

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

Evaluation of Sustainability of Rice and Palm Oil Crops in the Guayuriba River Basin (Meta, Colombia), through water footprint evaluation

Avaliação da Sustentabilidade das Culturas de Arroz e Óleo de Palma Na Bacia do Rio Guayuriba (Meta, Colombia) Através da Avaliação da Pegada Hídrica

Naisly Ada Tovar-Hernández^{1*}, *Juan Manuel Trujillo-González*^{2*}, *Sergio Iván Muñoz-Yáñez*^{3*}, *Marco Aurelio Torres-Mora*^{4*}, *Erika Zárate*⁵

¹ Ingeniero agrónomo, Mg;²Ingeniero agrónomo, MSc.;³Abogado, Esp. ©Mg;⁴Biólogo, PhD;⁵Ingeniera Ambiental, MSc, PhD, Good Stuff International, Bowil 3533, Switzerland

* Instituto de Ciencias Ambientales de la Orinoquia Colombiana ICAOC. Grupo de investigación en Gestión ambiental Sostenible GIGAS Villavicencio, Colombia.
Email: jtrujillo@unillanos.edu.co

Recibido: 15 de marzo de 2016

Aceptado: 20 de junio de 2017

Resumen

El agua es uno de los principales recursos que se utilizan en las actividades agrícolas y por eso es necesario evaluar el uso del agua en los cultivos predominantes en el Departamento del Meta, lo que permitirá tomar decisiones frente a la planificación del territorio, teniendo en cuenta las ofertas y demandas hídricas. Debido a esto el objetivo de este trabajo es evaluar el uso del agua en los cultivos de palma de aceite (*Elaeis sp.*) y arroz secano (*Oryza sativa*), en la cuenca del río Guayuriba, este trabajo se desarrolló utilizando el indicador de huella hídrica, donde estuvo basado en los parámetros productivos del año 2013. Como resultado a este trabajo se identifica que en la cuenca del río Guayuriba hay un equilibrio entre el uso y la disponibilidad de agua verde, pero en el caso de agua azul se presenta un déficit para los meses secos que se encuentran entre diciembre, enero, febrero y marzo, ya que la demanda es mayor a la oferta hídrica, reflejando así que no existe un ordenamiento de la cuenca hidrográfica teniendo en cuenta la disponibilidad de agua con la que cuenta la fuente hídrica.

Palabras claves: Gestión del agua, uso de agua, demanda y oferta hídrica, cuenca hidrográfica.

Abstract

Water is one of the main resources used in agricultural activities whereby it is necessary to evaluate its use in the predominant crops of the Department of Meta considering the water supply and demand which will allow to make decisions

regarding the land use planning. Due to this, the objective of this work is to evaluate the use of water in oil palm (*Elaeis sp.*) and upland rice (*Oryza sativa*) crops in the Guayuriba river basin using the water footprint indicator based on the productive parameters of the year 2013. As a result, this work identifies that there is a balance between the use and availability of green water in the Guayuriba river basin, but in the case of the blue water there is a deficit for the dry months of December, January, February and March, since the demand is greater than the water supply, reflecting that there is no river basin plan management that consider the availability of water that the basin counts on.

Keywords: Water management, water use, water demand and supply, watershed

Resumo

A água é um dos principais recursos que são usados nas atividades agrícolas e por isso é necessário avaliar o uso da água nas culturas de arroz no departamento do Meta o que permitirá tomar decisões frente ao planejamento do território, tendo em conta as ofertas e demandas hídricas. Devido a isso o objetivo deste trabalho é avaliar o uso da água nas culturas de óleo de palma (*Elaeis sp.*) e arroz de sequeiro (*Oryza sativa*), na bacia do rio Guayuriba, este trabalho se desenvolveu utilizando o indicador da pegada hídrica donde foi baseado nos parâmetros produtivos do ano 2013. Como resultado neste trabalho identifica-se que a bacia do rio Guayuriba há um equilíbrio entre o uso e a disponibilidade da água verde. Mas no caso da água azul se apresenta déficit para os meses secos que se encontram em dezembro, janeiro, fevereiro e março, já que a demanda é maior do que a oferta hídrica, refletindo assim que não existe ordenamento da bacia hidrográfica tendo em conta a disponibilidade de água com a que conta a fonte hídrica.

Palavras-chave: gestão da água, uso da água, demanda e oferta hídrica, bacia hidrográfica.

Introducción

El agua es un recurso natural determinante para el desarrollo, ya que es esencial para la supervivencia y el bienestar humano; es un factor de producción en la mayoría de los sectores económicos, así como un activo ambiental y social (Martínez-Paz *et al.*, 2014; Pellicer-Martínez y Martínez-Paz, 2016). Se estima que cerca del 85% del agua usada a nivel mundial se utiliza en la producción agrícola y adicionalmente se espera que este porcentaje aumente como consecuencia del incremento constante de la población (Viala, 2008; Zeng *et al.*, 2012), es así que ya en algunas regiones del mundo se identificaron problemas con el recurso en términos de cantidad y calidad óptima para las necesidades de la población, la producción de alimentos, la industria y el sostenimiento de los sistemas naturales (Postel, 2000). En este sentido, Falkenmark y Rockström (2006) y Rosset *et al.*, (2011), proponen el establecimiento de políticas que permitan establecer un ordenamiento agrícola del territorio que tenga como objetivo fundamental aprovechar al máximo la oferta climática de las regiones, principalmente la oferta hídrica proveniente de las lluvias, y de esta manera disminuir la presión sobre los sistemas hídricos superficiales utilizados para el riego agrícola. La mayoría de los países promueven políticas agrarias en las cuales la construcción de infraestructura para riego es el eje fundamental (Pimentel *et al.*, 1997). Pero para Rockström *et al.*, (1999), a pesar de la importancia del agua como proveedor de servicios ecosistémicos, ésta ha sido descuidada en las políticas agrarias principalmente de los países en vías de desarrollo.

En respuesta a la necesidad de contar con herramientas que contribuyan a proveer información técnica que aporten para planificación del recurso hídrico de las cuencas, Hoekstra y Hung (2002), proponen el concepto de Huella Hídrica (HH) como un indicador de uso de agua, con resolución temporal y espacial explícita, expresada en términos volumétricos. La HH tiene tres componentes: verde, azul y gris, las cuales tienen implicaciones particulares en el análisis del uso del recurso (Hoekstra, 2009). La HH verde hace referencia al agua lluvia que se evapora o se incorpora durante un proceso de producción y la HH azul corresponde al agua superficial o subterránea que se evapora o incorpora en procesos de producción (Falkenmark, 2003), mientras que la HH gris se define como la cantidad de agua que se requiere para asimilar una 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 (Hoekstra *et al.*, 2011). A pesar de las críticas que ha tenido el concepto de huella hídrica desde que fue propuesto, este indicador se ha convertido en una herramienta para analizar la sostenibilidad de las múltiples actividades humanas sobre los recursos del planeta (Fereses *et al.*, 2017). Entendiendo que la sostenibilidad hace referencia al “desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades” concepto que fue definido por la Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas (1987), en este caso la sostenibilidad se refiere a que la permanencia de este tipo de sistemas de producción en la cuenca, y

que esta permanencia sea eficiente desde el punto de vista económico, social y ecosistémica.

