúa en $9\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$ por año. El componente de la huella azul no depende exclusivamente del clima, sino también de factores relacionados con la gestión dl agua, eficiencia de riego e infraestructura. Estos factores introducen variabilidad adicional no capturada completamente por el gradiente climático. Esto coincide con literatura que atribuye la variabilidad del uso de agua en agricultura irrigada a la interacción entre clima y gestión (programación de riego, condiciones edáficas y prácticas agronómicas). Esta combinación clima-gestión es común en estudios de huella hídrica en sistemas cañeros y azucareros y se discute como un eje clave en la planificación de riego y la gobernanza del agua (Fito et al., 2023).

Huella gris: Registró un valor promedio de $75.80\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$ para el período 2010–2023, con un rango de variación entre $50.54\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$ y $99.65\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$ (Tabla 9). Aunque este componente representa la menor proporción de la huella hídrica total (5.3%), su tendencia creciente a lo largo de la serie analizada de $62\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$ en 2010 a $99\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$ en 2023 (Tabla 4), constituye una señal de alerta sobre el incremento progresivo de la carga contaminante en los cuerpos de agua de la región cañera del Pacífico guatemalteco

Estos resultados indican que, a mayor precipitación, aumenta la huella verde y disminuye la huella azul. Y que, a mayor temperatura, aumentan las huellas azul y gris, reflejando la mayor demanda hídrica y contaminación. El error absoluto tiene una variación típica de $\pm 3\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$ por año. La mayor incertidumbre relativa se explica por el carácter indirecto de este componente, cuya magnitud está asociada principalmente a procesos de intensificación hídrica y al aumento del uso de riego, más que a un control climático directo (Figura 4).

Figura 4

Valores predichos con base al componente β para huella Gris



La huella gris ($62\text{--}99 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$) posee una incertidumbre anual típica de $\sim \pm 3 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ dentro de un rango de $\sim 37 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$; esto concuerda con la conceptualización del componente gris como volumen requerido para dilución de contaminantes y con resultados que destacan que su señal puede estar acoplada a la intensificación productiva y al uso de insumos, además del clima (Zhang et al., 2025).

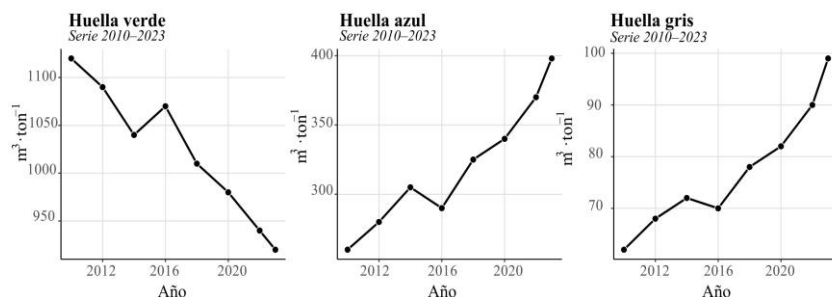
Desde la perspectiva ambiental, la tendencia ascendente de la huella gris de 50.54 a $99.65 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ a lo largo del período de estudio plantea preocupaciones para la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos y la salud pública en la región, considerando que los departamentos de Escuintla, Santa Rosa y Suchitepéquez concentran una parte importante de las fuentes de agua superficial y subterránea que abastecen tanto al sector agroindustrial como a comunidades rurales (MAGA, 2021). La reducción de este componente requiere no solo la optimización del uso de insumos químicos, sino también la adopción de prácticas de agricultura de conservación que mejoren la eficiencia de los nutrientes, reduzca las pérdidas por escorrentía y disminuyan la presión contaminante sobre los cuerpos hídricos (Garay et al., 2022)

Influencia de las variables climáticas en la Huella Azul

La huella azul de la caña de azúcar está significativamente influenciada por la precipitación y la temperatura medias anuales. El modelo de regresión lineal múltiple convencional para la huella azul explicó el 76.6% de su variabilidad interanual ($R^2 = 0.766$), con coeficientes estadísticamente significativos para temperatura ($\beta_1 = +23.58 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$; $p = 0.001$) y precipitación ($\beta_2 = -0.31 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$; $p < 0.001$), indicando que un incremento de 1 °C en la temperatura media anual se asocia con un aumento de $23.6 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ en el requerimiento de riego, mientras que cada milímetro adicional de precipitación reduce dicho requerimiento en $0.31 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$. Sin embargo, la elevada colinealidad entre ambos predictores ($r = -0.99$; $VIF \approx 48.4$) limita la estabilidad e interpretabilidad independiente de estos coeficientes. El modelo dimensional basado en PCA ($R^2 = 0.97$; $Q^2 = 0.94$) elimina la colinealidad, y se recomienda como el modelo principal para estimaciones futuras bajo escenarios de cambio climático (Davino et al., 2022) (Figura 5).

