

Estado del arte de la huella hídrica agrícola en Colombia

State of the Art of Agricultural Water Footprint in Colombia

Andrés Felipe Góngora-Duarte¹   Juan Manuel Trujillo-González² 

¹Ingeniero Agroindustrial, Maestría en Gestión Ambiental Sostenible, Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad de los Llanos Universidad de los Llanos Campus Barcelona, Villavicencio Colombia.

²Instituto de Ciencias Ambientales de la Orinoquia Colombiana ICAOC, Universidad de los Llanos Campus Barcelona, Villavicencio Colombia.

Resumen

Introducción: La huella hídrica es una métrica ambiental que cuantifica el volumen total de agua utilizado en la producción de bienes o servicios. En la agricultura, esta se mide en m³ por tonelada de producto (m³/ton) y se divide en tres componentes: verde (agua de lluvia), azul (agua superficial o subterránea) y gris (agua contaminada). Esta métrica permite evaluar la eficiencia hídrica de los cultivos.

Objetivos: Este estudio tuvo como objetivo examinar el uso del agua en la agricultura colombiana mediante una revisión sistemática, enfocándose en la gestión del recurso hídrico y su utilidad para orientar decisiones sobre la ubicación óptima de cultivos según sus necesidades de agua.

Materiales y métodos: Se realizó una revisión sistemática de 37 estudios científicos sobre huella hídrica agrícola en Colombia, que en conjunto cubren 44 cultivos distribuidos en diferentes regiones del país. Se analizaron los valores reportados de huella hídrica por cultivo y su distribución entre los tres componentes mencionados.

Resultados: Los cultivos más estudiados fueron: hortalizas (20%), café y cacao (19%), frutales (17%), flores (12%), cereales (10%) y otros (22%). En promedio, el 72% del agua utilizada corresponde al componente verde, el 15% al azul y el 13% al gris, lo que indica una alta dependencia del agua de lluvia en la agricultura nacional.

Conclusiones: Los resultados destacan la necesidad de una planificación hídrica basada en evidencia, que permita mejorar la eficiencia del uso del agua en el sector agrícola colombiano, contribuyendo así a su sostenibilidad.

Palabras clave: Huella Hídrica, Agricultura, Agua Virtual, Sostenibilidad, Recurso Hídrico, Demanda hídrica.

Abstract

Introduction: The water footprint is an environmental metric that quantifies the total volume of water used in the production of goods or services. In agriculture, it is measured in cubic meters per ton of product (m³/ton) and comprises three components: green (rainwater), blue (surface or groundwater), and grey (polluted water). This metric helps assess the water-use efficiency of crops.

Objectives: This study aimed to examine water use in Colombian agriculture through a systematic review, focusing on water resource management and its relevance for guiding decisions on the optimal geographic distribution of crops based on their water requirements.

Materials and Methods: A systematic review was conducted, analyzing 37 scientific studies on agricultural water footprints in Colombia, covering a total of 44 crops across various production regions. Reported values for the water footprint per crop were examined, along with the proportional distribution of green, blue, and grey water components.

Results: The most frequently studied crops were vegetables (20%), coffee and cocoa (19%), fruits (17%), flowers (12%), cereals (10%), and others (22%). On average, 72% of the total water use corresponded to green water, 15% to blue water, and 13% to grey water, indicating a high reliance on rainwater in Colombian agriculture.

Conclusions: The findings underscore the importance of evidence-based water planning to enhance water-use efficiency in Colombia's agricultural sector, thereby supporting sustainable production and improved resource management.

Keywords: Water Footprint, Agriculture, virtual water, sustainability, water resources.

¿Cómo citar?

Góngora-Duarte AF, Trujillo-González J M. Estado del arte de la huella hídrica agrícola en Colombia. Ingeniería y Competitividad, 2025, 27;(2):e-30213470

<https://doi.org/10.25100/iyv.v27i2.14581>

Recibido: 17-11-24

Evaluado: 4-12-24

Aceptado: 24-02-25

Online: 23-04-25

Correspondencia

andres.gongora@unillanos.edu.co



CrossMark



Contribución a la literatura

¿Por qué se realizó?

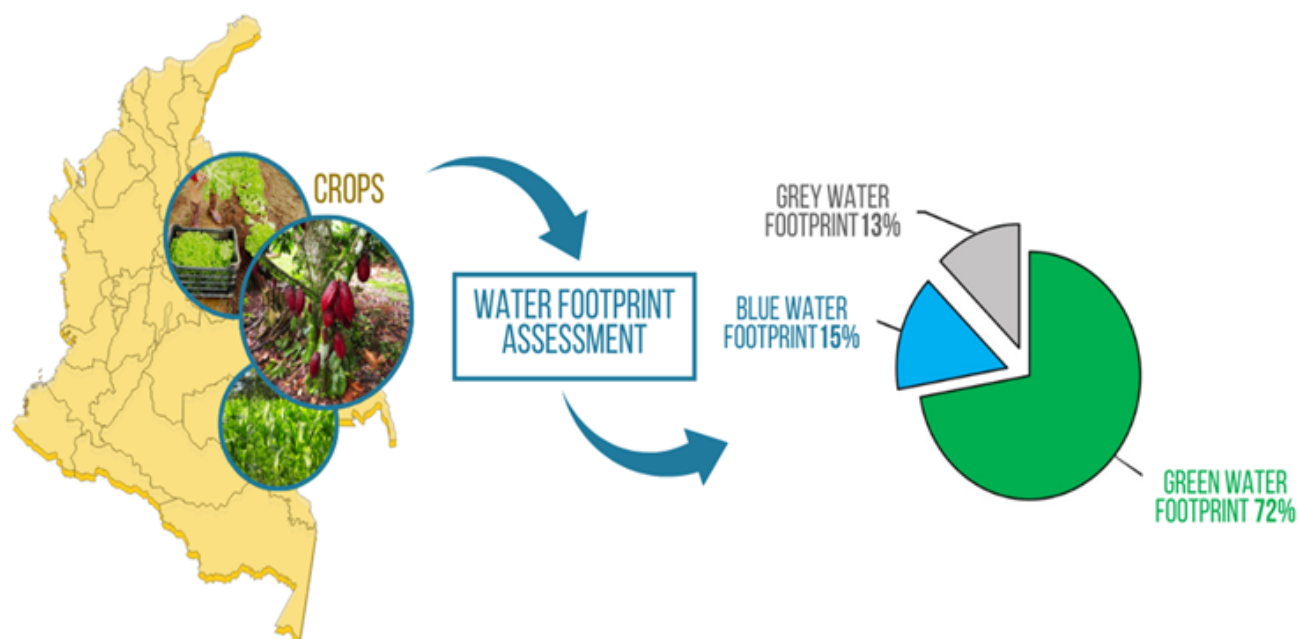
El objetivo principal de esta investigación fue identificar los estudios más importantes sobre la Huella Hídrica Agrícola en el contexto colombiano. Para ello, se realizó un análisis exhaustivo para evaluar las necesidades hídricas de la producción agrícola, considerando diversos cultivos y sus respectivos métodos de producción. También se comparó la distribución de la Huella Hídrica Agrícola, los componentes evaluados y la huella hídrica en diferentes regiones.

¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

La huella hídrica verde, que incluye el agua de precipitación absorbida directamente por los cultivos, representa la mayor parte de la huella hídrica agrícola del país, según los hallazgos más importantes del estudio. La huella hídrica azul representa el agua de riego y la huella hídrica gris es la última. Cabe mencionar que no todos los documentos incorporan los tres aspectos de la huella hídrica. Por ejemplo, algunos pueden hacer referencia a los fertilizantes químicos utilizados en la agricultura orgánica. Dado que la mayoría de los cultivos del país dependen del agua de lluvia para satisfacer sus necesidades hídricas, estos hallazgos sugieren que, en general, existe poca competencia por los recursos hídricos. Sin embargo, esto puede provocar que los ecosistemas y otras actividades productivas compitan con los seres humanos por los recursos hídricos.

¿Qué aportan estos resultados?

Estos hallazgos arrojan luz sobre el estado actual de la huella hídrica agrícola de Colombia al comparar las necesidades hídricas de diversos productos agrícolas. En este estudio, se recopilan datos sobre el consumo de agua de los cultivos para su uso en la planificación agrícola, un documento importante para quienes toman decisiones sobre los sistemas de producción agrícola y la gestión de los recursos hídricos. Finalmente, estos datos inspiran más estudios en campos donde existe escasez de información sobre la huella hídrica agrícola.



