



Determinación experimental de la Huella Hídrica del Café de Colombia

Nelson Rodríguez V. ■ Laura Vanessa Quintero Y. ■ Ángel de Miguel G.
Miguel Antonio Romero S.

Cenicafé
Centro Nacional de Investigaciones de Café



Determinación experimental de la Huella Hídrica del Café de Colombia

Nelson Rodríguez V.* Laura Vanessa Quintero Y. ** Ángel de Miguel G.***
Miguel Antonio Romero S.****

* Nelson Rodríguez V., Investigador Científico III, Poscosecha. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-0897-4013>

** Laura Vanessa Quintero Y., Investigador Científico I, Poscosecha. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-9982-7790>

*** Ángel de Miguel G., Investigador. Wageningen UR. Environmental Research, Water and Food

**** Miguel Antonio Romero S., Ingeniero Agrónomo, MSc en Ciencias Agrarias. Research Team Leader. Multifunctional Landscapes Research Area. Alliance of Bioversity International and CIAT

Como citar:

Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L., de Miguel-García, A., & Romero-Sánchez, M.A. (2024). Determinación experimental de la Huella Hídrica del Café de Colombia. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0053>



Comité Nacional

Ministro de Hacienda y Crédito Público
Ricardo Bonilla González

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural
Martha Viviana Carvajalino Villegas

Ministro de Comercio, Industria y Turismo
Luis Carlos Reyes Hernández

Director del Departamento Nacional de Planeación
Alexander López

Representante del Gobierno en Asuntos Cafeteros
Rogelio Andrés Rodríguez Castillo

Representantes Gremiales

Período 1° enero/2023 - 31 diciembre/2026

Jorge Alberto Posada Saldarriaga (Antioquia)

José Alirio Barreto Buitrago (Boyacá)

Eugenio Vélez Uribe (Caldas)

Danilo Reinaldo Vivas Ramos (Cauca)

Juan Camilo Villazón Tafur (Cesar-Guajira)

Javier Bohórquez Bohórquez (Cundinamarca)

Ruber Bustos Ramírez (Huila)

Javier Mauricio Tovar Casas (Magdalena)

Jesús Armando Benavides Portilla (Nariño)

Armando Amaya Álvarez (Norte de Santander)

Carlos Alberto Cardona Cardona (Quindío)

Luis Miguel Ramírez Colorado (Risaralda)

Héctor Santos Galvis (Santander)

Carlos Sánchez Serrano (Tolima)

Camilo Restrepo Osorio (Valle)

Gerente General

Germán Alberto Bahamón Jaramillo

Gerente de Operaciones

Carlos Arturo Azuero Perdomo

Gerente Administrativo y Financiero

Reynaldo Díaz Medina

Gerente Comercial

Esteban Ordoñez Simmonds

Gerente Técnico

Gerardo Montenegro Paz

Director Investigación Científica y Tecnológica

Álvaro León Gaitán Bustamante

Créditos

Comité Editorial

Marco Aurelio Cristancho A.
Ph.D. Microbiólogo. Fitopatología, Cenicafe

Carmenza Esther Góngora B.
Ph.D. Microbióloga. Entomología, Cenicafe

Aída Esther Peñuela M.
Ph.D. Ing. Alimentos. Poscosecha, Cenicafe

Diana María Molina V.
Ph.D. Bacterióloga. Mejoramiento Genético, Cenicafe

Luis Fernando Salazar G.
Ph.D. Ing. Agrónomo. Suelos, Cenicafe

Sandra Milena Marín L.
Secretaría Técnica Comité Editorial, revisión de textos y corrección de estilo M.Sc., Esp., Ing. Agrónoma. Divulgación y Transferencia, Cenicafe

Diseño y diagramación

Carmenza Bacca R.
Óscar Jaime Loaiza E.

Fotografías

Archivo Cenicafe

Impresión

ISBN 978-958-8490-73-1
ISBN 978-958-8490-74-8 (En línea)
DOI 10.38141/cenbook-0053

2024 - FNC - Cenicafe



Contenido

Presentación	5
Introducción	7
Generalidades	11
Objetivos y alcance	25
Metodología	27
Resultados y discusión	43
Consideraciones finales	179
Anexos	187
Literatura citada	191

Agradecimientos

Los autores expresan los agradecimientos a las siguientes personas, cuya contribución fue fundamental para alcanzar los objetivos planteados.

Ing. Rodrigo Calderón Correa. Oficina Central FNC.

Ing. Jhon Félix Trejos Pinzón. Coordinador Estación Experimental Naranjal. Disciplina Experimentación. Cenicafé.

Ing. Carlos Mario Ospina Penagos (Coordinador de la Estación Experimental El Rosario hasta el 16 de abril del 2023). Disciplina Experimentación. Cenicafé.