En Colombia la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico plantea en una de las estrategias, la cuantificación de la demanda y calidad requerida del agua para el desarrollo de las actividades productivas en las cuencas hidrográficas (MAVDT, 2010). En este sentido, la HH es una herramienta útil para caracterizar la demanda de agua requerida por sectores de alto consumo del recurso, como el agrícola (Hoekstra *et al.*, 2011). En el estudio nacional del agua 2014, la HH para el sector agrícola de Colombia fue 61.857,42 Mm³/año, y específicamente para el departamento del Meta, calculada con información del año 2012, alcanzó para sus componentes azul y verde 443,2 Mm³/año y 4.084,6 Mm³/año, respectivamente (IDEAM, 2015). Aunque estos valores permiten tener referencias del sector a nivel nacional y departamental, aún es necesario generar información a escala de cuenca hidrográfica que contribuya en los procesos de gestión del recurso de manera local. En este sentido, el presente estudio tiene como finalidad evaluar la sostenibilidad de la HH verde y azul de los sistemas agrícolas de arroz y palma de aceite, los de mayor área cultivada y fundamentales en la dinámica socioeconómica de la cuenca del río Guayuriba, como herramienta de gestión integral del recurso hídrico a nivel local.

Materiales y métodos

En este estudio se toma como referencia el marco metodológico propuesto por la Red Internacional de Huella Hídrica (en Inglés Water Footprint Network, WFN) en su publicación “Manual de Evaluación de Huella Hídrica: setting the global standard” (The water footprint assessment manual; Hoekstra *et al.*, 2011). La evaluación de huella hídrica consta de cuatro fases, a saber: (1) definición de objetivos y alcance, (2) contabilización de la huella hídrica, (3) análisis de sostenibilidad de la huella hídrica y (4) formulación de estrategias de respuesta.

Área de estudio

El presente estudio se desarrolló en la cuenca del río Guayuriba, de acuerdo con la entidad regional ambiental CORMACARENA en el POMCA-2009, donde toma la cuenca desde la confluencia del río Blanco y río Negro, en el sector del casco urbano del municipio de Guayabetal (Cundinamarca) en las coordenadas 1.020.419 E y 956.895 N, hasta la desembocadura de la corriente del río Metica en las coordenadas 1.109.118 E y

924.096 N (Torres-Mora *et al.*, 2015), que recorre los departamentos de Meta y Cundinamarca y cubre un área de 76.040,77 hectáreas, donde para el Meta la participación corresponde al 95.65% del total, distribuidos en los municipios de Villavicencio con 19.978 hectáreas, Acacías con 39.242 hectáreas, San Carlos de Guaroa con 11.142 hectáreas y Puerto López con 2.368 hectáreas, y en el departamento de Cundinamarca el municipio de Guayabetal con 331 hectáreas.

En consideración a que el área de estudio es extensa y tiene características fisiográficas diferentes, fue necesario establecer áreas de menor tamaño y para esto se tomó la subcuenca como unidad de estudio. Esta división se realizó con un modelo digital de elevación a 30 m de la red de drenajes naturales, mediante la herramienta ArcGIS 10.1 (Figura 1).

Definición de objetivos y alcance

La huella hídrica estudiada fue la del sector agrícola y se focalizó en los componentes azul y verde de los cultivos de palma de aceite y de arroz para el año 2013, por ser los de mayor representatividad en la cuenca. La información de rendimiento corresponde al promedio anual durante el ciclo de vida del cultivo para la palma de aceite y para el arroz el promedio de la producción del ciclo en cada unidad de estudio. Para esta evaluación se tuvo en cuenta las cuatro fases propuestas por la WFN, donde se tomaron 13 subcuencas del río Guayuriba, las cuales presentaron estos dos cultivos, que fueron: 34-Río Guayuriba-Acacias Media, 35-Río Guayuriba-Villavicencio Media, 36-Caño Limones, 37-Caño La Mona, 38-Río Guayuriba-Villavicencio Baja, 39-Río Guayuriba-Acacias Baja, 40-Río Guayuriba-San Carlos de Guaroa Baja, 41-Caño Rico, 42-Caño Arrecifes, 43-Caño La Sierra, 44-Caño San Cristóbal, 45-Caño las Animas y 46-Río Guayuriba-Puerto López Baja.

Contabilización de las Huellas Hídricas verde y azul en las subcuencas de la cuenca del río Guayuriba

La huella hídrica agrícola de la cuenca del río Guayuriba corresponde a la sumatoria de la huella hídrica de cada subcuenca y esta fue calculada de acuerdo a la siguiente ecuación 1:

$$HH_{subcuenca} = \sum_{cultivos} RAC \times \sum_{cultivos} \text{Área cultivada} \quad (1)$$

Donde; Área cultivada hace referencia a las sumatorias de las áreas sembradas en los cultivos de arroz y palma de aceite en la subcuenca y RAC corresponde a la sumatoria de los requerimientos de agua azul y verde

