SUELOS ECUATORIALES

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

https://doi.org/10.47864/se552025p8798

Huella hídrica y sostenibilidad del cultivo de arroz en el distrito de riego ASOJUNCAL

Water footprint and sustainability of rice cultivation in the ASOJUNCAL irrigation district

Rafael Ricardo Davidson Montero[1*]✉, Armando Torrente Trujillo[2]✉, Nilver Tovar Ospina[3]✉, Angela Goretty García[4]✉

[1*] Ing. Civil, M.Sc. Ing. y Gestión Ambiental.
[2] Dr. Ciencias Agrarias
[3] M.Sc Ingeniería y Gestión Ambiental
[4] Ing. Química, M.Sc.
Universidad Surcolombiana. Programa de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental.

Vol. 55 (1 y 2) de 2025 | pp: 87-98 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 10/06/2026 - ACEP.: 14/07/2026

RESUMEN

Se estima la huella hídrica del cultivo de arroz de la finca Himalaya, un área de 13.5 ha del Distrito de Adecuación de Tierras de Mediana Escala El Juncal – ASOJUNCAL, en el municipio de Palermo (Huila, Colombia). Se sigue la metodología propuesta por la Red de la Huella Hídrica (WFN, Water Footprint Network), y se utiliza el software de uso libre CROPWAT 8.0 para calcular los requerimientos de agua a partir de datos edáficos de la zona. De esta manera, se logra la estimación de las huellas hídricas verde, azul y gris del ciclo productivo del cultivo de arroz. De acuerdo con los resultados, se estima que la huella hídrica total promedia es de 1.402 m3/t por mes, representada con el 19% de agua verde, 71% de agua azul y 10% de agua gris. Por su parte, los análisis revelan que existe una apropiación alta de agua azul que genera pérdidas económicas en gastos de operación al agricultor y; una baja apropiación de agua verde aprovechada por el cultivo, mientras que los niveles de agua gris son relativamente bajos. Finalmente, se proponen estrategias de respuesta sostenibles que contribuyen a minimizar la huella hídrica del cultivo de arroz promoviendo el uso eficiente de los recursos.

Palabras clave: Alternativas sostenibles, Huella hídrica; eficiencia del agua, riego de arroz, ASOJUNCAL.

ABSTRACT

The water footprint of rice cultivation at the Himalaya farm, a 13.5 ha area within the El Juncal Medium-Scale Land Improvement District – ASOJUNCAL, in the municipality of Palermo (Huila, Colombia), was estimated. The methodology proposed by the Water Footprint Network (WFN) was followed, and the open-source software CROPWAT 8.0 was used to calculate water requirements based on soil data from the area. This allowed for the estimation of the green, blue, and grey water footprints of the rice production cycle. According to the results, the average total water footprint is estimated at 1,402 m³/t per month, comprised of 19% green water, 71% blue water, and 10% grey water. The analyses reveal a high appropriation of blue water, resulting in economic losses for farmers in operating expenses, and a low appropriation of green water utilized by the crop, while gray water levels are relatively low. Finally, sustainable response strategies are proposed to minimize the water footprint of rice cultivation by promoting the efficient use of resources.

Keywords: Sustainable alternatives, Water footprint, Water efficiency, Rice Irrigation, ASOJUNCAL.

INTRODUCCION

El crecimiento desmesurado de la población en los últimos años ha llevado a los seres humanos a ejercer una demanda a escala exponencial sobre los recursos naturales. Según United Nations 2024, se estima que el recurso hídrico demandado a nivel mundial en el sector de la agricultura es de aproximadamente el 70% de toda el agua consumida en el planeta Se prevé que, para el año 2050, la cantidad de agua necesaria para producir los alimentos, fibras y biocombustibles se incrementen hasta en un 60% en países desarrollados y en un 100% o más en los países en vías de desarrollo.
Adicionalmente, el cambio climático está contribuyendo a ocasionar condiciones meteorológicas extremas que privan a millones de personas de la accesibilidad a los recursos básicos para su subsistencia (OMM, 2025). La FAO (2025) revela que el 80% de las personas afectadas son comunidades de bajos recursos, que típicamente viven en áreas rurales y dependen de actividades como agricultura, pesca y silvicultura para su supervivencia.

En el contexto del sector agrícola en Colombia, se estima que la competencia por los recursos naturales aumente en el futuro y que cada vez sea mayor el número de impactos de origen antrópico sobre el agua. Por consiguiente, para fortalecer el sector agrícola es necesario hacer inversiones en proyectos destinados a la mejora en cuanto a gestión del suelo, del agua y de la calidad de las semillas (Banco Mundial, 2022). En otras palabras, si no se adopta una política de conciencia sostenible en la agricultura, no se podrá cumplir el objetivo de una economía eficiente en función de los recursos naturales, ni construir un futuro sostenible (FAO, 2025). Además, se requiere la integración de políticas ambientalmente sostenibles, socialmente equitativas y económicamente eficientes (Hoekstra, Booij y Hunink, 2012). Estas coyunturas conllevarían al desarrollo de metodologías para evaluar la huella hídrica con la finalidad de conocer los impactos que tiene la producción agrícola de bienes en los recursos hídricos (Chapagain y Tickner, 2012).