Ing. Hernán Darío Menza Franco. Coordinador Estación Experimental El Tambo. Disciplina Experimentación. Cenicafé.

Ing. Luz Adriana Lince Salazar. Investigador Científico I. Disciplina de Suelos. Cenicafé.

Ing. Ninibeth Gibelli Sarmiento Herrera. Asistente de Investigación. Disciplina Agroclimatología, Cenicafé.

Ing. José Raúl Rendón Sáenz. Investigador Científico I. Disciplina de Fitotecnia. Cenicafé.

Aux. Samuel Antonio Castañeda. Disciplina Poscosecha. Cenicafé.

Dr. Wouter Wolters, Wageningen UR - Integrated Water Management.

Dra. Laura Miguel Ayala, Wageningen UR - Impact Assessment Researcher.

Dra. Marcela Quintero, Associate Director General, Research Strategy, and Innovation, Alliance of Bioversity International and the International Center for Tropical Agriculture (CIAT)

Dr. Daniel Chico Zamanillo, actualmente technical manager – water reporting at cdp -global environmental reporting system, quien en las fases iniciales del proyecto hacía parte del equipo de la Water Footprint Network - WFN.

Presentación

La caficultura colombiana ha sido históricamente un pilar fundamental para el desarrollo económico y social agrícola del país, destacándose por su integración de prácticas sostenibles desde su fundación en 1927. A lo largo de los años, ha logrado combinar la sostenibilidad económica, social y ambiental, respaldada por una sólida base de investigación científica que ha orientado tanto los enfoques macroscópicos a nivel regional como las decisiones microgeográficas relacionadas con cada finca productora. Este enfoque ha permitido que Colombia se distinga mundialmente por la calidad de su café, cultivado en una diversidad de fincas distribuidas a lo largo de las zonas cafeteras del Norte, Centro y Sur del país.

Hoy en día, el contexto ha cambiado: la creciente conciencia sobre la importancia de proteger los recursos naturales no solo busca garantizar la producción futura de café, sino también responder a los requerimientos legales nacionales e internacionales, y atender las demandas de consumidores que valoran cada vez más los impactos ambientales en sus decisiones de compra. En este escenario, resulta imperativo que el desarrollo económico de la caficultura y la conservación ambiental avancen de manera conjunta en las prácticas de manejo agronómico y beneficio del café. Es en este contexto donde conceptos emergentes como la Agricultura Regenerativa, la Bioeconomía Circular y la Acción Climática se han integrado a la caficultura. Si bien muchas de las prácticas asociadas a estos conceptos ya son conocidas por los productores colombianos, es necesario proporcionar una base técnica sólida que permita cuantificar y justificar los beneficios ambientales de estas prácticas, evaluando sus efectos en los ecosistemas y su eficiencia en la conservación de los recursos naturales. Solo así podrán ser adoptadas de manera generalizada y reconocidas en el mercado, contribuyendo a reducir la huella ambiental del café colombiano. En este sentido, el agua junto con el aire, el suelo y la biodiversidad, es uno de los recursos clave en el enfoque de sostenibilidad aplicado a la producción de café.

A lo largo de sus 86 años de trayectoria, el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) ha liderado la protección y el uso racional de estos recursos, contribuyendo al bienestar de las fincas cafeteras y a la conservación de los ecosistemas montañosos y de las vertientes del país, donde se cultiva el café arábigo.

La determinación técnica de la Huella Hídrica del café en Colombia es un paso fundamental para cuantificar con precisión el uso de este recurso por parte de la principal actividad agrícola del

país. Además, permite generar modelos predictivos que evalúen los impactos de los cambios climáticos y las nuevas prácticas agrícolas, y cómo estas afectarán los sistemas de producción y las demandas comerciales.

Es por ello que la obra “Determinación Experimental de la Huella Hídrica del Café en Colombia” se convierte en una herramienta clave para la formulación de políticas, el desarrollo de tecnologías innovadoras y la implementación de prácticas sostenibles en todas las etapas del cultivo de café, desde la germinación y el almácigo hasta la cosecha, el beneficio del grano y el tratamiento de las aguas residuales generadas durante el proceso. Como señalan los autores, el aumento en la productividad, al generar mayores rendimientos de café pergamino seco por hectárea, resulta en una disminución proporcional de la huella hídrica, lo que refuerza la importancia de adoptar estrategias que promuevan Más Agronomía, Más Productividad y Más Calidad. Estas incluyen el uso de variedades mejoradas, la siembra en altas densidades, la gestión de cafetales jóvenes, la optimización de luminosidad, el uso racional de fertilizantes y la implementación de un beneficio ecológico que contemple la descontaminación de las aguas residuales.