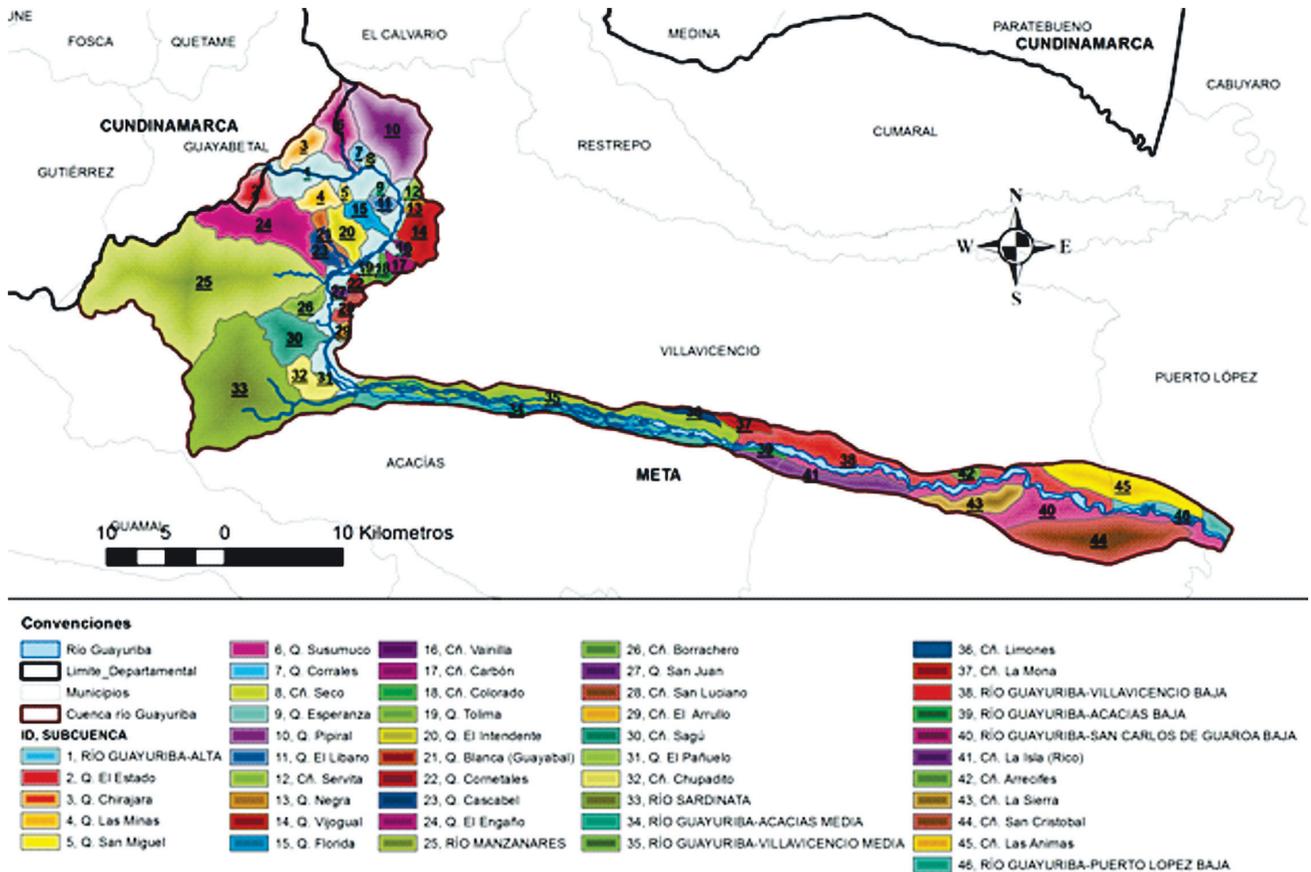


Figura 1. Unidades de estudio para el análisis de la huella hídrica en la cuenca del río Guayuriba.

de los cultivos ubicados en la subcuenca. El RAC se calculó mediante la ecuación 2:

$$RAC = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

Donde; el K_c es el coeficiente de evapotranspiración del cultivo tomado de Allen *et al.*, (2006), para el cultivo de arroz fue de 0,70 - 1,05 - 0,70 y para el cultivo de la palma de aceite de 0,95 - 0,95 - 0,95 y las etapas fenológicas fueron de 120 días y de 365 días, respectivamente. ET_0 fue calculada mediante el modelo de Penman-Monteith. Para la diferenciación entre RAC azul y verde, se toma la diferencia entre el RAC del cultivo y la precipitación efectiva, cuando el resultado es negativo, significa que el cultivo no requiere agua azul o de riego y solo se abastece con agua verde o lluvia (Ecuación 3).

$$RAC_{azul} = RAC - P_{efectiva} \quad (3)$$

Donde la $P_{efectiva}$ se relaciona con el agua que efectivamente llega al cultivo y en este caso se calculó a través del modelo USDA SCS (USDA Soil Conservation Service). Todos los cálculos se realizaron con el software CROPWAT 8.0 (FAO, 2010).

En la tabla 1, se presentan las variables que se tienen en cuenta dentro del modelo para la aplicación del método de Penman-Monteith.

Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica

Balace de oferta-demanda del recurso hídrico

Para realizar este análisis se siguió los lineamientos de la metodología propuestos por Hoekstra *et al.*, (2011), donde se tiene en cuenta la oferta y demanda del recurso hídrico. A partir de esto se calculó el índice de escasez hídrico para establecer la disponibilidad de agua en la zona de estudio (Ecuación 4).

$$E_{mensual} = \frac{\sum HH_{mensual}}{Oferta\ ambiental\ y\ regulada} \quad (4)$$

Para el análisis de sostenibilidad de la huella hídrica se comparó la demanda y oferta del recurso, donde la demanda corresponde a la huella hídrica de los cultivos de palma de aceite y arroz y la oferta se asocia a la disponibilidad de agua en cada unidad de estudio. Para el caso del análisis de la HH_{azul} se determinó la

oferta natural de agua superficial mediante la utilización del modelo hidrológico GR2M cuyo objetivo es la simulación continua de la serie histórica de caudales a escala temporal mensual en las unidades de estudio de la cuenca del río Guayuriba (Mouelhi *et al.*, 2006) y a éste se le descontó el caudal ecológico de la microcuenca, que permitió establecer la disponibilidad de agua azul (DAA) u oferta hídrica azul (Ecuación 5).

$$DAA_{\text{Volumen/mes}} = \text{Oferta natural}_{\text{Volumen/mes}} - \text{Caudal ecológico}_{\text{Volumen/mes}} \quad (5)$$

Tabla 1. Fuente e información necesaria para el cálculo de la huella hídrica en la cuenca del río Guayuriba.

Variables	Descripción
Clima	Los datos climáticos de temperatura máxima y mínima, humedad relativa, viento y radiación solar, se tomaron de la estación meteorológica Vanguardia (35035020-IDEAM).
Precipitación	Se tomaron promedios mensuales de los últimos 20 años en las estaciones: Acacias (35010020-IDEAM), Unillanos (35035070-IDEAM), La libertad (35025020-IDEAM), Pompeya (35020060-IDEAM) y Nare (35010080-IDEAM).
Cultivo	Profundidad radicular para el cultivo de arroz fue de 0,5-0,1 y para el cultivo de la palma de 1,10m, la fracción de agotamiento crítico (p) con la que se trabajó fue 0,5 para el cultivo de arroz y 0,65 para el cultivo de palma, el factor de respuesta de la productividad del cultivo (K_y) de fuente secundaria (Allen <i>et al.</i> , 2006). La altura con la que se trabajó fue de 1 m para el arroz y 8 m para la palma, datos que fueron reportados por los agricultores de la zona.
Suelo	"Estudio general de suelos y zonificación de tierras, departamento del Meta" realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC (2004). Los parámetros utilizados fueron: agua disponible total (ADT), tasa máxima de infiltración, Profundidad radicular máxima y agotamiento inicial de la humedad del suelo.