Según CGIAR (2015), la huella hídrica de un cultivo o de un árbol se refiere al volumen de agua utilizado por el cultivo (m^3/ha) dividido entre su rendimiento (t/ha) y está compuesta por la sumatoria de la huella hídrica verde, azul y gris, y se expresa en m^3/t para este sector. La huella hídrica verde se refiere a las precipitaciones que se almacena en la zona radicular del suelo y se evapora, transpira o se incorpora dentro de un proceso de producción, la huella hídrica azul es un indicador del uso consuntivo del agua superficial o subterránea que se evapora o incorpora en procesos de producción (WFN, 2009), mientras que la huella hídrica gris se define como la cantidad de agua que se requiere para asimilar la carga de contaminantes que se generan en un proceso de producción hasta alcanzar las concentraciones de calidad de agua definidas por la entidad ambiental correspondiente.

En consonancia con lo anterior, la presente investigación estima la huella hídrica del cultivo de arroz en el Distrito de Adecuación de Tierras de Mediana Escala ASOJUNCAL en el municipio de Palermo (Huila), siguiendo la metodología propuesta por la red internacional de la Huella Hídrica (Water Footprint Network, WFN), y se utiliza el *software* de uso libre CROPWAT 8.0 desarrollado por la FAO para calcular los requerimientos de agua verde y azul en función de los datos edáficos del área de estudio, igualmente se estima la huella hídrica gris para la carga contaminante causada por la aplicación del fertilizante nitrógeno (N). Para finalizar, se realiza un análisis de sostenibilidad ambiental, económica y social de la huella hídrica con el fin de proponer estrategias de mejora que

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 87-98. https://doi.org/10.47864/se552025p8798

permitan un manejo sostenible del recurso hídrico.

MATERIALES Y METODOS

Diseño Metodológico

La evaluación de la huella hídrica del cultivo de arroz de la finca Himalaya, se basa en el "*manual para la medición de la huella hídrica"*, una guía de apoyo para la medición los estándares globales, en la que se evidencia cómo calcular las huellas hídricas para cultivos, procesos individuales, consumidores, áreas geográficamente delimitadas, naciones y empresas (Hoekstra et al., 2011), siguiendo cuatro fases: (1) definición de objetivos y alcance, (2) contabilidad de la huella hídrica, (3) análisis de sostenibilidad de la huella hídrica, (4) formulación de respuestas a la huella hídrica.

Fase I: Definición de objetivos y alcance
Esta fase consistió en realizar un diagnóstico e identificación de los diferentes factores que actúan en el cultivo de arroz con dos enfoques; uno de tipo cualitativo, cuya finalidad fue documentar la información base para la investigación, incluyendo los aspectos generales de la zona, localización geográfica, geología e información climatológica; y otra de tipo cuantitativo, donde se reconoció el predio en estudio, identificaron las zonas de protección ambiental, fuentes de abastecimiento y prácticas de cosecha.

Fase II: Contabilidad de la Huella Hídrica
La huella hídrica total de un proceso de cultivo (HHproc) es la suma de los componentes verde, azul y gris (Ecuación 1):

$$HHProc = HHverde + HHazul + HHgris \quad (1)$$

El componente verde en la huella hídrica del proceso de cultivo (HHproc, verde, m^3/t) (Ecuación 2), se calculó como el componente verde del uso de agua del cultivo (CWU_{verde}, m^3/ha) dividido entre el rendimiento del cultivo (Y, t/ha). El componente azul (HHproc azul, m^3/t) (Ecuación 3), se calculó de forma similar (Hoekstra et al., 2011):

$$HHprod, verde = \frac{CWUverde}{Y} \quad (2)$$

$$HHprod, azul = \frac{CWUazul}{Y} \quad (3)$$

Por su parte, el consumo de agua verde del cultivo (CWU verde, m^3/ha) (Ecuación 4), se calculó a partir de la acumulación de la evapotranspiración diaria (ET verde, mm/día) que corresponde al agua proveniente de las precipitaciones durante todo el crecimiento del cultivo (Hoekstra et al., 2011):

$$CWU\ verde = 10x \sum_{d=1}^{lgp} ET\ verde \quad (4)$$

El consumo de agua azul del cultivo (CWU azul, m^3/ha) (Ecuación 5), se calculó a partir de la acumulación de la evapotranspiración diaria (ET azul, mm/día) que corresponde a los requerimientos de riego, los cuales se obtuvieron mediante la diferencia entre las precipitaciones efectivas y la evapotranspiración del cultivo (Hoekstra et al., 2011):

$$CWU\ azul = 10x \sum_{d=1}^{lgp} ET\ azul \quad (5)$$

Para estimar de la evapotranspiración de agua verde y azul fue necesario emplear como herramienta de apoyo el software de uso libre CROPWAT 8.0. desarrollado por la FAO (2010), el cual utiliza el método de Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración de los cultivos (ET), requerimientos de agua y riego con base en datos del clima, del cultivo y del suelo, así:

Clima/ETo: Los datos de temperatura máxima, mínima, humedad relativa, viento y radiación solar.