Introducción

El agua es un recurso natural crucial para la subsistencia y el desarrollo de la sociedad, que sirve de base para el progreso humano, el medio ambiente natural y la economía (1,2). Además, los recursos hídricos son esenciales para la agricultura y la calidad de vida en las comunidades rurales (3). Se estima que el consumo de agua ha aumentado al doble de la tasa de crecimiento de la población, lo que ha provocado que varias regiones experimenten estrés hídrico. Para 2050, se proyecta que el 52% de la población mundial vivirá en regiones con estrés hídrico (4). La gestión sostenible de los recursos hídricos y la garantía de la seguridad alimentaria son esenciales para el avance de la sociedad humana (5). Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) incorporan metas relativas a los recursos hídricos, específicamente en el ODS 6 “Agua limpia y saneamiento” y el ODS 12 “Producción y consumo sostenibles” (6,7,8). Estos objetivos reconocen la importancia de abordar el creciente problema de la escasez de agua, junto con la creciente demanda y la presión sobre los recursos hídricos (9, 10).

Las actividades humanas requieren recursos hídricos sustanciales para el desarrollo, y la agricultura representa la mayor parte del uso con un 91%, seguida del consumo industrial y doméstico con un 5% y un 4%, respectivamente (11,12). El crecimiento demográfico y económico está llevando los recursos hídricos a límites insostenibles, exacerbados por el uso irracional, la degradación ecológica y el cambio climático (13,14). A escala mundial, la disponibilidad de agua dulce es problemática debido a la sobreexplotación, lo que da lugar a problemas ambientales (15). En los últimos años se ha visto un aumento en el impacto de las actividades humanas en los recursos naturales, lo que ha llevado a un enfoque en el uso de indicadores ambientales para cuantificar estos efectos. El objetivo es mitigar estos impactos e implementar una gestión integral de los recursos naturales.

Hoekstra y Hung (16) desarrollaron una metodología conocida como huella hídrica para cuantificar y analizar el consumo de agua, con el objetivo de comprender el uso del agua en las actividades productivas humanas y evaluar la presión sobre los recursos hídricos. La huella hídrica sirve como indicador que evalúa el impacto de las actividades humanas en los recursos de agua dulce (16). El modelo de huella hídrica abarca tanto el consumo directo de los individuos como la utilización indirecta de los recursos hídricos (17). La huella hídrica consta de tres componentes: verde, azul y gris. La verde representa la precipitación efectiva utilizada por los cultivos; la azul se refiere a los recursos hídricos superficiales y subterráneos utilizados durante la producción; y la gris indica el agua dulce necesaria para diluir las cargas contaminantes a fin de alcanzar concentraciones de fondo naturales y cumplir con las regulaciones ambientales (11).

Este término denota el volumen de agua utilizado en la producción de un bien o servicio, que abarca toda la cadena de suministro (16). Este indicador es esencial para avanzar en la gestión sostenible de los recursos hídricos, especialmente en el sector agrícola (18). La huella hídrica sirve como un indicador multidimensional que refleja el volumen de agua consumido por fuente y el volumen afectado por la contaminación, categorizado por tipo. Los componentes del consumo de agua se delinean tanto en contextos geográficos como temporales (11). Esto sirve como métrica tanto para el volumen de consumo como para los niveles de contaminación del agua. La huella hídrica no se correlaciona con la gravedad de los impactos ambientales locales resultantes del consumo de agua (19,11).

Numerosos estudios han examinado la huella hídrica de los cultivos agrícolas para evaluar el consumo de agua asociado con los principales cultivos en varias regiones (20,21,22). El concepto y su aplicación se han utilizado para proporcionar información pertinente sobre la utilización sostenible de los recursos hídricos en la producción agrícola (18). La metodología utilizada dentro de los marcos agrícolas generalmente evalúa la huella hídrica verde y azul. En ciertas regiones de América Latina, los autores indican que se utiliza predominantemente agua verde para el desarrollo de cultivos (23), que es el componente más importante para el crecimiento agrícola. La huella hídrica verde tiene el mayor volumen en relación con los otros tipos de huellas. A diferencia de otros factores, no siempre hay un impulso para minimizarlo, ya que no crea una competencia directa por los recursos hídricos. No obstante, sugiere una competencia por el uso territorial, como lo demuestra la expansión de la frontera agrícola (24). La huella hídrica de los cultivos generalmente se cuantifica como rendimiento por unidad de volumen, expresado en metros cúbicos por tonelada (m^3 / tonelada) o litros por kilogramo (L / kg). La huella hídrica de los cultivos agrícolas se define como el volumen total de agua dulce utilizada, tanto directa como indirectamente, para producir un producto. Esto incluye el consumo de agua y la contaminación asociada a cada etapa de la cadena de producción (11).

La huella hídrica sirve como indicador de la presión ejercida sobre los recursos hídricos, cuantificada en términos de volumen de agua en función de su uso. Esto requiere la implementación de instrumentos que faciliten la toma de decisiones para la gestión integral de los recursos hídricos, considerando el involucramiento de las partes interesadas y las instituciones (25). Este estudio de revisión tiene como objetivo analizar el concepto de Huella Hídrica en lo que respecta a los cultivos agrícolas, específicamente dentro del contexto colombiano, con el siguiente objetivo: revisar el estado del arte de la huella hídrica agrícola en Colombia, contrastándola en varios sistemas de cultivos. Este enfoque tiene como objetivo generar una herramienta integral para la planificación agrícola, ofreciendo información valiosa sobre el uso sostenible del agua en diferentes sistemas de producción.

Materiales y métodos

Recolección de datos

Los datos de revisión de la literatura se obtuvieron de las bases de datos Scopus, Google Scholar y Springer Open. Se adoptó un enfoque para realizar la revisión de la huella hídrica en los cultivos agrícolas. Se delineó el alcance de la revisión, concentrándose en la evaluación sistemática de la huella hídrica en varios cultivos. Las palabras clave empleadas fueron: "Huella hídrica" Y "Agricultura" Y "Cultivos" Y "Uso del agua". Se seleccionaron artículos en inglés y español, publicados entre 2003 y 2024.

La fase posterior de la revisión se concentró en la huella hídrica de los cultivos agrícolas en Colombia. Se realizaron búsquedas exhaustivas en bases de datos como Scopus, Web of Science y Google Scholar, utilizando palabras clave como: "Huella hídrica", "Agricultura", "Sostenibilidad" y "Cultivos agrícolas". Las referencias incluyeron artículos científicos, tesis de pregrado e informes publicados en la última década en inglés y español, concentrándose en la aplicación de la huella hídrica en cultivos agrícolas en Colombia. Usando Microsoft Excel, los datos de cada publicación

se recopilaron metódicamente y se organizaron minuciosamente, lo que permitió un examen exhaustivo y riguroso.

Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de inclusión para esta investigación incluyeron estudios sobre la huella hídrica agrícola en Colombia que utilizaron una metodología exhaustiva y repetible. Se dio prioridad a los trabajos en español o inglés que proporcionaron datos extensos y precisos para la comparación y el análisis crítico. Por el contrario, se rechazaron las investigaciones que no se centraron principalmente en el sector agrícola de Colombia, emplearon una metodología defectuosa o insuficiente, o no proporcionaron acceso completo a sus datos y hallazgos. La investigación relacionada con la huella hídrica de la producción corporativa, comunitaria o ganadera se excluyó de la revisión para preservar el énfasis en los cultivos agrícolas.

Resultados y discusión

Huella hídrica agrícola en Colombia

Colombia posee importantes recursos hídricos mundiales; sin embargo, este recurso se ve amenazado por una planificación inadecuada, una distribución desigual y el cambio climático, lo que resulta en limitaciones en la utilización del agua (24,26). En 2020, la demanda nacional de agua comprendió el 43,25% de las actividades agrícolas y poscosecha, mientras que el resto se asignó a usos no agrícolas, como la energía hidroeléctrica, el consumo doméstico, la ganadería y la industria (27). En los últimos años, se han realizado numerosos estudios sobre el agua en Colombia, centrándose principalmente en la gestión, utilización y calidad de los recursos hídricos. Estos se han llevado a cabo en regiones significativas dentro de sectores caracterizados por una mayor actividad agrícola e industrial (24,28).