La medición de la huella hídrica del café no solo es una herramienta técnica vital para la sostenibilidad de la caficultura colombiana, sino también un distintivo que refuerza el liderazgo del Café de Colombia en el ámbito global como un producto responsable y respetuoso con el medio ambiente. Estas investigaciones contribuyen a consolidar el posicionamiento del café colombiano como un referente mundial en la producción de café sostenible.

Álvaro Gaitán
Director Cenicafé

Introducción

El agua es un elemento fundamental en la producción del café en Colombia, por ello la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia a través del Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé, mantiene una investigación permanente tendiente a su protección en las microcuencas cafeteras, mediante la aplicación de una política de gestión integral del recurso hídrico. Esta estrategia incluye programas como: *el uso eficiente y ahorro de agua* (PUEAA), *reforestación con especies nativas* que contribuyan a la estabilización del balance hídrico y a la reducción de la erosión del suelo, *manejo integrado del suelo* con énfasis en prácticas de conservación, especialmente en las laderas, donde se encuentra establecida la caficultura, que buscan mantener la capacidad de producción del suelo y conservar su fertilidad natural a través del tiempo. Teniendo en cuenta lo anterior, se evita incrementar el uso de fertilizantes químicos y su lixiviación, que es causante de la presencia de nitratos, sulfatos y fosfatos en los cuerpos de agua, *el manejo integrado de plagas y enfermedades del café* que es un método ecológicamente orientado, que utiliza técnicas de control cultural, biológico y químico, combinadas armónicamente y considerando los niveles económicos de daño, para establecer el momento oportuno para realizar el control. Este modelo ha permitido minimizar la aplicación de agroquímicos y, por consiguiente, su presencia en el recurso suelo y agua, dado que el uso de estos sólo se lleva a cabo cuando los niveles de infestación o infección lo justifican, y además se hace de forma localizada, en el tiempo apropiado de ataque de la plaga o enfermedad y con la tecnología de aspersión recomendada. Cenicafé realiza investigaciones sobre el ahorro y uso eficiente del agua en todo el proceso de cultivo (germinadores, almácigos, establecimiento y producción) y en el proceso de beneficio (etapa en la cual se transforma el fruto en café pergamino seco). En esta última etapa, se investiga permanentemente en tecnologías que permitan tener un beneficio ecológico, entendido como aquel en el cual se utilizan menos de 10 L de agua para obtener 1 kg de café pergamino seco (cps) y se realiza un manejo apropiado a los subproductos generados (pulpa, mucílago y aguas residuales). Producto de estas investigaciones se han generado las tecnologías de lavado del café en tanque de fermentación, la tecnología Becolsub y la tecnología Ecomill®, con las cuales el consumo de agua varía entre 0,5 y 5,0 L kg⁻¹ cps, permitiendo tener ahorros hasta en un factor de 100 veces, comparados con el beneficio tradicional.

En lo que respecta al manejo y tratamiento de las aguas residuales del café, Cenicafé ha investigado sistemas de tratamientos químicos y biológicos (tratamientos anaerobios, filtros

verdes, humedales artificiales), mediante los cuales el agua descargada a los recursos naturales tiene un impacto ambiental hasta 725 veces menor que la liberada a partir de un beneficio tradicional. A través del Servicio de Extensión, la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia transfiere a los caficultores el conocimiento generado en torno a la Gestión Integral del Recurso Hídrico en la caficultura, con el objetivo de que produzcan su café realizando un buen manejo de este recurso.

Para avanzar en el conocimiento de la relación del agua con el cultivo y el beneficio del café es posible realizar la medición de la Huella Hídrica (HH), concepto que fue presentado por Rees y Wackernagel (1996) y Hoekstra y Hung (2002), y fue concebido como una herramienta para estimar el contenido de agua oculta (asociada) en cualquier bien y servicio consumido por un individuo o grupo de individuos de un área específica. La HH tiene relación con el uso del agua para un proceso antrópico; una parte del volumen usado no retorna a la cuenca de la cual fue extraída o retorna con una calidad diferente a la original. Por lo tanto, la HH se refiere al impacto territorial del uso, en términos de reducción de la disponibilidad de agua tanto en cantidad como en calidad, a partir de un proceso antrópico determinado.

La HH es un indicador de uso de agua dulce que es palpable no sólo en el uso de agua directo de un consumidor o productor, sino también en su uso indirecto. La HH puede ser considerada como un indicador global de apropiación de los recursos de agua dulce.