Figura 5

Tendencia general en el comportamiento de la Huella verde, azul y gris



La mayor demanda hídrica obliga a suplementar el riego, especialmente en las zonas donde el agua de lluvia no es suficiente. En este sentido, los hallazgos se alinean con estudios previos como los de Olivos et al. (2024), quienes destacaron cómo el estrés térmico puede incrementar la dependencia del riego en cultivos tropicales. Por otro lado, el coeficiente negativo de la precipitación evidencia el papel amortiguador sobre la necesidad de irrigación artificial, y concuerda con lo documentado por Tayade et al. (2023). Los cuales mencionan la capacidad del agua verde (lluvia) para compensar parcialmente la presión sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos.

Variabilidad y tendencias

La variabilidad interanual de la huella hídrica en la producción de caña de azúcar está estrechamente vinculada a los patrones de precipitación y temperatura, factores clave en la dinámica hídrica de este cultivo (Figura 6). Durante los años más secos, cuando las precipitaciones disminuyeron en promedio un 15-20% y las temperaturas aumentaron en torno a 1-2°C, la huella azul, que mide el agua utilizada para riego, experimentó un incremento, alcanzando hasta 398.10 m³·ton⁻¹ en las regiones más afectadas.

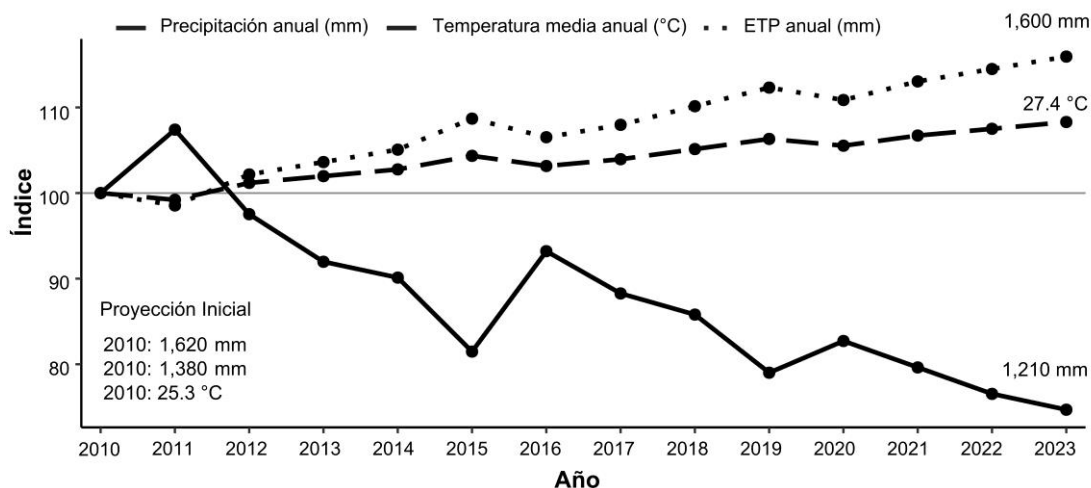
La huella hídrica azul presenta una relación inversa marcada con la precipitación anual, significaría que la disminución de las lluvias incrementa la dependencia del riego para sostener la producción del cultivo (mayor Huella Azul). También se observa una relación positiva entre la huella azul y la temperatura media anual, el aumento térmico intensifica la evapotranspiración en consecuencia, la evapotranspiración aumenta y con ello el consumo de agua de riego (Figura 6).

Se confirma el vínculo entre cambio climático y presión hídrica en el sector agrícola, además se alerta sobre la alta sensibilidad de la caña de azúcar frente a cambios climáticos incluso moderados. En escenarios futuros proyectados para Guatemala se indican aumentos de temperatura entre 1.5 y 2.5 °C y disminución de la precipitación entre 5% y 15% hacia mediados de siglo (Rivera et al., 2020). Se espera que la huella azul aumente aún más, con posibles implicaciones severas para la sostenibilidad del cultivo. El contexto de Guatemala ante el cambio climático antropogénico no es alentador en materia de precipitación y temperatura, ya que se proyecta un aumento de temperatura lo cual implica mayor evapotranspiración y una disminución de lluvia (Rivera et al., 2019). Esto implica que tendremos probabilidades de sequías prolongadas y lluvias poco cuantiosas e intensas (Rivera, 2021; Ochoa-Orozco, et al. 2024).