Precipitación: Precipitación mensual de los últimos 20 años.

Cultivo: Fecha de siembra y cosecha: 15/01/2023 – 13/06/2023; Coeficiente del cultivo (*Kc*) y fases de crecimiento: Inicio (1.05), Medio (1.20), Final (0.90); Etapas de desarrollo del cultivo: Inicio (30) días, Desarrollo (30) días, Medio (60) días, Final (30), Total de días (150) días; Profundidad radicular: 0.45 m; Fracción de agotamiento critico (*p*)*:* 0.20; Factor de respuesta de la productividad del cultivo (*Ky*): 1.0; Altura del cultivo: 1.0 m

Suelo: Humedad del suelo disponible total (*ADT*): 140 mm/metro; Tasa máxima de infiltración: 30 mm/día; Profundidad radicular máxima: 450 cm; Agotamiento inicial de la humedad del suelo (% de *ADT*): 0%.

Los valores requeridos por el *software* CROPWAT 8.0. en los módulos de "clima/ ETo" y "precipitación" se obtuvieron de la estación climatológica El Juncal (21095010) perteneciente al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), los datos del módulo de "cultivo" para los parámetros de coeficiente del cultivo Kc, el agotamiento crítico y el factor de respuesta del rendimiento fueron tomados del estudio de la FAO (2006) riego y drenaje 56, y los parámetros de profundidad radicular, altura del cultivo y etapas de crecimiento se obtuvieron de forma experimental en campo. Posteriormente, los datos del módulo de "suelo", fueron medidos por los autores en la finca Himalaya verificando su textura franco-arenosa.

Finalmente, el componente gris en la huella hídrica del proceso de cultivo (HHproc, gris, m^3/t) (Ecuación 6), se calculó multiplicando la tasa de aplicación de sustancias químicas por hectárea (TA, kg/ha) por la fracción de lixiviación - escorrentía superficial (α) dividido entre la concentración máxima permitida (c_{max}, kg/m^3) menos la concentración natural (c_{nat}, kg/m^3) y posteriormente divido entre el rendimiento del cultivo (Y, t/ha) (Hoekstra et al., 2011).

$$HHprod, gris = \frac{(\alpha * TA) / (cmax - cnat)}{Y} \qquad (6)$$

Para el cálculo de la huella hídrica gris solo se utilizó como referente de análisis la contaminación del agua por causa de aplicación del fertilizante nitrógeno (N), por ser el contaminante más crítico en estos agrosistemas. Según los parámetros de la FAO (2004) respecto a los niveles de la calidad de agua para riego, la concentración máxima permisible de N es de 30 mg/litro y su tasa de lixiviación es del 10% del total aplicado (Hoekstra y Chapagain, 2008). La concentración natural de N fue tomada en campo y analizada en un laboratorio acreditado de la región, aportando un promedio de 6 mg/ litro de N en cuatro (4) abonadas y una tasa de aplicación de 16.9 kg/ha de N suministrados mediante un plan de fertilización en el ciclo de producción del cultivo.

Fase III: Análisis de Sostenibilidad de la Huella Hídrica.

En el ámbito de una unidad hidrológica, es posible comparar la huella hídrica verde o azul con la disponibilidad de agua verde o azul, o la huella hídrica gris con la capacidad disponible de asimilación de cargas contaminantes; se analizó la perspectiva ambiental, social y económica de la huella hídrica entorno a las áreas de conservación y protección ambiental de la represa La Sucia y el Distrito Asojuncal.

Análisis de Sostenibilidad Ambiental

La sostenibilidad de la huella hídrica verde se evaluó a través del índice de escasez de agua verde (EA_{verde}) (Ecuación 7), definida como la proporción total de la huella hídrica verde en la zona de captación (HH_{verde}) y la disponibilidad de agua verde (DA_{verde}):

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 87-98. https://doi.org/10.47864/se552025p8798

$$\mathrm{E}Averde[x,t] = \frac{HH\ verde\ [x,t]}{DAverde\ [x,t]} \quad (7)$$

Donde, la disponibilidad de agua verde (DA_{verde}) (Ecuación 8), en una zona de captación x en un periodo determinado t, se determinó como la evapotranspiración total del agua lluvia almacenada en el suelo (ET_{verde}), menos la evapotranspiración natural ($ET_{natural}$), menos la evapotranspiración de las zonas improductivas (ET_{inprod}):

$$DAverde = ETverde - ETnat - ETinpr \quad (8)$$

La sostenibilidad de la huella hídrica azul se evaluó a través del índice de escasez de agua azul (EA_{azul}) (Ecuación 9), definida como la relación entre el total de la huella hídrica azul en la zona de captación (HH_{azul}) y la disponibilidad de agua azul (DA_{azul}):