La HH de un producto es el volumen de agua utilizada para producirlo, medido a lo largo de la cadena de suministro. Es un indicador multidimensional, que muestra los volúmenes de consumo de agua por fuentes y volúmenes de contaminación por cada tipo de contaminante, y cuyos componentes pueden ser especificados geográfica y temporalmente (Hoekstra et al., 2011), por lo que se constituye en una herramienta importante para los planificadores y administradores del agua, con el objetivo que realicen una eficiente gestión integral del recurso hídrico en sus territorios.

En el Estudio Nacional del Agua (ENA) 2018, se establece que la demanda hídrica del sector agrícola se enfoca en el análisis de los requerimientos hídricos de los cultivos y su relación con la oferta hídrica natural, asociada a la variabilidad temporal y espacial de la precipitación y a las características del suelo, lo que genera un superávit o déficit de agua, geográfica y temporalmente localizado. El déficit hídrico generado por escasez de lluvia normalmente se satisface con riego, siempre que existan fuentes de agua superficial o subterránea con disponibilidad.

Según el ENA 2018, el cultivo del café registra la mayor HH verde del sector agrícola colombiano, con un valor de $10.786,5 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$ (representando el 25,5% de la HH verde total del sector agrícola) y una HH azul de sólo $0,6 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$ (representando el 0,01% de la HH azul total del sector agrícola) (Ideam, 2019). Por lo tanto, es necesario generar estrategias que permitan

optimizar los rendimientos de la HH verde, a la vez que se mantengan en valores muy bajos la HH azul y la HH gris.

En la presente investigación se determinó experimentalmente la HH total promedio del café de Colombia, para un ciclo completo de cultivo desde siembra nueva a renovación, con una densidad de siembra de 10.000 árboles/ha, evaluada en las Estaciones Experimentales de Cenicafé El Rosario (Venecia, Antioquia), Naranjal (Chinchiná, Caldas) y El Tambo (El Tambo, Cauca), para las etapas de germinador, almácigo, levante, producción y beneficio.

Los resultados obtenidos permitieron determinar un valor promedio de la HH total de 4.456,72 L kg⁻¹ café (cv), variando entre un valor mínimo de 3.443,15 L kg⁻¹ cv (en la Estación Experimental El Tambo) y 5.983,80 L kg⁻¹ cps (en la Estación Experimental Naranjal). La HH verde representó el 78,24% de la HH total (3.486,82 L kg⁻¹ cv), la HH gris representó el 21,54% (959,84 L kg⁻¹ de cv) y la HH azul representó el 0,23% (10,06 L kg⁻¹ cv).

Las diferencias encontradas en los valores de la HH total, en las estaciones experimentales evaluadas, están relacionadas con las ofertas ambientales de las zonas y las diferencias en las propiedades físicas y químicas de los suelos, en los cuales se establecieron los cultivos de café. Por lo anterior, el valor promedio obtenido en la presente investigación es una aproximación al valor de la HH del café de Colombia, siendo necesario continuar con evaluaciones experimentales en otros sitios de la caficultura colombiana, con el fin de contribuir a la obtención de un valor de HH representativo para nuestro país.

La importancia de los resultados obtenidos en la presente investigación, radica en que se logra determinar, de manera experimental, el valor de la HH total del café de Colombia y los resultados muestran que su valor de 4.456,72 L kg⁻¹ cv es significativamente inferior al reportado por otros autores, cuyos valores han variado entre 7.607 L kg⁻¹ cv (Builes, 2013) y 14.566 L kg⁻¹ cv (Mekonnen & Hoekstra, 2010).

Chapagain y Hoekstra (2007) estimaron que se necesitan 140 L de agua para producir una taza de café estándar de 125 mL (conteniendo 7 g de café tostado y molido). **Con los resultados obtenidos en la presente investigación, puede estimarse que el valor promedio de agua para producir una taza de café estándar colombiano es de 37 L, es decir, un 73,6% menos del valor que se tenía reportado en la literatura.**

Cenicafé, a partir de los resultados de sus investigaciones, recomienda a los caficultores la siembra de un alto número de plantas por hectárea (hasta 10.000 plantas/ha) y la adopción del beneficio ecológico para mejorar su rentabilidad (Cenicafe, 1998), siendo estas dos prácticas fundamentales para optimizar la HH del café de Colombia y posicionar al sector cafetero como un sector pionero en la investigación e implementación de acciones para la gestión integral del recurso hídrico y para la adaptación de la agricultura al cambio climático.



Generalidades

Conceptos

La HH se basa en el desarrollo amplio de cuatro conceptos previos: agua virtual, agua verde, agua azul y agua gris, los cuales proporcionan la mayor parte de la base conceptual y metodológica, que permite su aplicación y complementan la visión tradicional del manejo del agua en el contexto de la Gestión Integral del Recurso Hídrico.