En el análisis de la HHverde se tuvo en cuenta la disponibilidad de agua verde (DAV) mensual, definida como la evapotranspiración total del agua lluvia del área de estudio (ET_{verde}), menos la evapotranspiración de las áreas de reserva de vegetación natural (ET_{reser}), menos la evapotranspiración de las áreas no productivas (ET_{inprod}) (Ecuación 6).

$$DAV = ET_{\text{verde}} - ET_{\text{reser}} - ET_{\text{inprod}} \quad [\text{Volumen} / \text{mes}] \quad (6)$$

Resultados y discusión

Huella hídrica agrícola de la cuenca del Guayuriba

A continuación se hace una breve descripción de los sistemas agrícolas presentes en la cuenca del río Guayuriba, tomando como referencia las zonas alta, media y baja. La zona alta se caracteriza por ser de pendientes inclinadas, por presentar la mayoría de tributarios del canal principal del río Guayuriba y por sistemas productivos de tipo *pan coger* con extensiones no mayores a una hectárea, típicos de agricultura familiar de áreas montañosa (Schejtman, 2008), con una precipitación promedio del orden de 5000 mm/año (Torres-Mora *et al.*, 2015), lo que garantiza la abundancia del recurso. La cuenca en su zona media y baja se caracterizan por tener pendientes leves y corresponde al 36% del área total y es allí donde se concentran los cultivos de palma de aceite (*Elaeis sp.*) y de arroz (*Oryza sativa L.*) sistema de siembra secano. La tabla 2 presenta las unidades de estudio con sus áreas cultivadas y sus correspondientes HHazul y HHverde.

Uno de los resultados de esta investigación nos muestra que el cultivo de palma de aceite (*Elaeis sp.*) es el responsable de la HHazul, que alcanzó los 41'541.504 m³/año, debido a que este cultivo tiene un sistema de riego permanente en la zona de estudio, de igual manera se resalta que para estos sistemas de riegos se realizan captaciones de agua del cauce principal del río Guayuriba por medio de canales que desembocan en el río Acacias, causando así un trasvase entre cuencas. Cabe aclarar que el volumen de agua captado es solo para el riego del cultivo de palma de aceite (*Elaeis sp.*) en la zona. Para el caso de la HHverde de los cultivos en estudio para el año 2013 se alcanzaron los 49'510.056 m³/año, equivalente al 54,4% para el cultivo de palma y 45,6% para el cultivo arroz (Figura 2).

Huella hídrica verde

La HHverde en la cuenca del río Guayuriba para el año 2013 fue de 49.217.491 m³/año, correspondientes a un total de 4.536 ha del cultivo de palma y 3.198 ha del cultivo de arroz. Se destaca que el cultivo de palma de aceite fue el mayor consumidor de agua con 9.030 m³/ha/año (Figura 3) y el de arroz alcanzó los 2.670 m³/ha/año (Figura 4), consumos por debajo a los presentados en el Estudio Nacional del Agua 2014 -ENA 2014- donde para los mismos cultivos se mostraron promedios de 16.907 m³/ha/año y 3.394 m³/ha/año respectivamente (IDEAM, 2015). En el caso de la cuenca del Guayuriba las diferencias en la HHverde de los dos cultivos es originada debido a que el de palma de aceite es permanente, mientras que el cultivo de arroz

Tabla 2. Ubicación y las áreas cultivadas con palma de aceite (*Eleais sp*) y arroz (*Oryza sativa L*) en la cuenca del Guayuriba.

ID	Área unidad de estudio Ha	Palma de aceite (<i>Eleais sp</i>)			Arroz (<i>Oryza sativa L</i>)	
		Área	HH Verde m ³ /año	HH Azul m ³ /año	Área	HH Verde m ³ /año
		Ha	Año	Año	Ha	Año
34	3.005	354	3.540.250	15.887.930	37	103.862
35	3.933	1	10.335	2.582	664	1.726.837
36	286	0	292.565	0	0,3075	0
37	451	72	679.118	199.794	152	391.350
38	4.380	109	1.006.310	322.720	1.123	2.976.503
39	247	36	339.564	99.899	0	0
40	4.519	1.639	14.705.613	17.946.349	456	1.214.117
41	1.556	1.101	9.901.252	3.307.604	0	0
42	214	0	0	0	9	24.301
43	1.237	523	4.142.084	1.573.496	127	354.026
44	4.186	313	2.827.844	983.929	311	862.690
45	2.523	187	1.704.228	583.836	319	886.894
46	942	201	1.820.311	633.365	0	0
Total	27.479	4.536	40.969.474	41.541.504	3.198	8.540.580

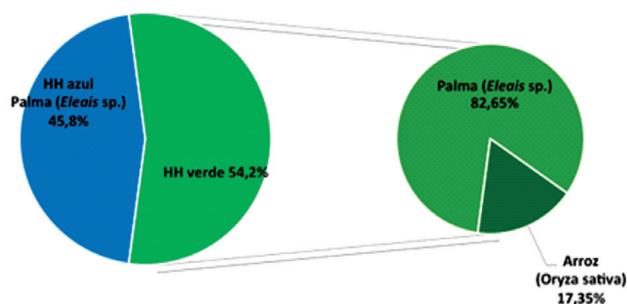


Figura 2. Distribución porcentual de la huella hídrica en los cultivos de palma de aceite (*Eleais sp.*) y de arroz (*Oryza sativa L.*) en la cuenca del Guayuriba en (m³/año).

se desarrolla solamente durante cuatro meses del año (Figura 3).

Los mayores volúmenes de HH_{verde} en la zona de estudio se presentan en los meses húmedos y los menores volúmenes en los meses secos, comprendido en el periodo de diciembre a marzo, este es un comportamiento que se da para los cultivos de palma de aceite y arroz, meses donde los cultivos no tendrán disponible agua para el desarrollo fenológico y se requerirá optar por un sistema de riego para suplir sus requeri-

mientos. Las unidades de estudio que presentan la mayor HH_{verde} corresponden a *Río Guayuriba San Carlos de Guaroa Baja* (40), con un área sembrada de palma de aceite de 1.639 Ha y 456 Ha de arroz y *Caño Rico* (41) con 1.101 hectáreas de palma de aceite.