Con base en los coeficientes estimados del modelo de regresión múltiple ($\beta_1 = 23.58 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$; $\beta_2 = -0.31 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$) y las proyecciones climáticas para Guatemala hacia mediados de siglo sugiere que la huella azul podría incrementarse entre 65 y 120 m³·ton⁻¹ respecto al promedio actual (298.23 m³·ton⁻¹), equivalente a un aumento del 22% al 40%. Este incremento proyectado representaría una presión adicional sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la región cañera del Pacífico Guatemalteco (Figura 6), y subraya la urgencia de implementar estrategias de adaptación en el manejo del riego.

Figura 6

Variabilidad de los patrones de precipitación y temperatura para Guatemala



Los resultados mostrados para este estudio subrayan la importancia de adaptarse a un clima cambiante y gestionar recursos hídricos de manera más eficaz, en línea con las recomendaciones de (IPCC, 2022). Para poder implementar y desarrollar soluciones que garanticen la salud de los ecosistemas acuáticos y la sostenibilidad del cultivo de caña a largo plazo, será fundamental trabajar juntos en colaboración los agricultores, los creadores de políticas y los investigadores, tal como se ha observado en estudios comparativos en otros contextos tropicales (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2025).

Adicionalmente, Rivera et al. (2020), proporcionan un análisis detallado sobre los posibles escenarios de cambio climático para Guatemala, subrayando cómo los cambios en los patrones de precipitación y temperatura podrían alterar significativamente la sostenibilidad de los recursos hídricos. Los modelos climáticos presentados en su estudio sugieren un aumento en la variabilidad de la precipitación, lo cual podría intensificar los periodos de sequía y afectar negativamente la huella verde de la agricultura. Estos escenarios deben ser considerados en la gestión del agua agrícola para garantizar una adaptación efectiva y sostenible.

Esta presión hídrica proyectada sobre el sector agroindustrial no puede analizarse de forma aislada, sino en el contexto de una demanda total de agua que se verá intensificada por el crecimiento demográfico de Guatemala. Las proyecciones del Instituto Nacional de Estadística [INE], 2021 estiman que la población guatemalteca superará los 22 millones de habitantes hacia 2050, lo que incrementará la demanda de agua para usos domésticos, urbanos e industriales. En regiones como Escuintla, Santa Rosa y Suchitepéquez, donde la agricultura cañera y los asentamientos humanos comparten las mismas fuentes de agua superficial y subterránea, esta competencia podría derivar en

conflictos por el recurso, encarecimiento del acceso al agua de riego y eventual limitación de la producción agrícola, particularmente para los productores con menor capacidad de inversión en infraestructura hídrica (Rodríguez et al., 2022; MAGA, 2024).