Se identificaron un total de 37 documentos (Fig. 1) que abordan el cálculo de la huella hídrica de los cultivos agrícolas en Colombia. De estos, el 47% pertenecen a tesis de pregrado, el 45% a artículos científicos y el 8% restante a informes institucionales.

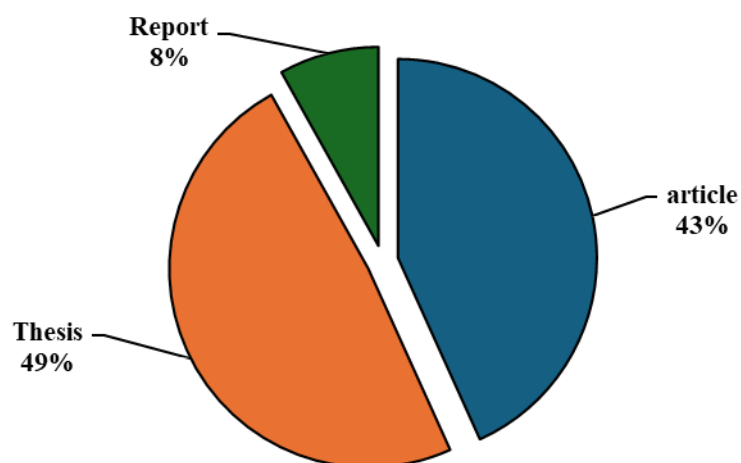


Figura 1. Tipo de publicación de Huella Hídrica de cultivos agrícolas en Colombia.

Cultivos

Se identificaron y clasificaron un total de 44 cultivos agrícolas en función de su sistema (Fig. 2). La mayoría de las publicaciones se concentran en cultivos semestrales, que comprenden 17 documentos, con el maíz, el arroz y la caña de azúcar como cultivos principales. Se documentaron quince cultivos perennes, siendo el cacao, el café, el aguacate y el algodón los más destacados. Se identificaron ocho cultivos de invernadero, incluidas variedades notables como flores, tomates y fresas. Finalmente, se localizó un documento pertinente sobre los cultivos forestales.

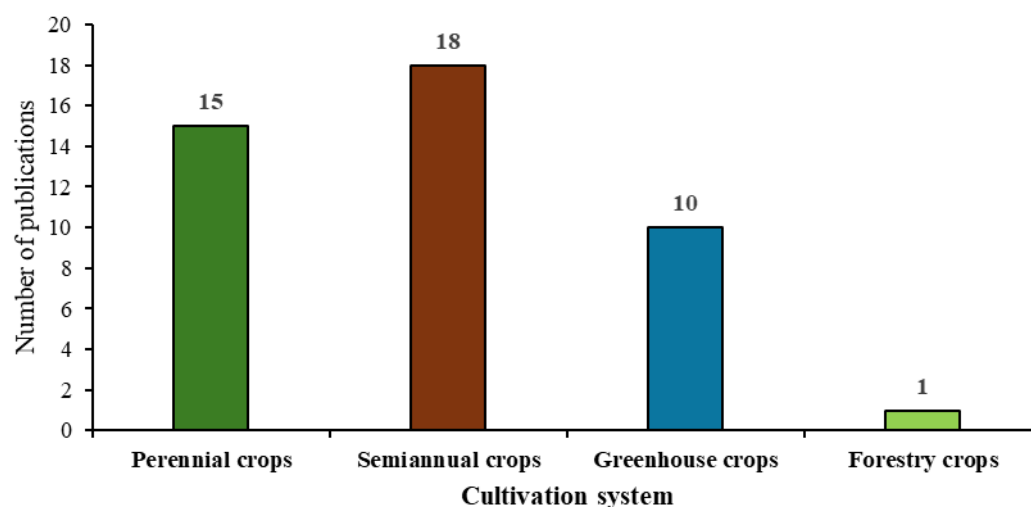


Figura 2. Sistemas de cultivo agrícola en estudios de huella hídrica en Colombia. Fuente: Elaboración propia.

Distribución espacial de los cultivos agrícolas

Se identificaron un total de 33 áreas de estudio en todo el territorio colombiano, distribuidas en varios departamentos. Los diversos cultivos se clasificaron colectivamente. Esta categorización facilita una mejor visualización y análisis de la distribución espacial de varios tipos de cultivos (Fig. 3). El departamento de Cundinamarca se distingue por ocho áreas de estudio, mientras que Tolima

y Boyacá poseen cuatro sedes cada una. Los departamentos de Meta, Santander y Huila tienen tres áreas de estudio cada uno, mientras que Antioquia tiene dos. Arauca, Nariño, Quindío, Valle del Cauca y Córdoba poseen cada uno un área de estudio singular, lo que indica la dispersión geográfica de la investigación de la Huella Hídrica Agrícola en Colombia.

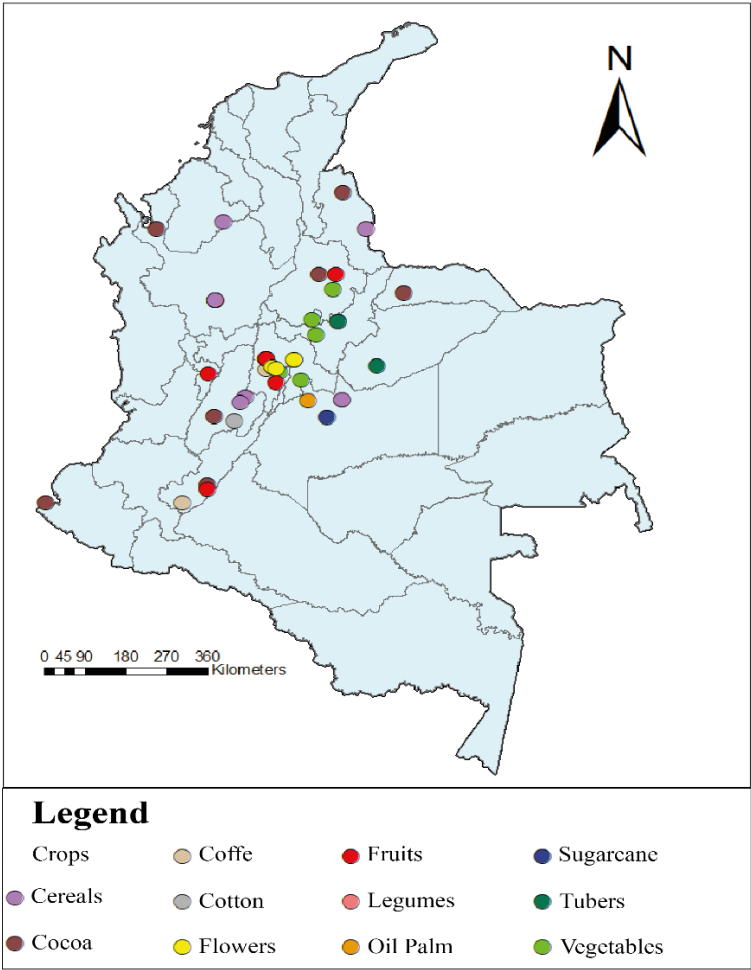


Figura 3. Distribución geográfica de los cultivos en los estudios revisados. Fuente: Elaboración propia.

Un total de 37 estudios identificaron 44 cultivos. La figura 4 ilustra la categorización de los cultivos con base en la evaluación de la huella hídrica en Colombia. La categoría con mayor número de estudios es el café y el cacao, con un 20%, seguidos de los cultivos frutales con un 17%, que incluye el aguacate Hass, el tomate de árbol y la naranja Valencia. Las hortalizas representan el 17% del total, incluyendo la cebolla y el tomate, mientras que los cultivos de flores comprenden el 13%, con flor de astromelia, clavel y gerbera. Una categoría separada abarca ciertos cereales, específicamente arroz y maíz, mientras que el 23% restante pertenece a cultivos con menos estudios, incluida la palma aceitera, los tubérculos y los árboles forestales.