Huella hídrica azul

La HH_{azul} se restringe únicamente al cultivo de palma de aceite, debido a que el cultivo de arroz identificado en el área de estudio es de tipo seco, es decir

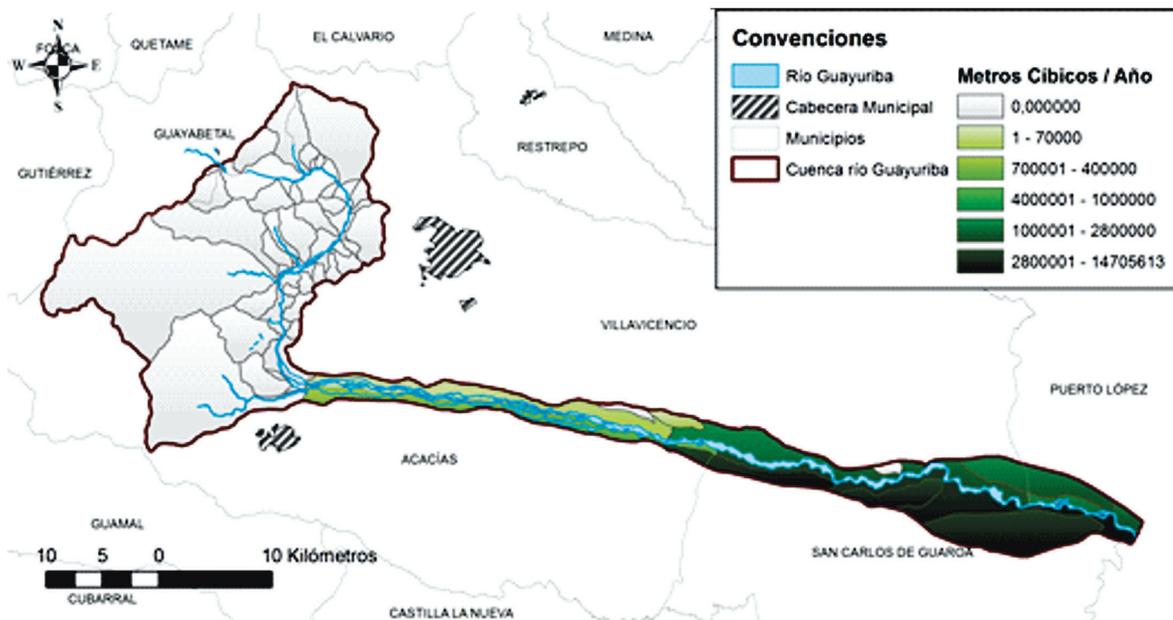


Figura 3. Distribución espacial de la huella hídrica verde en la cuenca del río Guayuriba, Cultivo de palma de aceite



Figura 4. Distribución espacial de la huella hídrica verde en la cuenca del río Guayuriba, cultivo de arroz seco

que se surte del recurso a través de la lluvia. En este sentido la HH_{azul} fue de 13.461.072 m³/año (Figura 5). El mayor volumen de HH_{azul} se presenta en el mes de Enero. Sin embargo, la demanda de riego inicia en el mes de noviembre para garantizar el recurso en la época seca y asegurar así el óptimo desarrollo fisiológico y productivo del cultivo de palma de aceite (Mejía, 2000). La HH_{azul} por hectárea estuvo en 2.967 m³ y para la misma cuenca según el ENA 2014, este cultivo

requiere de 2.141 m³/ha (IDEAM, 2015). La diferencia entre ambos estudios podría asociarse a que los datos utilizados para la cuenca del Guayuriba son específicos para cada una de las unidades de estudio e implican consumos puntuales de acuerdo a las condiciones edáficas, climáticas y prácticas culturales del cultivo. Además se identificó que las zonas donde mayor uso hay sobre el recurso hídrico azul son las unidades de estudio *Río Guayuriba Acacias Media* (34) y *Río Gua-*

uriba San Carlos de Guaroa Baja (40), debido a que son las unidades donde se encuentran las captaciones para riego sin que haya flujo de retorno a la cuenca.

Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica: Balance de oferta-demanda del recurso hídrico para la huella hídrica verde

A través del análisis de oferta - demanda se identificó el comportamiento de la disponibilidad de agua verde (DAV) y la huella hídrica verde (HH_{Verde}), en la figura

6, se espacializa el índice de escasez para la unidad de estudio Caño rico (41) se encuentra entre 1-10 ya que la HH_{Verde} supera la DAV en los meses de febrero, abril y junio, siendo la diferencia de volúmenes entre lo ofertado y lo demandado 142.249 m³, que se puede explicar debido a que el 70% del área de esta cuenca se encuentra sembrada en palma de aceite, cultivo que tiene altos requerimientos hídricos (Mejía, 2000), además es una subcuenca. El aprovechamiento del agua lluvia o agua verde en la producción es fundamental, en consideración que esta fuente no afecta



Figura 5. Distribución espacial de la huella hídrica azul del cultivo de palma de aceite en la cuenca del río Guayuriba.

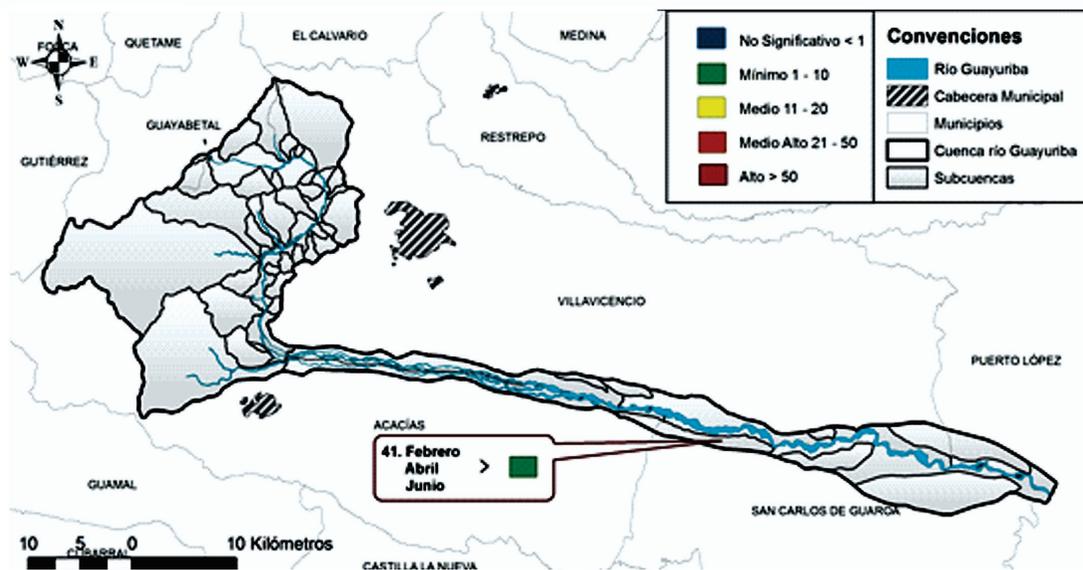


Figura 6. Mapa de escasez de agua verde por subcuenca

directamente los recursos hídricos superficiales ni subterráneos (Falkenmark y Rockström, 2006). Al realizar los balances hídricos en cada una de las subcuencas se identifica que solo en la subcuenca Caño Isla (Rico) (41), la demanda del agua verde supera la oferta en dos meses del año que son abril y junio, como se muestra en la figura 7.