$$EAazul[x,t] = \frac{HHazul[x,t]}{DAazul[x,t]} \quad (9)$$

Donde, la disponibilidad de agua azul (DA_{azul}) (Ecuación 10), en una zona de captación x en un periodo determinado t, se determinó en función de la oferta natural (E_{nat}), menos la oferta regulada (E_{reg}):

$$DAazul[x,t] = Enat[x,t] - Ereg[x,\ t] \quad (10)$$

Las ofertas de agua natural y agua regulada, se determinaron mediante aforos *in situ*, correspondientes al caudal antes de la extracción del recurso hídrico, es decir al caudal ofertado y el caudal extraído de la fuente de captación durante el ciclo biológico según las necesidades de riego del cultivo, mediante un cronograma de riego, el cual fue registrado en la programación de riego en el *software* CROPWAT 8.0.

Finalmente, la sostenibilidad de la huella hídrica gris se evaluó a través del nivel de contaminación de agua (NCA) (Ecuación 11), definido como la porción de la capacidad de asimilación de la carga contaminante N, tomando la relación entre el total de la huella hídrica gris (HH_{gris}) y la escorrentía (E_{real}).

$$NCA[x,t] = \frac{HHgris[x,t]}{Ereal[x,t]} \quad (11)$$

En resumen, los indicadores de escasez de agua verde y azul y el nivel de contaminación se han definido de manera que cuando sobrepasen el 100%, se reflejan condiciones insostenibles e indican un punto crítico ambiental. Un punto crítico ambiental se define como el periodo de tiempo en una zona de captación en las que se violan las necesidades ambientales de agua verde o azul o las normas de calidad del agua (Hoekstra et al., 2011).

Análisis de Sostenibilidad Económico

Según Salmoral et al. (2011) plantea que se debe estimar el valor de producción a precios de mercado por m^3 de agua consumida, ya que esto manifiesta la capacidad de generación de ingresos en relación con el consumo de agua; además que considera como un factor dinámico que evoluciona en el tiempo (Arévalo y Campuzano, 2013). La productividad aparente del agua azul (APW azul, $/m^3) (Ecuación 12), se estimó dividiendo el precio de producción del cultivo en el mercado sobre la huella hídrica azul:

$$APW,\ \ azul = \frac{precio\ \ produccion\ \ \ cultivo}{HH\ \ azul\ \ cultivo} \quad (12)$$

Además, se calculó la productividad aparente de la tierra (APL, $/ha) (Ecuación 13), misma que representa el valor económico a precios constantes en función de las hectáreas cultivadas, para lo cual se estima el precio de la producción del cultivo en el mercado por el rendimiento del cultivo:

$$APL = Precio\ \ produ.cultivo * rendim. \quad (13)$$

La huella hídrica total en una zona de captación es económicamente insostenible

y, por consiguiente, genera un punto crítico económico, cuando el agua no se asigna y se usa de manera económicamente eficiente. Es necesario asignar el agua en una zona de captación de manera económicamente eficiente a los usuarios, y por su parte, usar dicha agua de manera eficiente (Hoekstra et al., 2011).

Análisis de Sostenibilidad Social

Las necesidades humanas básicas relacionadas con la equidad del agua incluyen una cantidad mínima de suministro seguro y limpio de agua dulce para beber, lavar y cocinar (ONU, 2010), esta etapa se fundamenta principalmente en la búsqueda de una sostenibilidad integral del ser humano y en mejorar la calidad de vida de las personas que intervienen en la actividad agrícola. se incluyen criterios propios de evaluación tales como la protección de la salud física y mental de los trabajadores, el trato justo, la provisión de los servicios públicos básicos esenciales (agua potable, saneamiento básico, energía y gas), afectaciones al ecosistema y conflictos como producto de la apropiación del agua.

Fase IV: Formulación de Respuesta a la Huella Hídrica

Describe el proceso de construcción gradual y colectiva de las acciones necesarias para aportar a la solución de las problemáticas críticas identificadas en la investigación y que fueron el resultado de la evaluación de la huella hídrica del cultivo del arroz. Se establecieron estrategias de respuesta enfocadas principalmente al aumento en la eficiencia del recurso hídrico disponible y también al aumento de la equidad y productividad económica, con el ánimo de formular lineamientos, tomando como referente las propuestas de la política nacional para la gestión integral del recurso natural.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fase I: Definición de objetivos y alcance

El área objetivo corresponde a la finca Himalaya, ubicada a 15 km de la ciudad de Neiva, en cercanías a la represa La Sucia y al Distrito de riego Asojuncal, municipio de Palermo, Huila. Tiene una extensión de 13.75 ha destinadas al cultivo de arroz *Oryza Sativa*, se caracteriza por tener un clima cálido seco y una formación vegetal o zona de vida según Holdridge bosque seco tropical (bsT) apto para el cultivo del cereal utilizando como principal fuente de abastecimiento el río Magdalena (Figura 1) (Asociación de Usuarios del Distrito de Adecuación de Tierras de Mediana Escala El Juncal - ASOJUNCAL, 2018).