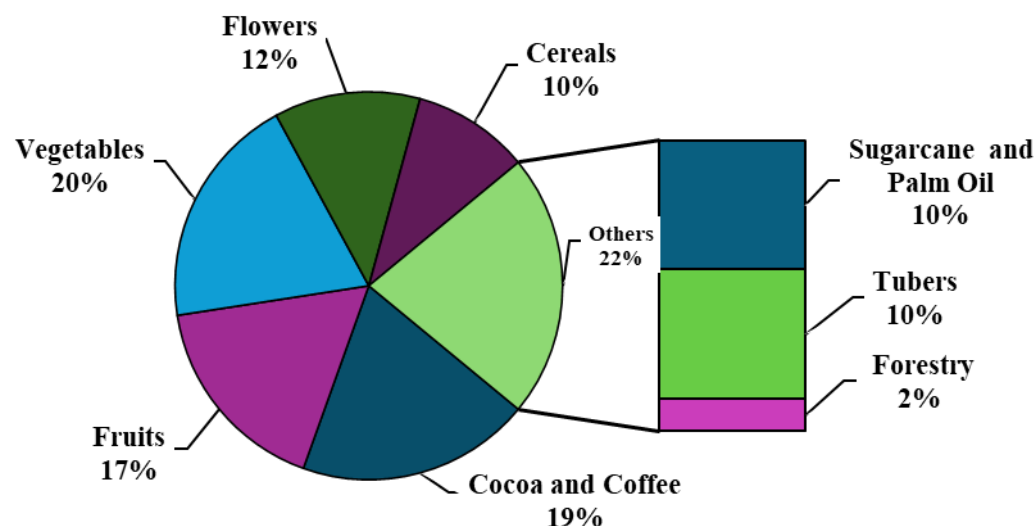


Figura 4. Subdivisión de cultivos analizados en los estudios revisados.

Fuente: Elaboración propia

Evaluación de la huella hídrica en cultivos agrícolas

En Colombia se han realizado numerosos estudios sobre la Huella Hídrica asociada a la producción agrícola. La tabla 1 muestra los hallazgos principales de estos estudios. Las investigaciones se alinean en la evaluación del consumo de agua en los cultivos para evaluar la sostenibilidad del suministro de agua en las áreas de estudio (29,30). El estudio abarca variables que incluyen el tipo de cultivo, el clima, la precipitación y el suelo, centrándose principalmente en la medición de la huella azul y la huella verde en los cultivos, con un énfasis secundario en la huella hídrica gris. Varios autores han estimado la Huella Hídrica de los cultivos a nivel de cuenca (30), mientras que otros se han centrado en ambientes controlados, como los cultivos de invernadero (31). Por el contrario, ciertos cultivos cultivados a través de prácticas de tierras secas exhiben un consumo total de agua verde, lo que resulta en una huella hídrica azul de cero. Sin embargo, para cultivos como el café, la huella hídrica azul se atribuye a las actividades de procesamiento y poscosecha (24).

Tabla 1. Principales resultados de la Huella Hídrica Agrícola en Colombia

Sistema de cultivo	Cosecha	Ubicación	GWF	BWF	GWF	Total, WF (m3 / tonelada)	Referencia
Cultivos perennes	Café	Villeta	19.996		1.667	21.633	(32)
	Algodón	Natagaima- Tolima	1.158	749,5	150	2.058	(33)
		Apartadó (Antioquia)				14.344	
		Domesticado (Arauca)				15.057	
		Garzón (Huila)				13.475	
		Tumaco (Nariño)				13.719	
	Cacao	San Vicente (Santander				22.758	(34)
		Chaparral (Tolima)				23.239	
	Aguacate Hass	Quindío	3630	0	1315	4.945	(35)
	Café	(Chinchiná, Venecia, El Tambo, Buenavista)	8746		7000	15.749	(36)
	Cacao	Cuenca del río Porce (Antioquia)	19.428		346	19.346	(37)
	Cacao	Norte de Santander	13.189	5687		18.876	(38)
	Café	Cuenca del río Porce (Antioquia)				7.500	(37)
	Café	Huila	6.328	233,2		6.561	(24)
	Pitahaya	Palestina (Huila)	467	2444,34		2.911	(39)
	Valencia Naranja	Puerto López	19735.8	25634.9	77	45488,6	(40)
	Café	Anolaima	7.823	9.11	17.93	7.850.5	(41)
	Tomate de árbol	Antioquia	248	31	7	286	(37)
	Palma aceitera	Cuenca del río Guayuriba, Meta	347,8	141,3		489,1	(42)
	Lima de Tahití	Cuenca del río Angula (Santander)	350	82.88	19.51	452,3	(43)



	Cebolla	Samacá	65.28	78.7	52.41	196.4	(44)
	R12 Patata	El Rosal	169.12	32.80	190.99	392.91	(45)
	Cebolleta	Cuenca del río Porce (Antioquia)	402	431	13	846	(37)
	Patata	Cuenca del río Porce (Antioquia)	390	78	11	479	(37)
	Papa criolla	Cuenca del río Porce (Antioquia)	578	105	16	699	(37)
	Cebolla	Duitama Y Samacá (Boyacá)	151,52	107,3	332,5	591,32	(46)
	Patata	Duitama Y Samacá (Boyacá)	200,5	42,93	251,5	494,93	(46)
	Arroz	Espinal (Tolima)	549,26	184,85	32,02	766,13	(47)
Cultivos semestrales	Plátano	Cuenca del río Porce (Antioquia)	2051		39	2.090	(37)
	Caña de azúcar	Villeta	1.856		323	2.179	(32)
	Caña de azúcar	Cuenca del río Amaime (Valle del Cauca)	117	37,44		154.51	(48)
	Maíz (Maíz)	Villeta	2.095		1458.3	3554.2	(32)
	Frijol	Cuenca del río Porce (Antioquia)	4269		187	4.456	(37)
	Arroz	Guamo (Tolima)	204,3	1345,6	1033,36	2583,2	
		Cúcuta	179,3	1284,6	1713,24	3177,2	
		La apartada (Córdoba)	362,6	2007,4	1581,55	3951,6	(49)
		Puerto López (Meta)	241,3	1987,3	1900,66	4129,3	
	Maíz (Maíz)	Cuenca del río Porce (Antioquia)	5.696		141	5.837	(37)
Cultivos de invernadero	Mandioca	Villeta	405		277.8	683	(32)
	Plátano	Villeta	2.394		547	2.941	(32)
	Flor de Alstroemeria	Facatativá	1.76	0.95	0.77	3.5	(50)
	Tomate	Fomeque	87.84	13	233.56	334.4	(51)
	Tomate (Invernadero)	Alto Ricaurte (Boyacá).				1207.4	(52)
	Tomate (campo abierto)	Alto Ricaurte (Boyacá).				17411.6	(52)
	Gerbera	Facatativá	3.12	1.34	0.82	5.28	(53)
	Flor Estatice	Tocancipá	0.62	3.78	1.94	6.34	(54)
	Flor de Liatris	Tocancipá	1.32	0.91	4.27	6.50	(54)
	Fresa	Sibaté	55.13	22.68	3.84	81.65	(55)
	Clavel	Bogotá	2.967	5.476	97.10	8.540	(56)
Silvicultura	Eucalipto	Colombia				1.764	(57)

GWF: Huella hídrica verde, **HHA:** Huella hídrica azul, **GWF:** Huella hídrica gris. **Fuente:** Elaboración propia.



Los valores de huella hídrica para el cultivo de café son de 21,633 m³/ton en la zona de Villeta de Cundinamarca y 6,561 m³/ton en el departamento del Huila. La diferencia observada es atribuible a variaciones en las condiciones climáticas, incluidas las precipitaciones, y los tipos de suelo. El primer estudio incorpora el agua utilizada en el proceso de poscosecha, mientras que el segundo estudio excluye la huella hídrica gris (26,17). Un estudio realizado por Bulsink et al. (58) en Indonesia indica un valor de 22.907 m³/tonelada para el cultivo de café, compuesto por un 96% de agua verde y un 4% de aguas grises. En contraste, se han identificado ocho áreas de estudio para el cultivo de cacao, detallando el consumo de agua de este cultivo: apartadó (Antioquia) con 14.344 m³/ton, Tame (Arauca) con 15.057 m³/ton, Garzón (Huila) con 13.475 m³/ton, Tumaco (Nariño) con 13.719 m³/ton, San Vicente (Santander) con 22.758 m³/ton, y Chaparral (Tolima) con 23.239 m³/ton (34). Investigaciones adicionales indican valores en la cuenca del río Porce, Antioquia y Norte de Santander, registrados en 19.346 m³/ton y 18.876 m³/ton, respectivamente (37,38).