Agua virtual

El agua virtual fue introducida como concepto por Allan (1992) y hace referencia al volumen de agua requerida para la producción de un producto o servicio, medida a lo largo de su cadena de suministro; de esta forma, si una nación exporta o importa un producto, se exporta o importa el agua virtual asociada a ese producto, tal como se establece en el ENA 2014 (Ideam, 2015).

Agua verde

El agua verde hace referencia al agua de lluvia almacenada en el suelo en forma de humedad. Es tenida en cuenta con el propósito de generar conciencia respecto al agua disponible para el crecimiento de la biomasa y su participación en la evapotranspiración (Falkenmark, 2003). Posteriormente, la FAO retomó el concepto primario y actualizó la definición del agua verde, considerándola como el flujo vertical de agua, es decir, agua almacenada en el suelo que soporta la vegetación y que se mantiene en el suelo, pero que no hace parte del proceso de recarga a fuentes de agua superficial o subterránea.

Agua azul

La definición del agua verde generó, de manera natural, la definición del agua azul, que pasó a representar el flujo horizontal del agua, es decir, el agua de escorrentía, las fuentes de agua superficial, ríos y lagos, y las fuentes de agua subterránea, acuíferos. El agua azul se presenta como un concepto que agrupa en una sola idea todo el recurso hídrico superficial y subterráneo que representa la visión convencional de la Gestión Integral del Recurso Hídrico (CTA et al., 2015).

Agua gris

Representa el agua contaminada, debido al ingreso de contaminantes por los procesos antrópicos que llegan a fuentes de agua naturales y se identifican como una amenaza que puede alterar la condición de calidad natural del cuerpo receptor y, por lo tanto, reducir la disponibilidad de agua para los usuarios (Zárate et al., 2017).

Huella Hídrica (HH)

Como consecuencia de los conceptos anteriores, se desarrolla el concepto de la HH (Hoekstra et al., 2011), que representa la apropiación humana del agua, que se evidencia

en el impacto en términos de consumo y contaminación del agua por parte de los seres humanos; en otras palabras, se refiere al consumo y contaminación del agua con fines productivos. Por uso consuntivo se entiende aquel en el cual el agua ya no se encuentra disponible para otros usos, sea porque: 1) se ha evaporado; 2) se ha transferido a otra cuenca; 3) se ha incorporado a un producto; 4) se ha contaminado. Por el contrario, el uso no consuntivo es aquel que permite un nuevo aprovechamiento del agua, por ejemplo, la hidrogenación (Zárate et al., 2017).

La HH de un producto es el volumen de agua utilizada para producir el producto, medido a lo largo de la cadena de suministro. Es un indicador multidimensional, que muestra los volúmenes de consumo de agua por fuentes y volúmenes de contaminación por cada tipo de contaminación, y cuyos componentes de huella hídrica total pueden ser especificados geográfica y temporalmente (Hoekstra et al., 2011).

Componentes de la Huella Hídrica

El indicador de la HH permite la medición del volumen de agua consumido o contaminado a lo largo de la cadena de suministro, ya sea por unidad de tiempo para individuos y comunidades, o por unidad producida para una empresa (Hoekstra et al., 2011). Tomando como base el manual de evaluación de HH (Hoekstra et al., 2011), está conformado por tres indicadores representados por los colores azul, verde y gris; los indicadores de HH azul y verde se utilizan para evaluar consumos de agua, mientras que la HH gris se relaciona con el nivel de contaminación.

En términos generales, el objetivo de evaluar la HH es analizar cómo las actividades humanas o los productos específicos se relacionan con la escasez de agua y la contaminación, y cómo las actividades y los productos pueden ser más sostenibles desde el punto de vista del uso del agua (Hoekstra et al., 2011).

En el ENA 2014 (Ideam, 2015) se definió la HH como el volumen usado de agua para un proceso antrópico que no retorna a la cuenca de donde fue extraída o retorna con una calidad inferior a la original.

La HH se desarrolla en el ENA 2018, en concordancia con el ENA 2014, únicamente en las componentes relacionadas con la cantidad del agua (huella hídrica verde y azul), y se define como el agua que responde exclusivamente al requerimiento hídrico consuntivo del proceso productivo, por lo que es una parte del agua extraída y tras el proceso antrópico no retorna a la cuenca. La relación entre la extracción (demanda) y la porción que no retorna (huella hídrica azul y verde) está asociada con la eficiencia en el uso del agua. La huella hídrica gris continúa siendo objeto de análisis para complementar la información de calidad del agua y no se encuentra incluida en el ENA 2018 (Ideam, 2019).