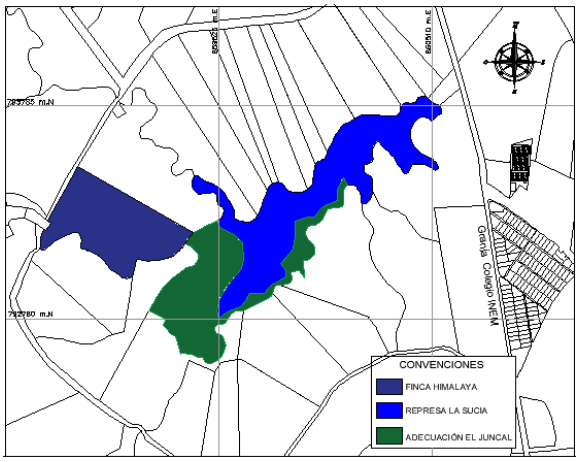


Figura 1. Localización Finca Himalaya.

Según el Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Palermo (EOT), el área de estudio se halla a 460 m.s.n.m., su precipitación anual promedio es de 1490 mm con distribución bimodal, los máximos valores se presentan en los meses de noviembre y marzo, y los mínimos en los meses de agosto y enero. La temperatura media tiene valores máximos promedios mensuales de 27.5 °C, siendo el mes de agosto el más cálido; y con un alto número de horas luz de incidencia directa sobre la región; el mes de noviembre tiene la temperatura promedio más baja del año (Municipio de Palermo, 2000).

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 87-98. https://doi.org/10.47864/se552025p8798

Las condiciones geodésicas del terreno, modelada a través del uso del *software* libre QGIS, determinan una topografía ligeramente ondulada, con pendientes que oscila entre 3 y 7 % (Figura 2); esto dificulta las condiciones para mantener el agua de riego en la superficie del cultivo afectando el cultivo por estrés hídrico.

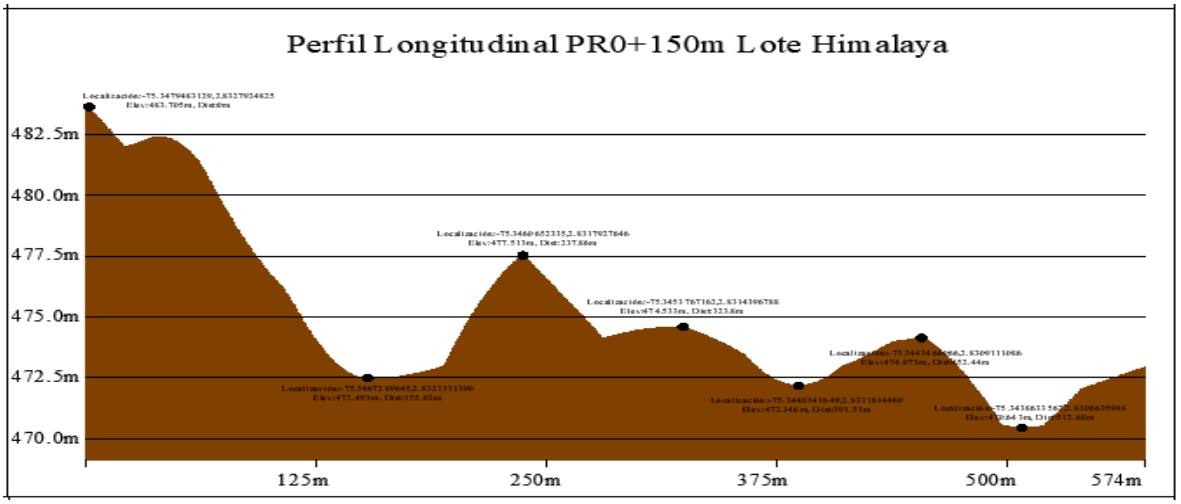


Figura 2. Topografía general PR0+150m, longitudinal.

Es a través de caballones de nivelación que se controla el agua de riego, logrando de esta manera asegurar la lámina de agua requerida para el desarrollo óptimo del cultivo de arroz. Sin embargo, el volumen de agua desperdiciada durante el ciclo productivo es bastante elevado y esto acarrea gastos adicionales y posible insostenibilidad económica.

Fase II: Contabilidad de la huella hídrica.

A continuación, se presentan los resultados promedios mensuales de la huella hídrica total del cultivo de arroz de la finca correspondiente a la sumatoria de los componentes verde, azul y gris (tabla 2).