La huella hídrica del cultivo de cacao en Ecuador se estima en 24.602,70 m³/ton. La disparidad surge de la utilización de 30,22% de agua azul y 69,78% de agua verde para el desarrollo de cultivos en Ecuador (23). En Colombia, el consumo de agua para el cultivo se deriva únicamente del agua verde, sin valores reportados para las aguas grises. En el contexto del cultivo de algodón, el área de Natagaima en Tolima reporta un valor de 2,058 m³/ton, lo que indica un consumo sustancial de agua azul de 36.41%. Esto subraya la necesidad de agua de riego para el desarrollo de los cultivos. Chapagain y Hoekstra. (59) realizaron un estudio que evaluó la huella hídrica total asociada con el cultivo de algodón en varios países. Los resultados revelaron valores de 1.534 m³/tonelada en Grecia, 1.325 m³/tonelada en España y 2.320 m³/tonelada en Turquía. El valor reportado para Colombia es mayor; sin embargo, no indica una diferencia significativa en comparación con las regiones analizadas. La diferencia observada en los valores puede deberse a la implementación de sistemas de riego más eficientes, como lo indica el valor total de la huella hídrica azul (60).

Un estudio sobre el cultivo de aguacate Hass indica un uso de agua de 4.945 m³/tonelada, que comprende un 73,4% de agua verde y un 26,6% de aguas grises asociadas a la contaminación por nitrógeno. Es importante destacar que en Colombia, este cultivo no requiere riego suplementario (35). Investigaciones comparables, incluida la realizada por Cerna y Olivares (61) en Perú, indican un valor de 956 m³/tonelada. Por el contrario, en Chile, la huella hídrica promedio de Avocado es de 389 m³/ton (62). Una diferencia notable es evidente en el valor obtenido en Colombia, lo que sugiere variaciones en la estimación de la huella hídrica relacionada con el tiempo de desarrollo del cultivo. El cultivo de caña de azúcar abarca dos áreas de estudio, revelando valores reportados de 2.197 m³/tonelada para Villeta Cundinamarca y 154,51 m³/tonelada en la cuenca del río Amaime en el Valle del Cauca. Los requerimientos hídricos de las dos áreas difieren debido a las variaciones en las condiciones climáticas, los tipos de suelo y los plazos utilizados para calcular la huella hídrica (32,48). En Brasil, el cultivo de caña de azúcar rinde valores de 98 m³/tonelada en condiciones de secano y 119 m³/tonelada bajo riego (63).

El cultivo del tomate se produce en dos modalidades: campo abierto e invernadero. Los valores de consumo de agua son de 334,4 m³/tonelada para campo abierto y 1.207 m³/tonelada para

cultivo en invernadero. Esto indica una diferencia significativa en el uso de agua verde y azul, ya que los cultivos de invernadero requieren un mayor volumen de agua azul a lo largo de su ciclo de producción (52). Mekonnen y Hoekstra (64) informan de una huella hídrica media de 214 m³/tonelada para los tomates. Además, en regiones como el noroeste de São Paulo, Brasil, la huella hídrica promedio de los tomates es de 94 m³ / tonelada, lo que comprende un 72% de consumo de agua verde, un 20% de agua azul y un 8% de aguas grises (65).

Colores de la huella hídrica agrícola colombiana

La figura 5 ilustra los componentes examinados en los estudios analizados. El 60% de estos abarca los tres componentes (verde, azul y gris), mientras que el 25% se enfoca únicamente en las huellas verdes y grises. El principal contribuyente a la huella hídrica en los cultivos agrícolas es el agua verde, que está influenciada por la estacionalidad y la precipitación (5). La mayoría de los estudios sobre las estimaciones de la huella hídrica gris se han centrado en la contaminación por nitrógeno (N) y fósforo (P) (66). Se observa que el 12% de los estudios se centran exclusivamente en el agua verde y azul.

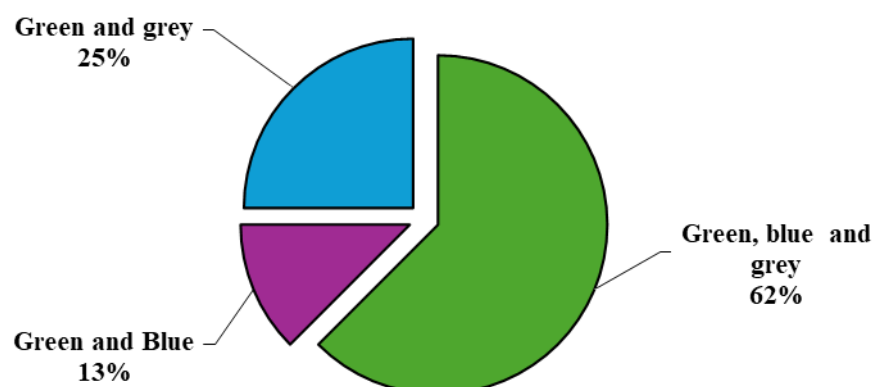


Figura 5. Subdivisión según los componentes considerados en los estudios **Fuente:** Elaboración propia.

Distribución de la huella hídrica agrícola

Los estudios indican que el agua verde representa el mayor consumo de agua con un 72%, seguida del agua azul con un 15% y las aguas grises con un 13% (Fig.6). El Estudio Nacional del Agua 2022 indica que la huella hídrica verde tiene la mayor participación. Esto se debe a los importantes niveles de lluvia, que disminuyen la dependencia del agua de riego y reducen el costo de oportunidad del uso del agua en la agricultura colombiana (27). La huella hídrica azul es relativamente baja, ya que no todos los cultivos agrícolas se cultivan con prácticas de riego. Este valor refleja cultivos con importantes requerimientos hídricos que superan los recursos disponibles en regiones como Tolima, Huila y Magdalena (67).

La huella hídrica gris representa el componente con menor contribución. Los resultados sugieren que no todos los documentos revelan su valor como resultado del empleo de prácticas agrícolas ecológicas (42). El cálculo de esta huella requiere datos específicos, incluida la textura del suelo,

el rendimiento, la lixiviación y los factores ambientales. Esto también puede mitigarse mediante prácticas de agricultura de precisión y conservación del suelo (68).

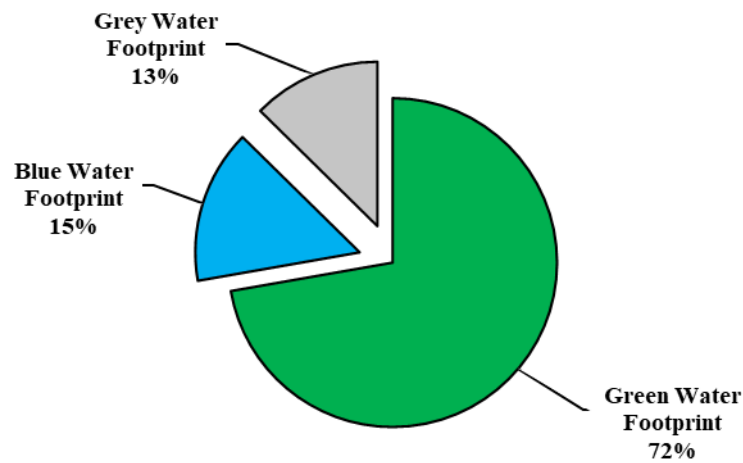


Figura 6. Distribución de la huella hídrica agrícola en Colombia. **Fuente:** Elaboración propia.

La gestión sostenible de los recursos hídricos es un enfoque primordial de las políticas públicas de Colombia, especialmente en sectores como la agricultura. El documento CONPES 3934 de 2018, titulado “Política de crecimiento verde”, enfatiza la necesidad de implementar prácticas productivas que salvaguarden este recurso esencial, satisfaciendo las demandas presentes sin poner en peligro su disponibilidad futura (69). Sin embargo, persisten las inconsistencias entre las políticas ambientales y agrícolas, lo que resulta en deficiencias sustanciales en el cambio hacia modelos de producción sostenibles, como lo observan Forero y González (70). Las políticas actuales enfatizan predominantemente la supervisión del uso del agua; sin embargo, es necesaria una integración más profunda de la oferta y la demanda de agua en sectores productivos críticos. Además, instrumentos como el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) y la Ley 1931 de 2018 abogan por medidas de adaptación al agua, pero encuentran obstáculos que incluyen una coordinación institucional inadecuada, financiamiento limitado y participación local limitada (71). Esto resalta la necesidad de mejorar la planificación territorial y mejorar la gobernanza del agua que integre efectivamente las políticas públicas con el desarrollo rural y la conservación del medio ambiente.