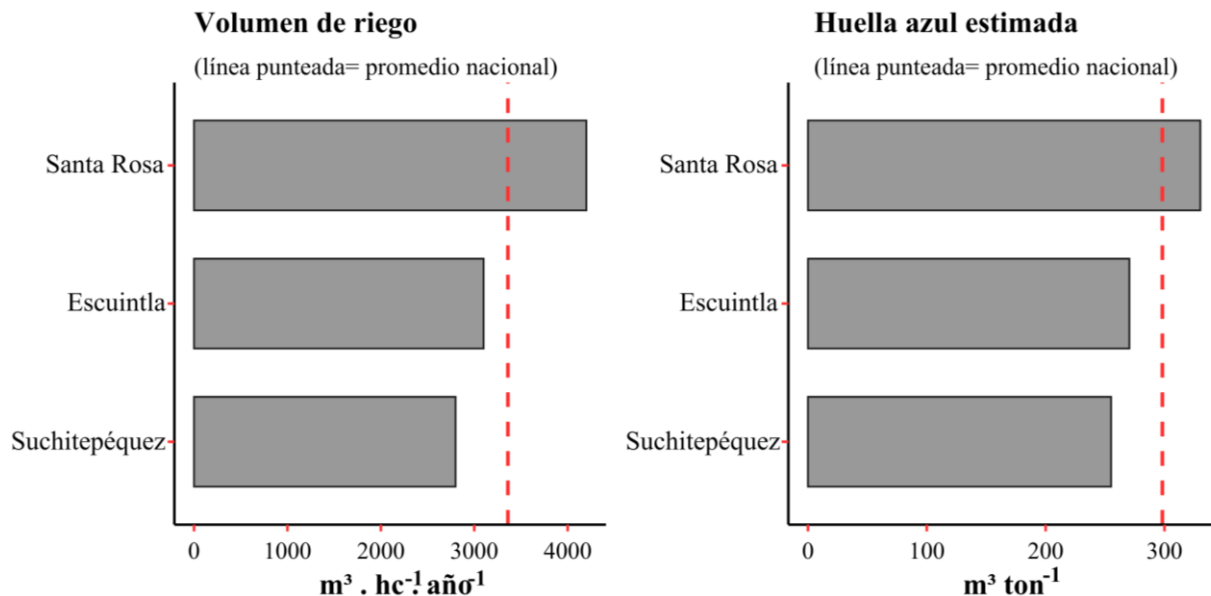
La necesidad creciente de riego (Figura 7), resultado de la reducción de la precipitación, obliga a los agricultores a depender más de la extracción de agua superficial y subterránea, lo que elevó la huella azul en promedio a $298.23 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$. Este aumento no solo incrementa la huella hídrica azul, sino que también ejerce una presión considerable sobre los recursos hídricos locales, los cuales están siendo compartidos con otros usos como el doméstico e industrial. En este contexto, la integración de tecnologías de riego eficiente, como el riego por goteo con sensores de humedad, y el rediseño del calendario agrícola ajustado a los patrones climáticos emergentes, resultan imprescindibles para mitigar el crecimiento de la huella azul. Además, se vuelve urgente la implementación de políticas que integren indicadores climáticos y de uso de suelo en la planificación hídrica nacional, tal como sugieren (Ochoa-Orozco, 2021 y IPCC, 2022).

En este sentido, la planificación hídrica para el sector cañero no puede limitarse a la eficiencia del riego a escala de finca, sino que debe integrarse en marcos de gobernanza del agua a escala de cuenca que reconozcan y arbitren la pluralidad de usuarios y demandas. La incorporación de indicadores de huella hídrica como los estimados en este estudio en los instrumentos de planificación territorial y de gestión de recursos hídricos constituye un paso necesario para anticipar puntos de escasez, priorizar intervenciones y diseñar políticas de adaptación que sean simultáneamente efectivas para el sector productivo y equitativas para las comunidades rurales que dependen de los mismos cuerpos de agua (IPCC, 2022; UNESCO, 2023).

Por otra parte, el análisis de la última década reveló una tendencia creciente tanto en la huella azul como en la huella gris. La huella gris, que refleja el volumen de agua necesario para diluir contaminantes agrícolas como fertilizantes y pesticidas, mostró un promedio de $75.80 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$, con variaciones que oscilaron entre $50.54 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ y $99.65 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$. La tendencia ascendente en la huella gris sugiere un aumento en la carga de contaminantes en el agua, asociado con una mayor dependencia del riego y un uso intensivo de insumos químicos. Estas cifras indican que el cambio climático antropogénico podría estar influyendo en la gestión del agua en la agricultura de caña de azúcar.

Figura 7

Volumen de Riego y Huellas Hídricas Calculadas



La disminución de la huella gris y la reducción de la huella azul deben tenerse en cuenta para garantizar que las prácticas de uso del agua en el cultivo de caña de azúcar en Guatemala sean sostenibles. Para alcanzar estos propósitos, se incorporan técnicas de riego más eficaces y gestión del agua, que han evidenciado mejorar la eficiencia hídrica y disminuir la presión sobre los recursos hídricos disponibles en sistemas agrícolas tropicales (Wade et al., 2022). El empleo de prácticas agrícolas, tales como la disminución de las pérdidas por escorrentía, la optimización del uso de fertilizantes y el manejo integrado de nutrientes ayuda a disminuir la carga contaminante, lo que a su vez reduce la huella hídrica gris (Gara-Jacome et al., 2022). Además, la integración de enfoques de agricultura de conservación podría ser vital para mejorar la infiltración de agua y reducir la necesidad de riego, como han indicado (Wade et al., 2022).