Tabla 2. Huella Hídrica del cultivo de arroz *Oryza Sativa*

Huella Hídrica	(m^3/t)			
	HH Verde	HH Azul	HH Gris	HH Total
Cultivo arroz	260.8	994.4	146.5	1401.7

La huella hídrica estimada en el cultivo de arroz es de 1401.7 m^3/t por mes; producto de las huellas hídricas verde, correspondiente al 19%, azul con 71%, y gris con 10%, un valor inferior al establecido por Silva (2015), quien encontró 1974 m^3/t, y superior al de Ramírez et al. (2017), quienes estimaron 1039 m^3/t. así mismo, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural en el sector arrocero del Tolima (2016) con un sistema de producción similar, reportó un promedio de huella hídrica total de 1069 m^3/t, y a nivel mundial de 1146 m^3/t, valores inferiores a los del presente estudio.

Según Chapagain y Hoekstra (2011), la composición hídrica total a nivel nacional del cultivo de arroz está representada por el 44% verde, 49% azul y 7% gris, valores diferentes a los estimados en el cultivo de arroz de la finca Himalaya. Se puede evidenciar, una baja apropiación de agua verde en el cultivo y, por el contrario, una alta apropiación de agua azul, lo que indica un desbalance en apropiación de las huellas hídricas verde y azul.

Los resultados de la huella hídrica gris del presente estudio son similares a los obtenidos por Builes (2013) para la cuenca del río Porce, quien determinó que la fuente hídrica contaba con la capacidad de diluir las cargas contaminantes aportadas por los productos utilizados en las actividades agrícolas y pecuarias con valores del 8%.

Fase III: Evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica.

Análisis de Sostenibilidad Ambiental

El índice de escasez de agua verde (Everde, ciclo) (Tabla 3), muestra un valor de 0.24, lo que indica un estado de sostenibilidad media-baja con respecto a la disponibilidad de agua verde para satisfacer las necesidades de agua verde causadas por la actividad agrícola, así como de las áreas de reserva natural, áreas protegidas y de conservación, con el fin de preservar la biodiversidad y los ecosistemas del lugar.

El índice de escasez de agua azul (Tabla 3), muestra un valor de 0.74, lo que indica un estado de sostenibilidad alto en el cultivo de arroz de la finca con respecto a la disponibilidad de agua azul de riego, y que se ejerce una gran presión sobre el recurso hídrico para satisfacer las necesidades propias del cultivo de arroz.

El resultado obtenido para el nivel de contaminación del agua (NCA) de la finca Himalaya es de 0.14, e indica que aún el afluente tiene capacidad para asimilar el contaminante analizado de N (Tabla 4).

Tabla 3. Índice de Escasez de Agua verde (Everde) y Agua azul (Eazul).

Mes	Dav	Vav	HH Verde	Ever	Dazul	HH Azul	Eazul
	mm	m^3/ha	t/m^3	[-]	l/s	m^3/mes	[-]
Mensual	106.84	1068.4	260.8	0.24	123,070	90738.4	0.74

Tabla 4. Índice de Contaminación del Agua (NCA)

HH Gris (m^3/t)	Escorrentía (Rreal) mm	Índice de Contaminación del Agua (NCA)
146.5	989.8	0.14

No obstante, estos resultados por sí solos no reflejan el estado de la calidad del agua, pues en este estudio únicamente se tiene en cuenta uno de los contaminantes asociados al sector agrícola. Sin embargo, en el distrito de riego se desarrollan actividades pecuarias de ganadería, piscicultura, entre otros, que generan contaminantes adicionales al N que pueden traer afectaciones en la calidad del agua y la atmosfera.

Análisis de Sostenibilidad Económico

Para estimar la productividad aparente del agua (APW, $/$m^3$), se tuvo en cuenta el precio de arroz paddy establecido por Fedearroz para el mes de junio de 2022 correspondiente a la temporada de cosecha, cotizándose en un valor de $ 1.330.000 pesos por tonelada. De esta manera, se tiene un costo de $ 1337 pesos por cada m^3 de agua azul consumida por el cultivo de arroz, un valor productivo, bastante elevado comparado con el valor por m^3 pagado al distrito de riego ASOJUNCAL por los servicios prestados de agua para riego de $ 76 pesos por m^3 de agua captada de la fuente superficial del rio Magdalena (Tabla 5). Así mismo, se estableció que la productividad aparente de la tierra (ALP, $/ha), es de $

Suelos Ecuatoriales 55 (1 y 2): 87-98. https://doi.org/10.47864/se552025p8798

8.778.000 por hectárea cultivada, un valor similar a los gastos de operación requeridos por hectárea para cultivar arroz *Oryza sativa* en la zona del distrito (Tabla 5).

Tabla 5. Productividad aparente del agua azul (APW) y productividad aparente de la tierra (APL).

Costo arroz	HH azul	APW	Rendim.	APL
$/t	m^3/t	$/$m^3$	t/ha	$/ha
1.330.000	994.4	1,337	6.6	8.778.000

Aunque la productividad aparente de la tierra (APL, $/ha) no reporta directamente información sobre el uso de los recursos hídricos, complementa el análisis de sostenibilidad, puesto que los cambios producidos en él vienen motivados por las respuestas que adoptan los productores en relación con una serie de variables sobre las que pueden incidir y que afectan directamente a la producción y a sus resultados económicos (cambios de cultivos, mejoras tecnológicas, agua disponible para uso) y también a distintos condicionantes externos sobre los que no pueden actuar, pero que también modifican sus resultados económicos y producciones (subvenciones recibidas y las restricciones que estas acarrean, evolución de los precios de los cultivos y las disponibilidades hídricas) (Gómez-Limón *et al.,* 2009).