Desde 1998, los Estudios Nacionales del Agua (ENA) realizados por el IDEAM se han convertido en un instrumento crucial para la gestión de los recursos hídricos en Colombia. El estudio nacional de 2014 introdujo el concepto de huella hídrica, facilitando un análisis del consumo de agua en la agricultura. Se hizo hincapié en cultivos clave como el café, la caña de azúcar y la palma aceitera, lo que indica que la agricultura en Colombia depende predominantemente del agua verde, con una dependencia mínima del agua azul o el riego. La proporción de huellas hídricas verdes y azules difiere entre regiones y subzonas hidrográficas (72).

El NWS de 2018 estimó la demanda de agua y las huellas hídricas azules y verdes del sector agrícola de Colombia mediante la cuantificación de los requisitos de agua de los cultivos y la evaluación de las fuentes de agua disponibles en cada región. Esto resultó en el desarrollo de mapas nacionales que representan huellas hídricas verdes y azules, categorizadas por subzonas hidrográficas. Los análisis destacaron el importante consumo de agua de cultivos como el arroz, el plátano y la palma aceitera de regadío (73).

En su NWS de 2022, el IDEAM introdujo posteriormente el Índice de Retorno de Agua de la Cuenca (IARC), que se refiere a la huella hídrica. Este indicador demuestra la capacidad de las subzonas hidrográficas para soportar el uso del agua derivado de actividades como la agricultura. Además, se integró el Índice de Presión Hídrica sobre los Ecosistemas (IPHE). Este índice evalúa la huella hídrica verde de los sectores agrícola y forestal dentro de una subzona hidrográfica, yuxtaponiéndola con la disponibilidad de agua verde durante el período de tiempo correspondiente. A través de este índice se evaluó la sostenibilidad del sector agropecuario a nivel nacional. La investigación también abarcó pronósticos de uso de agua por parte de los sectores productivos hasta 2040 (27).

Los Estudios Nacionales del Agua han servido como instrumentos esenciales para la política pública nacional, empleando la Huella Hídrica como criterio para evaluar el consumo de agua agrícola. Estos estudios examinaron el uso del agua vinculado a diferentes sistemas de cultivo, produciendo mapas completos que ilustran cada elemento de la huella hídrica. Presentaron una descripción lúcida de la presión que la producción agrícola ejercía sobre los recursos hídricos, estableciendo así una base sólida para la gestión sostenible del agua dentro del sector agrícola (27).

Conclusiones

La revisión permitió establecer el estado actual del arte en términos de huella hídrica agrícola en Colombia. La mayor parte de la producción bibliográfica es para tesis de pregrado y posgrado, lo que puede indicar la necesidad de revisar la precisión de los resultados y las metodologías utilizadas, particularmente cuando se compara con la investigación científica en el mismo campo.

Se descubrió que la huella hídrica de varios cultivos se ha cuantificado en diferentes regiones, y la huella hídrica verde representa la mayor parte de la huella hídrica total. Esto se debe al hecho de que los principales cultivos se cultivan utilizando prácticas de secano en áreas con altas tasas de lluvia. La agricultura se destaca como una actividad que capta y utiliza el agua de lluvia, que representa una parte importante de la producción agrícola en Colombia. Aunque la huella hídrica verde no implica una competencia directa por el consumo de agua, sí da lugar a una competencia por el uso de la tierra a medida que se expande la frontera agrícola nacional.

En Colombia, el uso de agua de lluvia en la agricultura reduce la necesidad de riego y al mismo tiempo promueve la sostenibilidad. Se recomienda utilizar tecnologías eficientes que prioricen esta fuente, en línea con el ODS 12. Además, la evaluación de la huella hídrica contribuye a reducir la contaminación por fertilizantes y a preservar la calidad del agua, lo que se alinea con el ODS 6. Comprender los requisitos y la disponibilidad de agua es fundamental para evitar limitaciones de recursos y promover el uso sostenible, enfatizando la necesidad de futuras investigaciones en la gestión del agua agrícola.

El sector agrícola en Colombia requiere la implementación de políticas que enfatizen el uso sostenible del agua, asegurando así un equilibrio armónico entre los requisitos de producción y la conservación de los recursos ambientales.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Andrés Felipe Góngora Duarte, Juan Manuel Trujillo González.
Curación de datos: Andrés Felipe Góngora Duarte. Análisis formal: Andrés Felipe Góngora Duarte.
Investigación: Andrés Felipe Góngora Duarte. Metodología: Andrés Felipe Góngora Duarte.
Dirección de Proyecto: Andrés Felipe Góngora Duarte. Recursos: Andrés Felipe Góngora Duarte,
Supervisión: Juan Manuel Trujillo González. Validación: Andrés Felipe Góngora Duarte, Juan Manuel Trujillo González. Redacción - borrador original - Elaboración: Andrés Felipe Góngora Duarte, Juan Manuel Trujillo González. Redacción - revisión y edición - Elaboración: Juan Manuel Trujillo González.

Financiación: no declara. Conflicto de intereses: no declara. Aspecto ético: no declara.

References

1. Jie H, Khan I, Alharthi M, Zafar MW, Saeed A. Sustainable energy policy, socio-economic development, and ecological footprint: The economic significance of natural resources, population growth, and industrial development. *Utilities Policy*. 2023;81. Available in: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101490>
2. Abu-Zeid MA, Abu-Zeid KM, Halim MK. Impact of Climate Change on Water Resources. In: *Climate Changes Impacts on Aquatic Environment: Assessment, Adaptation, Mitigation, and Road Map for Sustainable Development*. Cham: Springer Nature Switzerland; 2025. p. 121-157. Available in: https://doi.org/10.1007/978-3-031-74897-4_5
3. Ardila C, del Pilar M. Gestión del agua para riego en prácticas de agricultura desde la complejidad ambiental [specialization thesis]. Bogotá: Fundación Universidad de América; 2018. Available in: <https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/2ca23716-2b39-4599-8764-b2781e1f364b/content>
4. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Agua y cambio climático [Internet]. UNESCO; 2020 [accessed: December 10, 2024]. Available in: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611>
5. Makanda K, Nzama S, Kanyerere T. Assessing the role of water resources protection practice for sustainable water resources management: a review. *Water*. 2022;14(19):3153. Available in: <https://doi.org/10.3390/w14193153>
6. United Nations. Sustainable Development Goal 6 Synthesis Report 2018 on Water and Sanitation [Internet]. New York: United Nations; 2018 [accessed: December 10, 2024]. Available from: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/19901SDG6_SR2018_web_3.pdf
7. Verma N, Talwar P, Upadhyay A, Singh R, Lindenberger C, Pareek N, et al. Food-Energy-Water Nexus in compliance with Sustainable Development Goals for integrating and managing the core environmental verticals for sustainable energy and circular economy. *Sci Total Environ*. 2024;930:172649. Available in: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172649>
8. Papamichael I, Voukkali I, Stylianou M, et al. Sustainable production and consumption. *Euro-Mediterr J Environ Integr*. 2024;9:2003–2008. Available in: <https://doi.org/10.1007/s41207-024-00594-0>
9. Miao J, Song X, Zhong F, Huang C. Sustainable development goal 6 assessment and attribution analysis of underdeveloped small regions using integrated multisource data. *Remote Sens*. 2023;15(15):3885. Available in: <https://doi.org/10.3390/rs15153885>