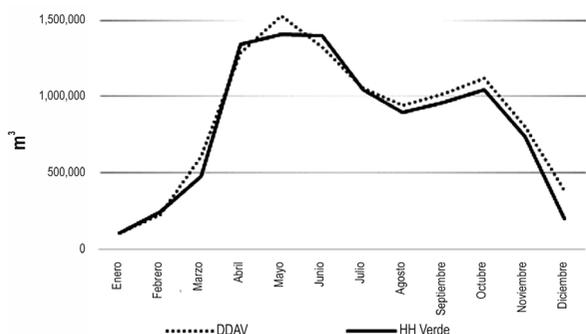


Figura 7. Balance hídrico de la oferta (DDV) y demanda (HHVerde) subcuenca Caño Isla (Rico) (41).

**Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica:
Balance de oferta-demanda del recurso hídrico para
la huella hídrica azul**

El índice escasez para la huella hídrica azul se da para ocho unidades de estudio que son Caño La Mona (37), río Guayuriba-Acacias Bajo (39), río Guayuriba-

San Carlos De Guaroa Baja (40), caño Rico (41), caño La Sierra (43), caño San Cristóbal (44), caño las Animas (45) y río Guayuriba-Puerto López Baja (46), déficit que se da para los meses secos que presenta la zona, en la figura 8 se muestra cuáles son los meses y los niveles de escasez de agua azul en las subcuencas.

De igual manera en el balance de la huella hídrica azul se evidencia los déficit de agua en seis unidades de estudio asociada a la época seca del año (enero, febrero y marzo). En la Figura 9, se aprecian los balances hídricos de cada una de las unidades de estudio, donde se encuentran los volúmenes de la oferta y la demanda de cada una de las unidades. Sin embargo, en dos unidades se presentan aportes de agua adicionales a la oferta natural provenientes de producción de hidrocarburos, denominadas en este estudio como agua fósil (AF), la cual se encuentra en profundidades de donde no podría salir de forma natural y por lo tanto no hace parte del balance hidrológico. Estos aportes se localizan en las unidades *Río Guayuriba-Acacias Media* (34) y *Río Guayuriba-Villavicencio Media* (35) y permiten disminuir el estrés hídrico en estas zonas. En función del balance hídrico se puede decir que estos aportes son positivos para la cuenca, sin embargo, es necesario considerar los aspectos fisicoquímicos de este tipo de agua, que permitan generar una conclusión más amplia sobre los impactos ambientales que éstas pueden ocasionar (Figura 9).