Análisis de Sostenibilidad Social

Según datos estimados en el Esquema de Ordenamiento Territorial de Palermo (Huila), la comunidad de agricultores en la zona cuenta con una cobertura total de los servicios públicos de gas suministrado por la empresa Alcanos de Colombia, agua potable suministrada por la junta administradora de acueducto y los servicios de energía son suministrados por la empresa Electrohuila (Municipio de Palermo, 2000).

Respecto a la cobertura de la salud, el agricultor y su núcleo familiar se hallan afiliados al sistema de identificación de potenciales beneficiarios Sisbén, pertenecientes al grupo A, dirigido a la población de pobreza extrema. El sistema de saneamiento básico, se realiza mediante pozos sépticos los cuales se encuentran colmatados debido a la falta de mantenimiento. Por otro lado, no se evidencia un adecuado plan de manejo de los residuos sólidos producto del cultivo.

Fase IV: Formulación de respuesta.

Se propone realizar seis (6) programas de carácter ambiental, económico y social que tiene como finalidad estabilizar la huella hídrica verde y reducir las huellas hídricas azul y gris, así como concientizar a los agricultores que pertenecen al distrito de riego sobre la protección de los recursos hídricos, mediante los siguientes programas de capacitación:

1. **Rotación y técnicas de cultivo de arroz en cada estación del año.**

Capacitaciones sobre tecnificación de la tierra y rotación de cultivos cuyo propósito es optimizar el uso del agua, se mejoren las condiciones físicas y químicas de los suelos con alternativas en la producción de cultivos con potencial de forraje en época seca, como maíz, sorgo forrajero y soja, y el uso de energías sostenibles como eólica, solar y tecnologías de sostenibilidad y responsabilidad social.

2. **Riego de cultivos de arroz proporcionado por CROPWAT 8.0.**

Capacitaciones sobre uso de herramientas ofimáticas y sistemas de información geográfica, cuyo propósito es aprender a interpretar los parámetros meteorológicos y los requerimientos de agua, con el fin de

estimar la huella hídrica en sus cultivos, estableciendo sistemas sostenibles de riego y reducción en los costos por suministro de agua.

3. **Prácticas de abono y control de plagas.**

Capacitaciones sobre elaboración de abonos orgánico - minerales, biocontroladores de patógenos, productos alelopáticos, repelentes de origen orgánico – mineral, uso de elementos de protección personal, manejo de plaguicidas y fertilizantes con el fin de reducir las cargas contaminantes y los efectos nocivos a la salud de los agricultores.

4. **Mantenimiento de infraestructura para riego y drenaje.**

Capacitaciones sobre el mantenimiento y limpieza de las obras hidráulicas, como redes, canales y accesorios, con el fin de controlar daños, fugas, prevención de accidentes, para reducción en costos de combustible y reducción en gastos de operabilidad.

5. **Manejo de desechos peligrosos.**

Capacitaciones sobre clasificación y manejo de residuos peligrosos y disposición final, con el fin de reciclar, reducir plagas y afectaciones a la salud de los agricultores.

6. **Cuidado y conservación del medio ambiente.**

Capacitaciones sobre conservación y protección de bosques, fuentes hídricas, flora y fauna, identificando zonas de sostenibilidad ambiental, delimitación de senderos ecológicos y cuerpos de agua hídricos destinados a la conservación y protección de los recursos naturales renovables.

CONCLUSIONES

Se estimó que la huella hídrica mensual del cultivo de arroz *Oryza sativa* con un ciclo fenológico de 150 días, es de 1.402 m^3/t; constituyendo el mayor componente la huella azul con 71%, seguido del componente verde con 19% y, finalmente el componente gris con 10%.

En el ciclo productivo del cultivo de arroz se ocasionan pérdidas de agua de riego del 33%, lo cual genera pérdidas económicas en gastos de combustible, aceite y agua para riego, además de degastes en el motor y contaminación atmosférica, producto de su operación.

Para el óptimo manejo del recurso hídrico es necesaria la adecuada nivelación del terreno para garantizar la eficiencia del agua; si bien es una inversión considerable, el beneficio es muy grande, ya que no solo se reduce el consumo de agua en el cultivo, sino que también facilita el control de las malezas, insectos y en general las enfermedades propias del arroz.

REFERENCIAS

Anacona, P. y Rojas, F. (1999). *Clasificación de los suelos de la granja "La Universidad" con fines de riego y drenaje* [Tesis de grado]. Programa de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana. Neiva.

Arévalo, D. U. y Campuzano, C. O. (2013). *Evaluación de la huella hídrica en la cuenca del Río Porce.* Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA.