La investigación de Ochoa-Orozco (2021), destaca la influencia de la variabilidad climática en la dinámica del uso de la tierra. Subrayando cómo las fluctuaciones en el clima impactan no solo la disponibilidad de recursos hídricos sino también cómo se gestiona la tierra para la agricultura, incluyendo la producción de caña de azúcar. La adaptación a estos cambios climáticos es crucial para minimizar la huella azul y mejorar la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a eventos climáticos extremos.

Por otro lado, el estudio de Rivera (2021), sobre la variabilidad intraestacional de la precipitación en la región sur de Guatemala indica que la Oscilación Madden-Julian tiene un impacto considerable en

los patrones de lluvia durante el periodo 1980-2015. Este fenómeno puede contribuir a la inestabilidad de la huella hídrica verde, haciendo que la planificación del riego sea más desafiante y resaltando la importancia de estrategias de gestión hídrica que puedan adaptarse a cambios rápidos en las condiciones climáticas. El conocimiento de estos patrones es una guía para desarrollar sistemas de riego y gestión de cultivos que puedan responder dinámicamente a las fluctuaciones climáticas, minimizando así la huella azul y protegiendo los recursos hídricos disponibles.

La combinación de temperaturas más altas y precipitación más baja ha exacerbado la necesidad de riego, lo que a su vez ha intensificado tanto la huella azul como la huella gris. Esto pone de manifiesto que las prácticas agrícolas actuales podrían no ser sostenibles a largo plazo bajo las condiciones cambiantes impuestas por el cambio climático antropogénico. Por lo tanto, es fundamental adoptar tecnologías de riego más eficientes que reduzcan la huella azul y mejorar las prácticas agrícolas para minimizar la huella gris, asegurando así la sostenibilidad de la producción agrícola y la protección de los recursos hídricos en Guatemala.

Competencia hídrica entre el sector cañero y el consumo humano

La huella azul estimada para el cultivo de caña de azúcar en Guatemala cuyo promedio es de 298.23 m³·ton⁻¹ y un volumen total de riego de aproximadamente 3,360 m³·ha⁻¹·año⁻¹ sobre una superficie de 250,000 ha (Tabla 2) representa una extracción anual estimada entre 840 millones de m³ de agua superficial y subterránea en los departamentos de Escuintla, Santa Rosa y Suchitepéquez. Esta cifra adquiere una dimensión crítica cuando se considera que las mismas fuentes hídricas abastecen simultáneamente las necesidades de agua potable, saneamiento y uso doméstico de una población que en conjunto supera los 3.5 millones de habitantes en esa región.

En este contexto, el agua azul no es un recurso exclusivo del sector agroindustrial, sino un bien compartido cuya extracción intensiva para riego reduce su disponibilidad para el consumo humano, particularmente durante los meses de la estación seca en Guatemala (noviembre a abril) cuando la recarga de los cuerpos de agua es mínima y la demanda de riego alcanza su máximo (Ochoa-Orozco, 2020).

La tendencia creciente de la huella azul documentada en el período 2010–2023, proyectada a incrementarse entre 22% y 40% hacia mediados del siglo XXI bajo escenarios de cambio climático (Rivera et al., 2020), plantea un escenario donde la demanda hídrica del sector cañero y la demanda de agua para consumo humano convergerán inevitablemente sobre un volumen disponible que, lejos de aumentar, tenderá a reducirse por efecto de la disminución de la precipitación y la mayor evapotranspiración. Lo que tendrá implicaciones que van más allá de la gestión agronómica: configura un dilema de asignación hídrica que los tomadores de decisiones autoridades de cuenca, ministerios, municipalidades y el propio sector privado deberán abordar con marcos regulatorios claros, transparentes y basados en evidencia.

En la práctica, esta competencia ya se manifiesta en tensiones documentadas entre comunidades rurales y agroindustrias por el acceso al agua en la costa sur guatemalteca, donde la extracción intensiva para riego ha sido señalada como uno de los factores que compromete el caudal ecológico de ríos que también funcionan como fuentes de abastecimiento comunitario (Ochoa-Orozco et al., 2024). Anticipar y gestionar este conflicto latente requiere, como primer paso, contar con información cuantitativa precisa sobre la magnitud y distribución espacial de la demanda hídrica agroindustrial, exactamente el tipo de información que este estudio aporta mediante la estimación de la huella azul a escala departamental.