Huella Hídrica Verde

Corresponde al consumo de agua procedente de la precipitación, que está almacenada en el suelo y que no retorna al sistema. Los casos por los cuales no retorna al sistema son porque se evapora o se incorpora en los productos (Rojas et al., 2018). Esta huella se refiere a la apropiación humana de agua verde (almacenada en el suelo). Se cuantifica mediante la estimación del agua evapotranspirada por la vegetación asociada a un proceso antrópico (cultivos), que no tiene como origen el agua de riego (agricultura en secano). La HH verde permite una aproximación numérica a la competencia por el agua verde entre el sector agropecuario y los ecosistemas naturales (Ideam, 2015).

Huella Hídrica Azul

Cantidad de agua superficial y subterránea extraída de una unidad territorial para satisfacer una necesidad antrópica y que no retorna al mismo sistema. Los casos por los cuales no retorna al sistema son porque se evapora, se incorpora en los productos o llega a otra microcuenca (Rojas et al., 2018).

Esta huella se refiere a la apropiación humana de agua azul (ríos, lagos, acuíferos). Es cuantificada mediante la estimación del volumen de agua, asociada a la extracción o retención de la misma en una fuente superficial y/o subterránea, para satisfacer el requerimiento hídrico de un proceso antrópico y que no retorna a la cuenca origen.

La HH azul está presente en el sector agrícola como riego y en todos los otros sectores como la parte del agua usada que no retorna a la cuenca, por lo que se considera no disponible para otro uso. La HH azul está asociada con la demanda hídrica, por lo tanto, al potencial conflicto por uso, es decir, señala los conflictos por uso en relación a la oferta hídrica disponible y aporta a determinar la vulnerabilidad del agua en una cuenca. Un valor alto de huella hídrica en relación a la oferta disponible se considera como un indicador de vulnerabilidad del recurso hídrico en una cuenca (Ideam, 2015).

La demanda hídrica en el contexto de la hidrología se entiende como la estimación de la extracción de agua del sistema para ser usado como parte de las actividades productivas, desde el punto de vista económico, y para el uso doméstico. También se entiende a partir de la competencia por el uso que hacen los sectores y, por lo tanto, se asume como la no disponibilidad de agua para otras actividades antrópicas y los ecosistemas en un territorio y por un periodo de tiempo (Ideam, 2019). El agua se usa como insumo o como materia prima en los procesos productivos y toda o una parte de esta retorna al sistema. Los retornos de agua incluyen las pérdidas, los vertimientos y las descargas de agua utilizada en la hidrogenación (Ideam, 2019).

Para el sector agrícola se considera como flujo de retorno la diferencia entre la demanda hídrica agrícola (extracción) y la HH azul (consumo por evapotranspiración asociado exclusivamente a

agua de riego), es decir, son las pérdidas, que para el caso de la agricultura se equiparan a los flujos de retorno difusos (Ideam, 2020).

Huella Hídrica Gris

Es el volumen de agua dulce necesario para asimilar la carga de contaminantes por parte de un cuerpo receptor, tomando como referencia las normas de calidad ambiental, asociando los límites establecidos a una calidad buena para el ambiente y para las personas (Rojas et al., 2018).

Se define como el volumen de agua dulce necesario para asimilar y diluir la carga contaminante vertida a un cuerpo receptor de forma que se garanticen condiciones de calidad de agua para el ambiente, las personas y las actividades humanas, de acuerdo a la normatividad vigente. Expresa la reducción de la disponibilidad por afectación a la calidad del agua (Ideam, 2015).

Diferencias y similitudes entre Agua Virtual y Huella Hídrica

El agua virtual y la huella hídrica son indicadores físicos del requerimiento de agua en los procesos productivos (Figura 1). El contenido de agua virtual de un producto es equivalente a su huella hídrica en términos cuantitativos; no obstante, aunque el agua virtual solo se refiere al volumen de agua contenido virtualmente en el producto, la huella hídrica ofrece la posibilidad de un análisis multidimensional, que es espacial y temporalmente explícito, orientado a entender la interacción de las actividades antrópicas y la relación del agua con la cuenca (CTA et al., 2015). En la Figura 2 se presentan las principales diferencias entre el agua virtual y la huella hídrica.

Huella Hídrica del Café

Reportes Internacionales

Desde que Chapagain y Hoekstra (2007) estimaran que se necesitan unos 140 L de agua para producir una taza de café estándar de 125 mL (conteniendo 7 g de café), la atención de los consumidores a los posibles impactos sobre los recursos hídricos ha ido en aumento. Con el paso de los años, la metodología de cálculo se ha ido refinando hasta llegar al trabajo realizado por Mekonnen y Hoekstra (2011), que cuantifica la HH de más de 180 productos agrícolas a nivel mundial. Dicho trabajo, además de ofrecer unas cifras de HH más cercanas a la realidad, pone de relevancia que la HH de un producto agrícola varía de forma considerable en función de su localización, el manejo realizado al cultivo y la forma de procesamiento.