ASOJUNCAL (2018). Asociación de Usuarios del Distrito de Adecuación de Tierras de Mediana Escala El Juncal - *Localización*. https://www.asojuncal.com/localizacion

Banco Mundial (2022). *El agua en la agricultura.* https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture

Builes, E. D. (2013). *Cuantificación y análisi de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca*

del río Porce [Tesis de Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo]. Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia. Medellín.

CGIAR (2015). Programa de Investigación en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria - CCAFS. *¿Qué es la huella hídrica y cuál es su importancia en la agricultura?* Iagua. https://www.iagua.es/noticias/colombia/ccafs/15/12/10/que-es-huella-hidrica-y-cual-es-importancia-agricultura.

FAO (2004). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, *El arroz y el agua: una larga historia matizada.* https://www.fao.org/3/y4875s/y4875s00.pdf

FAO (2006). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación -. *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.* Manual 56.

FAO (2019). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *Agriculture and climate change: challenges and opportunities at the global and local level, collaboration on climate-smart agriculture*. ISBN 978-92-5-131281-0

FAO (2025). Informe mundial sobre las crisis alimentarias de 2025. https://www.fao.org/director-general/speeches/details/launch-of-the-2025-global-report-on-food-crises--statement/es

Chapagain, A. y Tickner, D. (2012). Water footprint: help or hindrance?. *Water Alternatives 5*(3), 563-581. https://www.water-alternatives.org/index.php/all-abs/186-a5-3-2/file

Gómez-Limón, J., Calatrava, J., Garrido, A., Sáez, F. y Xabadia, A. (Eds.). (2009). *La economía del agua de riego en España: una perspectiva regional.* Fundación Cajamar. ISBN:978-84-95531-45-2

Guauque, D. E., y Barreto, L. E. (2017). *Evaluación del impacto ambiental de los sistemas predominantes de producción agropecuaria en la microcuenca La Plata* [Tesis de grado]. Universidad del Tolima. Ibagué. https://repository.ut.edu.co/handle/001/2365

Hoekstra A. Y., Chapagain A. K., Aldaya, M. y Mekonnen, M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard.* Water Footprint Network. Earthscan. ISBN: 978-1-84971-279-8 hardback

Hoekstra, A. y Chapagain, A. (Eds.) (2008). *Globalization of water. sharing the planet's freshwater resources.* Blackwell Publishing Ltd. Print ISBN:978-1-4051-6335-4. Online ISBN:9780470696224. DOI:10.1002/9780470696224

Hoekstra, A. Y., Booij, M. J. y Hunink J.C. (2012). *Blue water footprint of agriculture, industry, households and water management in the Netherlands*. UNESCO, IHE. DOI:10.13140/RG.2.1.2276.3043

Lozano, D. y Cortés, N. (2016). *Evaluación de la huella hídrica del proceso productivo del arroz (Oryza sativa) en el municipio del Espinal – Tolima y su incidencia ambiental en el área de influencia* [Tesis de pregrado]. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad de la Salle.

Municipio de Palermo. (2000). *Esquema de Ordenamiento Territorial Palermo Huila 2000: EOT Palermo Huila 2000*.

OMM (2025). Informe de la Organización Meteorológica Mundial. La espiral de consecuencias de los eventos meteorológicos y climáticos. https://wmo.int/es/news/media-centre/

ONU (2010). Organización de las Naciones Unidas. "The human right to water and sanitation", UN General Assembly, 64th session, Agenda item 48, UN, New York, NY.

Unesco (2012). Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia. y la Cultura - *Educación para el desarrollo sostenible. Libro de consulta.* Instrumentos de aprendizaje y formación N°. 4. Unesco. ISBN 978-92-3-001077-5

Ramírez, L., Vilches, R., Lizano, R., Pinzón, I. y Sandoval, E. (2017). Estimación de la huella hídrica y de carbono en los cultivos comunitarios de quínoa (*Chenopodium Quinoa Wild*) correspondientes a la zona central de los andes ecuatorianos. *Anales Científicos, 78*(2), 173. ISSN 0255-0407 (Versión impresa). DOI: http://dx.doi.org/10.21704/ac.v78i2.1054

Salmoral, G.; Dumont, A.; Aldaya, M.M.; Rodríguez-Casado, R.; Garrido, A.; Llamas, M.R. (2011). Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir. *Papeles de seguridad hídrica y alimentaria y cuidado de la naturaleza. Número 1*. Fundación Marcelino Botín, Pedrueca 1, Santander, España. ISBN: 978-84-96655-94-2

Silva, A. (2015). *Gestión hídrica y metabolismo hídrico en la producción agrícola ecuatoriana: análisis de la huella hídrica en el año 2010.* Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

United Nations, 2024. World Population Prospects, Summary of Results. Department of Economy and Social Affairs, 64p. New York.

Water Footprint Network. (2009). *What is a water footprint assessment?.* https://waterfootprint.org/en/water-footprint/what-is-water-footprint/