Conclusiones

Se ha demostrado que para el periodo del 2010 al 2023, la caña de azúcar en Guatemala tiene una huella hídrica calculada cerca de $1,430 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$. De esta cifra, el componente verde representa un 74%, el azul un 21% y el gris un 5%. El predominio del componente verde demuestra la dependencia del cultivo de la lluvia estacional en la zona del Pacífico Guatemalteco; sin embargo, el componente azul excede los rangos reportados en sistemas similares de producción en áreas tropicales semejantes, lo que indica que el sistema productivo cañero de Guatemala opera bajo condiciones de mayor estrés hídrico relativo

La huella azul resultó ser el componente más sensible a la variabilidad climática interanual, particularmente en departamentos como Santa Rosa, donde el riego llega a representar hasta un 30% del consumo hídrico total. Asimismo, la variabilidad climática interanual en el comportamiento de las huellas azul y gris, intensificándose en años más cálidos y secos. La proyección de tendencias sugiere un incremento en la huella azul y gris durante la última década, volviendo más vulnerable el sistema productivo de caña ante el cambio climático antropogénico. Se hace urgente el fortalecimiento de políticas públicas que regulen de forma eficiente el uso del agua, promuevan tecnologías de riego de precisión, y fortalezcan prácticas agroecológicas que disminuyan la carga contaminante.

A pesar de ser proporcionalmente más pequeña, genera inquietudes para la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos y la salud pública, porque se emplean muchos plaguicidas y fertilizantes nitrogenados. Esto abre una línea importante de investigación futura sobre los impactos acumulativos de la contaminación agrícola en fuentes de agua superficiales y subterráneas, así como en su posible relación con enfermedades de origen hídrico.

Para estudios futuros, se recomienda ampliar la serie temporal de análisis, incorporar mediciones directas de consumo de riego a escala de ingenio para validar las estimaciones obtenidas, y desagregar el análisis por variedad de caña y tipo de sistema de riego, con el fin de reducir la incertidumbre en los componentes estimados y fortalecer la base técnica para la toma de decisiones en el sector.

Contribución de Autoría CRediT

En el presente estudio, nosotros Wener Ochoa-Orozco, Bayron González y Joxual Araque-Pérez, contribuyeron de manera equitativa en todas las etapas de la investigación. La conceptualización del estudio, el diseño de la metodología, la implementación del software, la validación de los resultados y el análisis formal fueron desarrollados en conjunto. Asimismo, todos participaron en la investigación, incluyendo la recolección y análisis de datos y la validación de datos. La redacción del borrador original, así como la revisión y edición del manuscrito, fueron realizadas colaborativamente. En consecuencia, se declara que todos los autores han tenido una participación equitativa en cada aspecto del trabajo.

Declaración de intereses contrapuestos

Wener Ochoa-Orozco, Bayron González y Joxual Araque-Pérez, declaramos que no tienen intereses financieros en conflicto ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que usaron Elicit <https://elicit.com/> y Jenni <https://jenni.ai/> inteligencias artificiales que sirven para verificar y gestionar búsquedas bibliográficas relacionadas a esta investigación que no excedieran los últimos 10 o 5 años de antigüedad con la intención de facilitar y tener una mini biblioteca virtual de documentación.

Disponibilidad de datos

Los conjuntos de datos generados o analizados durante el estudio pueden ser disponibles por el autor correspondiente: wochoa@postgrado.ingenieria.usac.edu.gt previo a solicitud.

Agradecimientos y financiamiento

Al Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala por la proporción de los datos, al Ing. Agr. Rocaél Ramos extensionista del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA) así como a la empresa de Geoingeniería, Agua y Ambiente 888, por contribuir con el análisis e interpretación de datos.