En la Tabla 1 se presentan los resultados presentados por Chapagain y Hoekstra (2003) del contenido de agua virtual en el café producido durante el período 1995-1999, en diferentes países del mundo y que realizan exportación a los países bajos.



<h2>HUELLA HÍDRICA</h2>	<h2>AGUA VIRTUAL</h2>								
<p>La huella hídrica es el volumen total de agua usada desde la producción hasta el consumo final de un producto, y la utilizada para diluir sus contaminantes.</p>	<p>El agua virtual es la que se utiliza para producir bienes y servicios; no la vemos físicamente en los productos, pero es necesaria para elaborarlos. En promedio global este es el contenido de agua virtual en algunos productos:</p>								
<p>La huella hídrica total es la suma del agua azul, el agua verde y el agua gris que requiere un producto durante todo su proceso de producción y distribución. Puede calcularse por producto, individuo, empresa, región o país, y generalmente se expresa en términos de volumen de agua por año.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Agua superficial y subterránea (ríos, lagos, etc.)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Agua de lluvia almacenada en el suelo (humedad)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Agua contaminada durante los procesos</p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <p>COMERCIALIZACIÓN</p> <p>↓ ↓ ↓ ↑ ↓ ↓ ↓ ↑ ↓ ↓ ↓ ↑</p> <p>TRANSPORTE</p> <p>↓ ↓ ↓ ↑ ↓ ↓ ↓ ↑ ↓ ↓ ↓ ↑</p> <p>MANUFACTURACIÓN</p> <p>↓ ↓ ↓ ↑ ↓ ↓ ↓ ↑ ↓ ↓ ↓ ↑</p> <p>PRODUCCIÓN</p> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <p>Cuidar el agua es responsabilidad de productores y consumidores</p> </div>	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td> 1 hamburguesa 2.400 L</td> <td> 1 kg de carne de res 15.000 L</td> </tr> <tr> <td> 1 kg de maíz 900 L</td> <td> 1 camisa de algodón 2.000 L</td> </tr> <tr> <td> 1 vaso de leche 200 L</td> <td> 1 taza de café 140 L</td> </tr> <tr> <td> 1 manzana 70 L</td> <td> 1 tomate 13 L</td> </tr> </table>	1 hamburguesa 2.400 L	1 kg de carne de res 15.000 L	1 kg de maíz 900 L	1 camisa de algodón 2.000 L	1 vaso de leche 200 L	1 taza de café 140 L	1 manzana 70 L	1 tomate 13 L
1 hamburguesa 2.400 L	1 kg de carne de res 15.000 L								
1 kg de maíz 900 L	1 camisa de algodón 2.000 L								
1 vaso de leche 200 L	1 taza de café 140 L								
1 manzana 70 L	1 tomate 13 L								
<p>No todos los bienes consumidos en un país son producidos en el mismo, cuando se importan o exportan bienes, también se está importando y exportando la cantidad de agua que se usó para producirlos y transportarlos.</p>	<p>Las condiciones geográficas, el clima y el nivel de desarrollo tecnológico de cada región determina la cantidad de agua virtual que ésta utiliza.</p>								

Figura 2. Diferencia entre el agua virtual y la huella hídrica. Fuente: Fondo para la comunicación y la educación ambiental, (2015).

Tabla 1. Contenido de agua virtual en el café producido en diferentes países. *Fuente: Chapagain y Hoekstra (2003).*

País	Agua requerida en el cultivo	Agua virtual cps	Rendimientos café verde	Agua virtual café verde	Agua virtual café tostado	Producción media 1995-1999
	mm	m ³ t ⁻¹	t ha ⁻¹	m ³ t ⁻¹	m ³ t ⁻¹	t año ⁻¹
Brasil	1.277	15.159	0,68	18.925	22.530	1.370.232
Colombia	893	9.723	0,74	12.139	14.451	689.688
Indonesia	1.455	21.347	0,55	26.650	31.727	466.214
Vietnam	938	4.074	1,87	5.086	6.054	384.220
México	1.122	19.502	0,46	24.347	28.985	329.297
Guatemala	1.338	11.967	0,90	14.940	17.786	240.222
Uganda	1.440	13.729	0,84	17.139	20.404	229.190
Etiopía	1.151	10.212	0,91	12.749	15.177	227.078
India	754	7.459	0,81	9.312	11.086	220.200
Costa Rica	1.227	6.748	1,47	8.424	10.028	157.188
Honduras	1.483	15.241	0,78	19.028	22.652	154.814
El Salvador	1.417	13.448	0,85	16.789	19.987	138.121
Ecuador	1.033	26.125	0,32	32.616	38.828	121.476
Perú	994	13.084	0,61	16.335	19.446	116.177
Tailandia	1.556	11.208	1,12	13.993	16.658	75.814
Venezuela	1.261	28.775	0,35	35.923	42.766	67.802
Nicaragua	1.661	18.260	0,73	22.797	27.139	65.373
Madagascar	1.164	28.453	0,33	35.521	42.287	63.200
Tanzania	1.422	29.812	0,38	37.219	44.308	44.540
Bolivia	1.093	9.398	0,94	11.733	13.968	22.613
Togo	1.409	33.199	0,34	41.447	49.341	14.416
Sri Lanka	1.426	16.913	0,68	21.115	25.137	11.133
Panamá	1.294	25.339	0,41	31.634	37.660	10.726