10. Ingrao C, Strippoli R, Lagioia G, Huisinigh D. Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. *Heliyon*. 2023;9(8). Available in: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18507>
11. Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen MM. The Water Footprint Assessment Manual. February 2011. Available in: <http://doi.org/978-1-84971-279-8>
12. Lovarelli D, Bacenetti J, Fiala M. Water footprint of crop productions: A review. *Science of the Total Environment*. 2016;548:236-251. Available in: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.022>
13. Hua E, Han X, Engel BA, Guan J, Sun S, Wu P, et al. Developing a sustainable assessment framework for identifying industrial water suitability Perspective on the water-energy-food nexus. *Agricultural Systems*. 2024;220:104065. Available in: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104065>
14. Peng Q, He W, Kong Y, Shen J, Yuan L, Ramsey TS. Spatio-temporal analysis of water sustainability of cities in the Yangtze River Economic Belt based on the perspectives of quantity-quality-benefit. *Ecological Indicators*. 2024;160:111909. Available in: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111909>
15. Zhang GP, Hoekstra AY, Mathews RE. Water Footprint Assessment (WFA) for better water governance and sustainable development. *Water resources and industry*. 2013;1-2:1-6. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wri.2013.06.004>
16. Hoekstra AY, Hung PQ. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. *Value of Water Research Report Series No. 11*. UNESCO-IHE; 2002. Available in: <https://www.waterfootprint.org/resources/Report11.pdf>
17. Hoekstra AY, Wiedmann TO. Humanity's unsustainable environmental footprint. *Science*. 2014;344(6188):1114-1117. Available from: <https://doi.org/10.1126/science.1248365>
18. Dehghanpir S, Bazrafshan O, Ramezani Etedali H, Holisaz A, Collins B. Water scarcity assessment in Iran's agricultural sector using the water footprint concept. *Environment, Development and Sustainability*. 2023;1-26. Available in: <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03852-3>
19. Hoekstra AY, Hung PQ. Globalization of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change*. 2005;15(1):45-56. Available in: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.06.004>
20. Finogenova N, Dolganova I, Berger M, Núñez M, Blizniukova D, Müller-Frank A, et al. Water footprint of German agricultural imports: local impacts due to global trade flows in a fifteen-year perspective. *Science of the Total Environment*. 2019;662:521-529. Available in: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.264>
21. Liu L, Hu X, Zhan Y, Sun Z, Zhang Q. China's dietary changes would increase agricultural blue and green water footprint. *Science of the Total Environment*. 2023;903:165763. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165763>
22. Garrido-Rubio J, González-Piqueras J, Calera A, Osann A. Remote sensing-based green and blue agricultural water footprint estimation at the river basin scale. *Ecological Indicators*. 2024;167:112643. Available in: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112643>
23. Dumes JMM, Peralta SLP. Valor económico de la huella hídrica de cacao arriba (*Theobroma Cacao*). *Revista de la Universidad del Zulia*. 2023;14(41):94-130. Available in: <https://doi.org/10.46925//rdluz.41.06>
24. Camacho WA, Uribe DA. Estimación de la huella hídrica azul y verde de la producción cafetera en ocho cuencas en el sur del departamento del Huila. *Revista de investigación agraria y ambiental*. 2018;9(2):338-354. Available in: <https://doi.org/10.22490/21456453.2284>
25. Al-Saidi M. Conflicts and security in integrated water resources management. *Environmental Science & Policy*. 2017;73:38-44. Available in: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.03.015>
26. Ordóñez JI. El agua y el sector rural en Colombia. *Revista de ingeniería*. 2020;(49):10-17. Available in: <https://revistas.uniandes.edu.co/index.php/rdi/article/download/7486/7883>
27. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Estudio nacional del agua 2022. IDEAM; 2022. Available in: https://www.andi.com.co/Uploads/ENA%202022_compressed.pdf

28. Rincón MAP, Hurtado IC, Restrepo S, Bonilla SP, Calderón H, Ramírez A. Water footprint measure method for tilapia, cachama and trout production: study cases to Valle del Cauca (Colombia). *Ingeniería y competitividad*. 2017;19(2):109-120. Available in: <https://doi.org/10.25100/iyv.v19i2.5298>
29. Tovar-Hernández, N. A., Trujillo-González, J. M., Muñoz-Yáñez, S. I., Torres-Mora, M. A., & Zárate, E. (2017). Evaluación de la sostenibilidad de los cultivos de arroz y palma de aceite en la cuenca del río Guayuriba (Meta, Colombia), a través de la evaluación de huella hídrica. *Orinoquia*, 21(1), 52-63. <https://doi.org/10.22579/20112629.394>
30. Vargas-Pineda OI, Trujillo-González JM, Torres-Mora MA. Supply-demand of water resource of a basin with high anthropic pressure: case study Quenane-Quenanito Basin in Colombia. *Air, Soil and Water Research*. 2020;13:1178622120917725. Available in: <https://doi.org/10.1177/1178622120917725>
31. Bojacá CR, Wyckhuys KA, Schrevels E. Life cycle assessment of Colombian greenhouse tomato production based on farmer-level survey data. *Journal of Cleaner Production*. 2014;69:26-33. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.078>
32. Ortiz Caballero LD. Cálculo de la huella hídrica de los sistemas productivos agrícolas de la microcuenca Quebrada Cune, municipio de Villeta, Cundinamarca [Undergraduate thesis]. Bogotá: Universidad de La Salle; 2014. Available in: <https://ciencia.lasalle.edu.co/bitstreams/6cf6f33b-397a-42a6-a193-810184f56bbc/download>
33. Díaz Fonseca OD, Lizarazo Ariza JA. Determinar la huella hídrica del cultivo de algodón (Gossypium) de la empresa Coagronat Ltda. en el municipio Natagaima-Tolima [Undergraduate thesis]. Bogotá: Universidad de La Salle; 2016. Available in: <https://ciencia.lasalle.edu.co/bitstreams/dd48c0c9-ea94-4e6c-8cf1-646250de3014/download>
34. Ortiz-Rodriguez OO, Naranjo CA, García-Caceres RG, Villamizar-Gallardo RA. Water footprint assessment of the Colombian cocoa production. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2015;19(9):823-828. Available in: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n9p823-828>
35. Naranjo JF, Reyes H. Huella hídrica del cultivo de aguacate cv. Hass (Persea americana Mill.), en el Distrito de Conservación de Suelos Barbas-Bremen, Quindío, Colombia. *Entre Ciencia e Ingeniería*. 2021;15(29):63-70. Available from: <https://doi.org/10.31908/19098367.1813>
36. Leal-Echeverri JC, Tobón C. The water footprint of coffee production in Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 2021;74(3):9685-9697. Available in: <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n3.91461>
37. Builes Cédula ED. Cuantificación y análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca del río Porce [master's thesis]. Medellín: Universidad Nacional de Colombia; 2013. Available in: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/20267>
38. Naranjo-Merino CA, Ortiz-Rodriguez OO, Villamizar-G RA. Assessing green and blue water footprints in the supply chain of cocoa production: A case study in the Northeast of Colombia. *Sustainability*. 2017;10(1):38. Available in: <https://doi.org/10.3390/su10010038>
39. Bautista EAS, Roa JRV, Ortega JAT. Estimación de la huella hídrica para un cultivo de pitahaya amarilla (Selenicereus megalanthus). *Publicaciones e investigación*. 2015;9:135-146. Available from: <https://doi.org/10.22490/25394088.1439>
40. Sabogal Ángel JS. Evaluación de la huella hídrica para el cultivo de naranja (Valencia) en un predio del municipio de Puerto López-Meta [master's thesis]. Bogotá: Universidad de La Salle; 2015. Available in: <https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/9d02d8f9-6f71-4f96-9b24-5dd14826ba9d/content>
41. Forero Peña AM, Pastor Silva EP. Aproximación a la huella hídrica del cultivo de café en el municipio de Anolaima y determinación de la presión generada por la demanda hídrica y descarga de aguas mieles [undergraduate thesis]. Bogotá: Universidad de La Salle; 2014. Available in: <https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/2e3431bc-f008-4322-8601-33cfc6387c4b/content>
42. Trujillo-González JM, Tovar-Hernández NA, Torres-Mora MA. Water footprint of fresh fruit bunches (FFBs) of oil palm in the Piedemonte Llanero, Colombia. *inycomp* [cited 2024 Nov. 17];24(1). Available in: <https://doi.org/10.25100/iyv.v24i1.10947>