Referencias

- Asociación de Azucareros de Guatemala. (2023). *Estudio de caso de la agroindustria azucarera de Guatemala en el marco del ODS 6*. ASAZGUA. <https://guatecana.com/wp-content/uploads/2024/10/Estudio-de-caso-AIA-ODS06.pdf>
- Barbosa, M. W., Pumpin, M. R., y Vargas, G. (2025). Prioritization of Water Footprint Management Practices and Their Effect on Agri-Food Firms' Reputation and Legitimacy: A Best–Worst Method Approach. *Sustainability*, 17(8), Article 3453. <https://doi.org/10.3390/su17083453>
- Boretti, A., y Rosa, L. (2019). Reassessing the projections of the World Water Development Report. *npj Clean Water*, 2(1), 15. <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>
- Davino, C., Romano, R., y Vistocco, D. (2022). Handling multicollinearity in quantile regression through the use of principal component regression. *METRON*, 80, 153–174. <https://doi.org/10.1007/s40300-022-00230-3>
- Demir, M. S., y Muratoglu, A. (2025). Water footprint concept, approaches, and applications: A comprehensive review for the agricultural sector. *Water and Environment Journal*, 39(2), 128–142. <https://doi.org/10.1111/wej.12968>
- Fick, S. E., y Hijmans, R. J. (2023). *WorldClim version 2.1: Historical monthly weather data 1950–2024* [Conjunto de datos]. University of California, Davis. <https://www.worldclim.org/data/monthlywth.html>
- Fito, J., Ahmed, I., Nkambule, T. T. I., y Kefeni, K. K. (2023). Evaluation of water footprint in sugar industries and bioethanol distilleries in two different water basins toward water sustainability. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(3), Article 2427–2440. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04182-z>
- Garay-Jacome, Á. S., Valdivia Alcalá, R., Hernández Ortiz, J., y Sandoval Romero, F. (2022). Estimación de la huella hídrica de la producción de caña de azúcar para los ingenios de la cuenca del Papaloapan. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(1), 103–113. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2581>
- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., y Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 7, 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (2018). *Variabilidad y cambio climático en Guatemala*. Departamento de Investigación y Servicios Climáticos,

Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. <https://funcagua.org.gt/wp-content/uploads/2020/04/2018.-Variabilidad-y-Cambio-Clim%C3%A1tico-en-Guatemala.-INSIVUMEH.pdf>

Intergovernmental Panel on Climate Change (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (2023). *Central and South America. In Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1689–1816). Cambridge University Press.

Jamshidi, S. (2021). Grey water footprint accounting, challenges, and problem-solving. En A. Banerjee, R. S. Meena, M. K. Jhariya, y D. K. Yadav (Eds.), *Agroecological footprints management for sustainable food system* (pp. 237–264). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9496-0_8

Mbewu, A. D., Elephant, D. E., Motsi, H., y Nyambo, P. (2024). Climate change effects on water footprint of crop production: A meta-analysis. *Environmental Challenges*, 17, Article101033. [10.1016/j.envc.2024.101033](https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101033)

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (2021). *Determinación de la cobertura vegetal y uso de la tierra a escala 1:50,000 de la República de Guatemala, año 2020*. Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgos (DIGEGR). <https://www.maga.gob.gt/download/Cobertura-vegetal-uso-de-la-tierra-21.pdf>

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (2024). *Política Nacional de Riego (2024-2033)*, pp: 1-90.

Mora-González, A., y Cruz-Zuñiga, N. (2024). Huella hídrica en el proceso constructivo como indicador de sostenibilidad: un estudio de caso para Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 37(2), 36–48. <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6684>

Olivos, G. S. M., Ramos, J. A. M., Chavez, L. P. V., Salvador, R. Y. V., Sanchez, A. J. N., y Bonifacio, A. E. B. (2024). Water footprint as a sustainability indicator: A systematic literature review. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(5), e06325. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n5-116>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2025). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2025: The potential to produce more and better*. <https://doi.org/10.4060/cd7488en>.

- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2023). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2023: Alianzas y cooperación por el agua*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386807>
- Ochoa Orozco, W. A. (2020). Gestión del agua con enfoque participativo en Guatemala frente al cambio climático. *Revista Científica Del Sistema De Estudios De Postgrado De La Universidad De San Carlos De Guatemala*, 3(01), 33–37. <https://doi.org/10.36958/sep.v3i01.30>
- Ochoa-Orozco, W. (2021). *Dinámica del uso de la tierra y la variabilidad climática en la subcuenca del río Panajachel, cuenca del lago de Atitlán, Sololá*. [Tesis de doctorado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio USAC. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/20486/1/Wener%20Armando%20Ochoa%20Or%C3%B2zco.pdf>
- Ochoa-Orozco, W., Rivera, P., y Herrera, E. (2022). Comportamiento meteorológico durante la sequía de medio verano en Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 9(2), 150–165. <https://doi.org/10.36829/63CTS.v9i2.1284>
- Ochoa-Orozco, W. A., González Chavajay, B. G., y Rivera, P. F. (2024). Evaluación cuantitativa de riesgos biofísicos de sequías e inundaciones en Guatemala. Un análisis geoespacial de la paradoja hídrica basado en índices de aridez y humedad (1970–2023). *Revista Estudios Ambientales*, 12(1), 112–127. <https://doi.org/10.47069/estudios-ambientales.v12i1.2362>
- Pereira, R. M., Schwerz, F., Diotto, A. V., Oñate, C. A., Sandoval, M. D. V., Caron, B. O., y Cândido, B. (2025). Improving water use and sugarcane yield using irrigation strategies in Nicaragua. *AgriEngineering*, 7(5), 162. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7050162>
- Pereira, L. S., Allen, R. G., Paredes, P., López-Urrea, R., Raes, D., Smith, M., Kilic, A., y Salman, M. (2025). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (2.^a ed., rev.). FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 Rev.1. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd6621en>
- Poudel, B., Dahal, D., Shrestha, S., Sewa, R., y Kalra, A. (2025). Developing a composite drought indicator using PCA integration of CHIRPS rainfall, temperature, and vegetation health products for agricultural drought monitoring in New Mexico. *Atmosphere*, 16(7), Artículo 818. <https://doi.org/10.3390/atmos16070818>
- R-Core Team (2025). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>

- Ramírez-Ríos, L. F., Becerra-Moreno, D., y Mora-Bejarano, C. H. (2022). Huella hídrica verde y azul de la producción de caña de azúcar orgánica en la zona centro del Valle del Cauca. *Ingeniería y Competitividad*, 24(2), 1–13. <https://doi.org/10.25100/iyc.v24i02.11264>
- Rivera, P. F., Bardales Espinoza, W. A., y Ochoa, W. (2019). *Escenarios futuros de cambio climático para Guatemala*. Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala (pp. 40–61). Editorial Universitaria UVG. <https://sgccc.org.gt/wp-content/uploads/2019/07/1RepCCGuaCap3.pdf>
- Rivera, P., Ochoa, W., y Salguero, M. (2020). *Escenarios de cambio climático para Guatemala, C.A.* Programa de Doctorado en Cambio Climático y Sostenibilidad. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Rivera, P. (2021). *Variabilidad intraestacional de la precipitación en la región sur de Guatemala durante los 1980–2015, influenciada por la oscilación Madden-Julian* [Tesis de Doctorado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/20485>
- Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoin, H. K., Landerer, F. W., y Lo, M. H. (2018). Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, 557(7707), 651–659. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1>
- Rodríguez, C., García, B., Pinto, C., Sánchez, R., Serrano, J., y Leiva, E. (2022). Water context in Latin America and the Caribbean: Distribution, regulations and prospects for water reuse and reclamation. *Water*, 14(21), Article 3589. <https://doi.org/10.3390/w14213589>
- Tayade, A. S., Vasantha, S., Anusha, S., Kumar, R. A., Hemaprabha, G., Geetha, P., Krishnapriya, V., Reddy, K. S., Bhatt, R., Siddiqui, M. H., Y Kesawat, M. S. (2023). Water-efficient genotypes along with conservation measures significantly reduce the green and blue water footprints in sugarcane (*Saccharum* spp.). *Scientific Reports*, 13(1), Artículo 13229. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40223-4>
- Wade, C. M., Baker, J. S., Van Houtven, G., Cai, Y., Lord, B., Castellanos, E., Leiva, B., Fuentes, G., Alfaro, G., Kondash, A. J., Henry, C. L., Shaw, B., y Hoponick Redmon, J. (2022). Opportunities and spatial hotspots for irrigation expansion in Guatemala to support development goals in the food–energy–water nexus. *Agricultural Water Management*, 267, Article 107608. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107608>
- Wongso, E., Nateghi, R., Zaitchik, B., Quiring, S., y Kumar, R. (2020). A data-driven framework to characterize state-level water use in the United States. *Water Resources Research*, 56(10), <https://doi.org/10.1029/2019WR024894>

Yates, L. A., Aandahl, Z., Richards, S. A., y Brook, B. W. (2023). Cross validation for model selection: A review with examples from ecology. *Ecological Monographs*, 93, e1557. <https://doi.org/10.1002/ecm.1557>

Zhang, T., Xie, X., y Huang, Z. (2025). Grey water footprint in the context of climate change and sustainable development: A global bibliometric analysis. *Next Research*, 2(4), Article 100727. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100727>