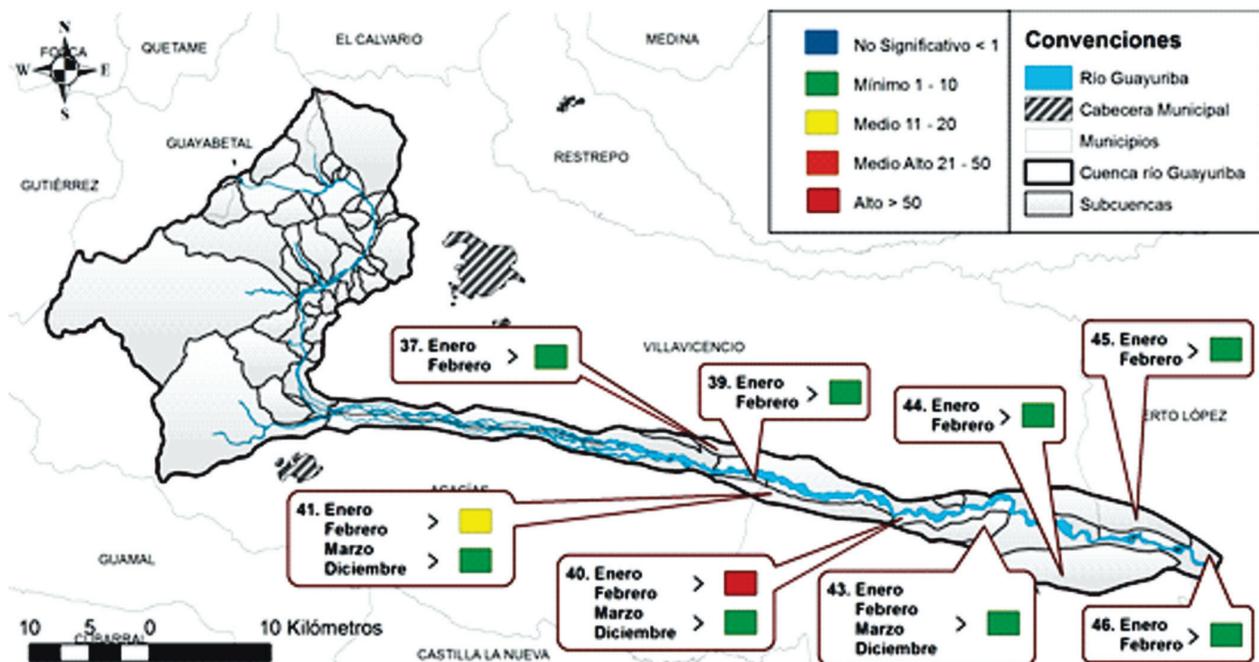


Figura 8. Mapa de escasez de agua azul por subcuenca

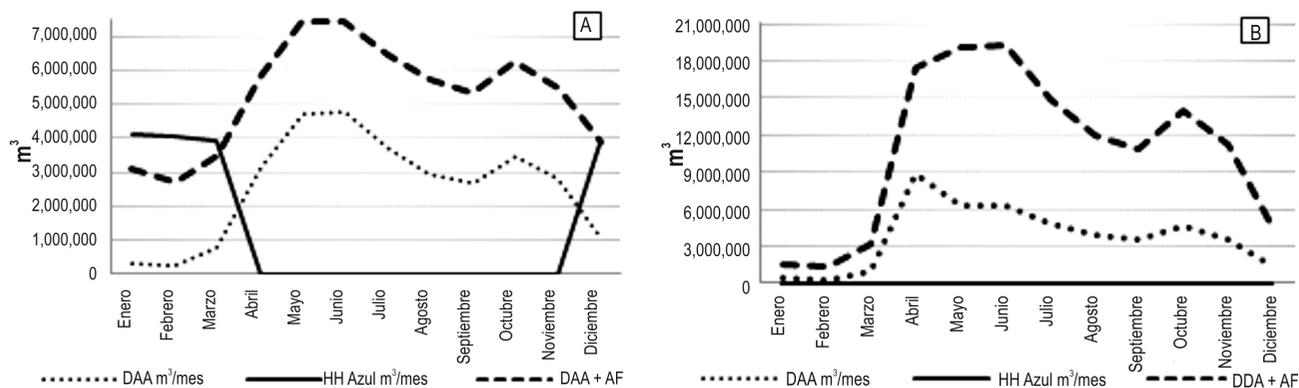


Figura 9. A) Río Guayuriba-Acacias Media (34) + “Agua fósil AF”. **B)** Río Guayuriba-Villavicencio Media (35) + “Agua fósil AF”

Al realizar el balance hídrico de oferta y demanda del agua azul en la subcuencas se identifica que cuando la demanda supera la oferta es en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, que son los que se identifican como la época seca de la zona. En la figura 10, se muestran las subcuencas donde se presenta un desequilibrio hídrico debido a que el agua que se requiere para suplir las necesidades de los cultivos supera la oferta de agua azul con la que cuenta cada unidad de estudio.

Finalmente la aplicación de la evaluación de huella hídrica muestra que es una herramienta importante para la gestión y planificación de los recursos hídricos, ya que proporciona información sobre el consumo, disponibilidad del agua y los impactos sobre el recurso (Carmona *et al.*, 2017). Es importante resaltar que la planificación de cuencas se centra exclusivamente en el componente azul y deja de lado el componente verde, cuyo consumo suele ser mayoritario en cualquier cuenca hidrográfica y que es una oferta que sostiene los procesos productivos durante la mayoría de los meses del año y es un agua que no se tiene en cuenta en ninguna planificación. Además permiten identificar las conexiones entre los actores principales del uso del agua y a su vez generar visiones completas sobre el estado actual y posibles cambios futuros del recurso hídrico en una zona específica.

A partir de los análisis de huella hídrica, estas se convierten en un elemento esencial en la formulación de planes de ordenamiento del territorio que tienen como finalidad ser un instrumento fundamental para la eficiencia ecológica en la ocupación, el uso y el manejo ecológico de cada unidad territorial urbana y rural (Ramírez, 2004). En Colombia la Constitución Política acogiendo principios internacionales de derecho ambiental en su artículo 80 dispone el desarrollo sostenible como elemento de planificación manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, el artículo 58 contempla una función ecológica de la propiedad

y el artículo 288 la articulación institucional entre el nivel territorial y nacional para lograr un adecuado ordenamiento territorial. Estos postulados constitucionales han sido desarrollados mediante las leyes 388 de 1997 la cual fija como uno de sus objetivos velar por la protección del medio ambiente y la ley 1454 de 2011 que prevé como pilar estructural del ordenamiento territorial; el crecimiento económico, la sostenibilidad fiscal, la equidad social y la sostenibilidad ambiental.

De este modo se puede ver que si bien la motivación de las normas de ordenamiento territorial han sido el uso racional de los recursos naturales, en la práctica se evidencia que ello no se ha materializado, pues para la ordenación y planificación del uso del suelo rural no se ha tenido como criterio determinante la oferta de servicios ecosistémicos, para este caso el recurso agua.

Conclusiones

Los resultados de este estudio muestran que existe un equilibrio entre el uso y la disponibilidad del agua verde en la zona de estudio, situación que no se presenta con el agua azul, ya que en los meses secos (diciembre, enero, febrero y marzo) la demanda supera la oferta hídrica azul con la que se cuenta, haciendo esto que se presenten puntos críticos y se interfiera en los procesos naturales y sociales de la cuenca.

El agua superficial dentro de la zona de estudio es usada para actividades agrícolas, para suplir necesidades en cuencas vecinas y adicionalmente tiene aportes de agua fósil, lo que genera cambios en la oferta hídrica, y por lo tanto deben ser tenidas en cuenta para la formulación de estrategias de control y de prevención frente al uso y manejo del recurso hídrico, dentro de los planes de gestión del agua en la cuenca.

La aplicación de la evaluación de huella hídrica muestra que es una herramienta importante para la gestión