43. Arenas-Jiménez CF, Correa-Torres SN, Pineda-Vargas SM. Estimación de la huella hídrica en la producción agrícola de lima Tahití en la Cuenca La Angula, Santander, Colombia. *Investig Cienc.* 2020;28(79):52-61. Available in: <https://doi.org/10.33064/iycuuaa2020792939>
44. Cely-Reyes GE, Camargo-Guerrero FDR, Fernández-Pérez CJ, Walteros-Torres IY, Serrano-Cely PA. Determination of the water footprint in the production of the bulb onion crop under two irrigation systems in Samaca (Colombia). *Rev Colomb Cienc Hort.* 2023. Available in: <https://doi.org/10.17584/rcch.2023v17i2.16010>
45. Amézquita Bonilla VV, Motta López DF. Evaluación de huella hídrica en la producción de un cultivo de papa R12 ubicado en el municipio El Rosal, Cundinamarca [Undergraduate thesis]. Bogotá: Universidad de La Salle; 2015. Available in: <https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/99b5dfb4-eb2b-41f8-9406-755b3a37bc6b/content>
46. Higuera C, Jaimes H. Evaluación de indicadores de huella hídrica en la producción de un cultivo de cebolla de bulbo y papa en los municipios de Duitama y Samacá, Boyacá [specialization thesis]. Bogotá: Universidad Católica de Colombia; 2019. Available in: <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/83f56d69-2835-4477-9c8a-8c20d0aed53b/content>
47. Lozano Chamorro D, Cortés González N. 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 [Undergraduate thesis]. Bogotá: Universidad de La Salle; 2016. Available in: <https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/b9b0259c-bf2a-49b0-92a6-7b08fc5134c6/content>
48. Ramírez L, Becerra D, Mora C. Huella hídrica verde y azul de la producción de caña de azúcar orgánica en la zona centro del Valle del Cauca. *Inycomp.* 2021;24(2-2022). Available in: <https://doi.org/10.25100/iyv.v24i02.11264>
49. Murcia Rojas AV, Casadiego Hernández D. Cálculo comparativo de la huella hídrica del sistema productivo de arroz de riego en cuatro zonas arroceras de Colombia por medio del software Cropwat 8.0 [Undergraduate thesis]. Bogotá: Universidad de La Salle; 2018. Available in: <https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/42dd5be7-5b05-47db-851a-b29de56c7a08/content>
50. Velandia Rubiano IL, López Romero KJ. Evaluación de la huella hídrica para la producción de flores astromelias (*Alstroemeria* sp) en un predio del municipio de Facatativá, Cundinamarca [undergraduate thesis]. Bogotá: Universidad de La Salle; 2014. Available in: <https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/8ce28568-d3bb-48b1-9169-a46cb3d117dc/content>
51. Cruz González M. Análisis y evaluación de la huella hídrica de un cultivo de tomate (*Lycopersicum esculentum*) en el municipio de Fómeque, departamento de Cundinamarca [undergraduate thesis]. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada; 2017. Available in: <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/a87279b7-7e2e-4d3c-9fd4-01e29c253aee/content>
52. Prias Gómez AJ. Análisis de huella hídrica de los sistemas productivos de tomate a campo abierto y bajo invernadero en Colombia [master's thesis]. Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano; 2015. Available in: <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/1767/T065%20%281%29.pdf?sequence=1>
53. Rodríguez Martínez LM, Juya Roa EJ. Determinación y evaluación de la huella hídrica en la producción de un cultivo de gerbera ubicado en el municipio de Facatativá [Undergraduate thesis]. Bogotá: Universidad de La Salle; 2015. Available in: <https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/45a94bdc-cba2-40be-b129-91b12a6cd283/content>
54. Rincón Loaiza AM. Determinación de la huella hídrica de flores *Liatris* y *Estatice* en un floricultivo en el municipio de Tocancipá [Undergraduate thesis]. Bogotá: Universidad de La Salle; 2014. Available in: <https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/07701673-3825-4674-8b42-4ea68d1e6f22/content>
55. Linares Castillo LM, Melo Rojas L. Evaluación de la huella hídrica del cultivo de fresa en una finca del municipio de Sibaté, Cundinamarca [Undergraduate thesis]. Bogotá: Universidad de La Salle; 2015. Available in: <https://ciencia.lasalle.edu.co/bitstreams/ee2258b0-fbc7-4de4-8362-935162f18903/download>

56. Baez Silva WR. Evaluación de la huella hídrica en la producción de clavel estándar (*Dianthus caryophyllus*) en la sabana de Bogotá [Undergraduate thesis]. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia; 2013 [citado el 2025 Mar 11]. Available in: <https://core.ac.uk/download/pdf/198441829.pdf>
57. Vásquez Velásquez G. Los bosques plantados y la huella hídrica, la respuesta hidrológica y la hidrosolidaridad. Departamento de Ciencias Forestales; 2011. Available in: https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57650/Pantaciones%20y%20Bosques_Doc_Sectorial_Forestal.pdf?sequence=1
58. Bulsink F, Hoekstra AY, Booij MJ. The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss*. 2010;6(4):5115–37. Available in: <https://doi.org/10.5194/hess-14-119-2010>
59. Chapagain AK, Hoekstra AY, Savenije HHG, Gautam R. The water footprint of cotton consumption: an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecol Econ*. 2006;60:186–203. Available in: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.11.027>
60. Tsakmakis ID, Zoidou M, Gikas GD, Sylaios GK. Impact of irrigation technologies and strategies on cotton water footprint using AquaCrop and CROPWAT models. *Environ Process*. 2018;5:181–199. Available in: <https://doi.org/10.1007/s40710-018-0289-4>
61. Cerna Angeles MF, Olivares Hipolito IR. Huella hídrica del arándano azul (*Vaccinium corymbosum*), espárrago verde (*Asparagus officinalis*), palta Hass (*Persea americana*) cultivados en La Libertad, Perú [Undergraduate thesis]. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo; 2018. Available in: <https://dspace.unitru.edu.pe/server/api/core/bitstreams/36a74446-ed45-4c66-884f-db4b184ce33d/content>
62. Panez-Pinto A, Mansilla-Quiñones P, Moreira-Muñoz A. Agua, tierra y fractura sociometabólica del agronegocio. *Actividad frutícola en Petorca, Chile*. Bitácora Urbano Territorial. 2018;28(3):153–60. Available in: <https://doi.org/10.15446/bitacora.v28n3.72210>
63. Scarpore FV, Hernandez TAD, Ruiz-Corrêa ST, Kolln OT, Gava GJ de C, dos Santos LNS, et al. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. *J Clean Prod*. 2016;112(Part 5):4576–84. Available in: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.107>
64. Mekonnen MM, Hoekstra AY. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Twente Water Centre, University of Twente, Enschede, The Netherlands. 2011. Available in: <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
65. Martins Filho JB, Cremasco CP, Noris FJ, dos Santos RM, dos Santos JSP, Dal Pai A, et al. Demanda hídrica do tomate de mesa no município de Paranapuã-SP em diferentes épocas de plantio. *Research, Society and Development*. 2022;11(6). Available in: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.28797>
66. Aldaya MM, Rodriguez CI, Fernandez-Poulussen A, Merchan D, Beriain MJ, Llamas R. Grey water footprint as an indicator for diffuse nitrogen pollution: The case of Navarra, Spain. *Science of the Total Environment*. 2020;698:134338. Available in: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134338>
67. Arévalo D, Lozano J, Sabogal J. Estudio nacional de huella hídrica Colombia sector agrícola. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*. 2011;(6):101–126. Available in: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099/11915>
68. Borsato E, Galindo A, Tarolli P, Sartori L, Marinello F. Evaluation of the grey water footprint comparing the indirect effects of different agricultural practices. *Sustainability*. 2018;10(11):3992. Available in: <https://doi.org/10.3390/su10113992>
69. Departamento Nacional de Planeación (DNP). CONPES 3934: Política de Crecimiento Verde. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación; 2018. Available in: <https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/conpes/econ%C3%B3micos/3934.pdf> (Accessed December 5, 2024)
70. Forero N, González C. Agricultura Climáticamente Inteligente (ACI) en Colombia: diagnóstico y retos de política pública. 2020. Available in: https://www.repositorio.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/4053/Co_Eco_Diciembre_2020_Forero_y_Gonz%C3%A1lez.pdf?sequence=4&isAllowed=y (Accessed December 5, 2024)

71. MinAmbiente National Adaptation Plan (2011). Available in https://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Plan_nacional_de_adaptacion/Proyecto_nacional_de_adaptacion_al_cambio_climatico_INAP.pdf (accessed December 6, 2024).
72. IDEAM. Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM); 2014. Available in: https://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2014.pdf (accessed: December 10, 2024)
73. IDEAM. Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM); 2018. Available in: https://www.andi.com.co/uploads/ena_2018-comprimido.pdf (accessed: December 10, 2024)