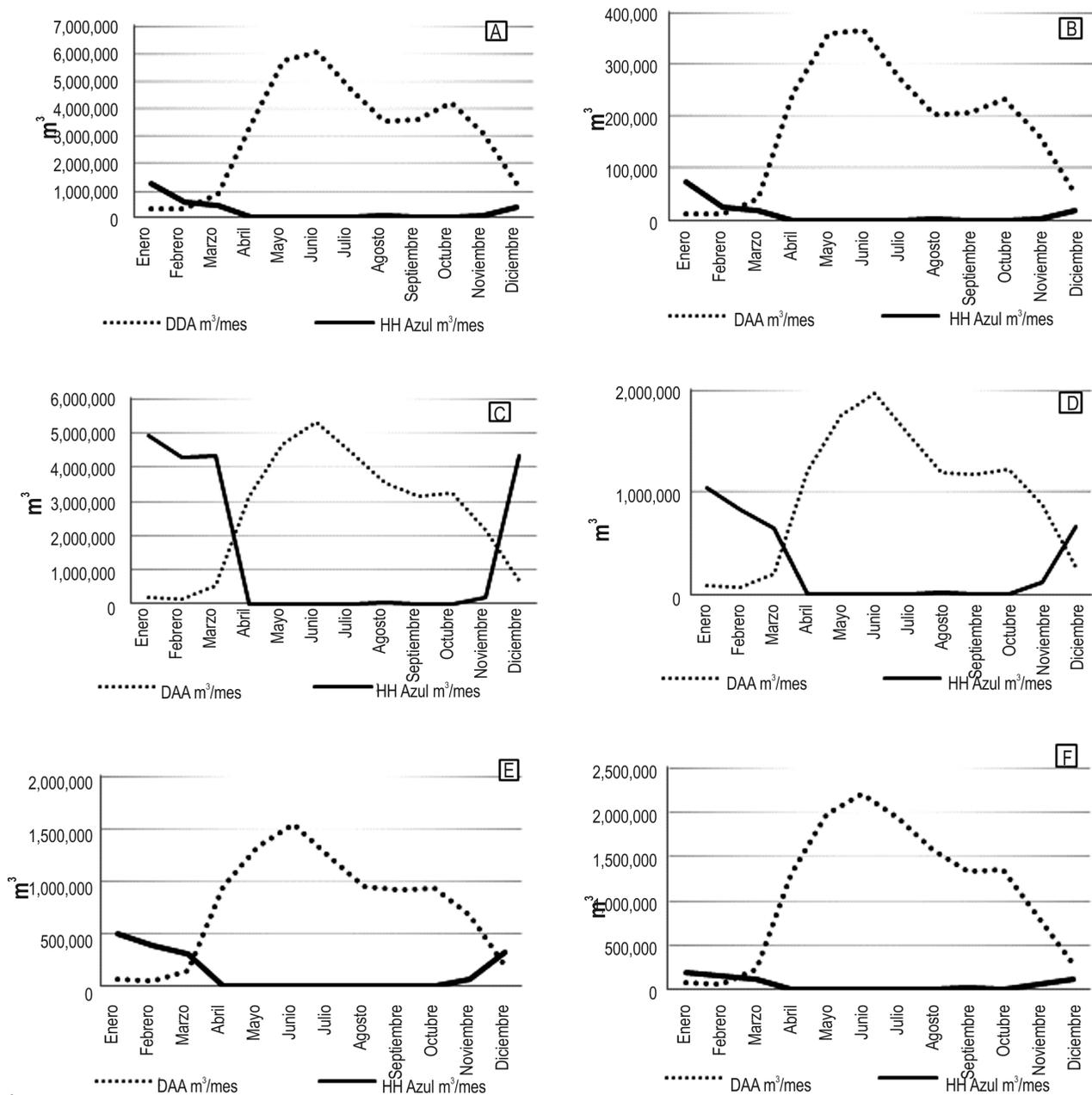


Figura 10. Balance hídrico de la oferta (DDA) y demanda (HH_{Azul}) subcuencas río Guayuriba: **A)** Caño La Mona (37). **B)** Río Guayuriba-Acacias Bajo (39). **C)** Río Guayuriba-San Carlos De Guaroa Baja (40). **D)** Caño La Isla (Rico) (41). **E)** Caño La Sierra (43). **F)** Río Guayuriba-Puerto López Baja (46)

y planificación del recurso hídrico, ya que proporciona información sobre el consumo y disponibilidad. Es importante resaltar que la planificación de las cuencas se focaliza exclusivamente en el componente azul y deja de lado el componente verde, cuyo consumo suele ser mayor en cualquier cuenca hidrográfica y es una oferta que sostiene los procesos productivos durante la mayoría de los meses del año y no es tenida en cuenta en

ningún proceso de planificación, estos estudios además permiten identificar el estado actual y posibles cambios futuros del recurso hídrico en una zona específica.

Agradecimientos

Al apoyo financiero del convenio N° 5211592, ECOPE-TROL S.A., - UNILLANOS "Proyecto Cuencas" e Instituto

Referencias

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO, Roma (Italia).
- Carmona LG, Whiting K, Carrasco A. The Water Footprint of Heavy Oil Extraction in Colombia: A Case Study. *Water*. 2017;9(5):340.
- Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas (1987). Informe de la Comisión de Burtland.
- Falkenmark M. Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 2003;358(1440):2037-2049. <http://doi.org/10.1098/rstb.2003.1386>
- Falkenmark M, Rockström J. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. *Journal of water resources planning and management*. 2006;132(3):129-132.
- Fereres E, Villalobos FJ, Orgaz F, Minguéz MI, Van Halsema G, Perry CJ. 2017. Commentary: On the water footprint as an indicator of water use in food production.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO, (2010). CROPWAT 8.0 Model, Rome, Italy, available at: <http://www.fao.org/nr/water/infores/databases/cropwat.html>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO, (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma.
- Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen MM. 2011. *The Water Footprint Assessment Manual*. Febrero 2011. <http://doi.org/978-1-84971-279-8>.
- Hoekstra AY, Hung PQ. 2002. 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, Delft, The Netherlands.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM, (2015). Estudio Nacional del 2014. Bogotá D C.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. 2004. Estudio General y Zonificación de tierras, Departamento del Meta.
- Martínez-Paz J, Pellicer-Martínez F, Colino J. A probabilistic approach for the socioeconomic assessment of urban river rehabilitation projects. *Land Use Policy*, 2014;36:468-477.
- MAVDT. 2010. Política Nacional para la Gestión del Recurso Hídrico. Bogotá D C: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/documentos/5774_240610_libro_po_nal_rec_hidrico.pdf.
- Mejía J. Consumo de agua por la palma de aceite y efectos del riego sobre la producción de racimos: una revisión de literatura. *Revista Palmas*. 2000;21(1):51-58.
- Mouelhi S, Michel C, Perrin C, Andréassian V. Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *J Hydrol*. 2006;318(1):200-214.
- Pellicer-Martínez F, Martínez-Paz JM. The Water Footprint as an indicator of environmental sustainability in water use at the river basin level. *Science of the Total Environment*. 2016;571:561-574.
- Pimentel D, Houser J, Preiss E, White O, Fang H, Mesnick L, Barsky T, Tariche S, Shreck J, Alpert S. Water Resources: Agriculture, the Environment, and Society; An assessment of the status of water resources. *BioScience*. 1997;47(2): 97-106.
- Postel, S. Entering an era of water scarcity: the challenges ahead. *Ecological application*. 2000;10(4):941-948.
- Ramírez R. El ordenamiento territorial municipal: una aproximación desde Colombia. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*. 2004;7(13):31-36.
- Rockström J, Gordon L, Folke C, Falkenmark M, Engwall M. Linkages among water vapor flows, food production, and terrestrial ecosystem services. *Conservation ecology*. 1999;3(2):5.
- Schejtman A. 2008. Alcances sobre la agricultura familiar en América Latina. *Presentado en: Diálogo Rural Iberoamericano: Crisis Alimentaria y Territorios Rurales (San Salvador, SV, septiembre)*.
- Torres-Mora MA, Caro-Caro CI, Ramírez-Gil H, Parada-Guevara SL, Trujillo-González JM. et al. 2015. Cuenca alta del río Meta: Una mirada socioambiental a los ríos Guayuriba y Ocoa y al caño Quenane – Quenanito. 1a ed. Villavicencio. Colombia. Pp.180
- Viala, E. Water for food, water for life a comprehensive assessment of water management in agriculture. *Irrigation and Drainage Systems*. 2008;22(1):127-129.
- Zeng Z, Liu J, Koeneman PH, Zarate E, Hoekstra Y. 2012. Assessing water footprint at river basin level: A case study for the Heihe River Basin in northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*.