Continúa...

...continuación.

País	Agua requerida en el cultivo	Agua virtual cps	Rendimientos café verde	Agua virtual café verde	Agua virtual café tostado	Producción media 1995-1999
	mm	m ³ t ⁻¹	t ha ⁻¹	m ³ t ⁻¹	m ³ t ⁻¹	t año ⁻¹
Ghana	1.381	31.996	0,35	39.946	47.554	4.909
Estados Unidos	938	6.097	1,24	7.611	9.061	2.924

De los datos condensados en la Tabla 1 se aprecia que el agua virtual del café verde varió entre 5.086 m³ t⁻¹ (Vietnam) y 41.447 m³ t⁻¹ (Togo), valores influenciados por la variedad cultivada, la densidad de siembra, el manejo agronómico del cultivo, el manejo postcosecha y la oferta ambiental de las áreas cultivadas. En las Tablas 2 y 3 se presentan los datos reportados por Mekonnen y Hoekstra (2011), para la huella hídrica de diferentes productos.

Tabla 2. Huella hídrica media global de 14 categorías de cultivos primarios. Período: 1996-2005. *Fuente: Mekonnen y Hoekstra (2011).*

Cultivo	Huella hídrica (m ³ t ⁻¹)			
	Verde	Azul	Gris	Total
Azúcar	130	52	15	197
Forrajes	207	27	20	253
Verduras	194	43	85	322
Raíces y tubérculos	327	16	43	387
Frutas	727	147	93	967
Cereales	1.232	228	184	1.644
Oleaginosos	2.023	220	121	2.364
Tabaco	2.021	205	700	2.925
Fibras	3.375	163	300	3.837
Legumbres	3.180	141	734	4.055
Espicias	5.872	744	432	7.048
Nueces	7.016	1.367	680	9.063

Continúa...

...continuación.

Cultivo	Huella hídrica (m ³ t ⁻¹)			
	Verde	Azul	Gris	Total
Caucho	12.964	361	422	13.748
Estimulantes	13.731	252	460	14.443

De los resultados presentados en la Tabla 2, se aprecia que los menores valores de la huella hídrica son para los cultivos azucareros y los mayores valores de la huella hídrica son para los productos estimulantes (categoría en la cual se encuentran el cacao, el té y el café).

Tabla 3. Huella hídrica media de algunos cultivos. Período 1996-2005

Descripción del producto	Huella hídrica (m ³ t ⁻¹)			
	Verde	Azul	Gris	Total
Trigo	1.277	342	207	1.827
Arroz	1.146	341	187	1.673
Cebada	1.213	79	131	1.423
Maíz	947	81	194	1.222
Centeno	1.479	25	99	1.544
Avena	1.479	181	128	1.788
Mijo	4.306	57	115	4.478
Sorgo	2.857	103	87	3.048
Papa	191	33	63	287
Yuca	550	0	13	564
Ñame	341	0	1	343
Caña de azúcar	139	57	13	210
Remolacha azucarera	82	26	25	132
Fríjol	3.945	125	983	5.053
Habas	1.317	205	496	2.018
Garbanzos	2.972	224	981	4.177
Lentejas	4.324	489	1.060	5.874

Continúa...

...continuación.

Descripción del producto	Huella hídrica (m ³ t ⁻¹)			
	Verde	Azul	Gris	Total
Almendras	4.632	1.908	1.507	8.047
Nueces	2.805	1.299	814	4.918
Avellanas	3.813	1.090	354	5.258
Soya	2.037	70	37	2.145
Maní	2.469	150	163	2.782
Cocos	2669	2	16	2.687
Palma de aceite	1.057	0	40	1.098
Aguacate	849	283	849	1.981
Bananas	660	97	33	790
Naranjas	401	110	49	560
Mandarinas	479	118	152	748
Limonos	432	152	58	642
Tomates	108	63	43	214
Cebolla	176	44	51	272
Té verde y negro	7.232	898	726	8.856
Cacao	19.745	4	179	19.928
Café verde	15.249	116	532	15.897
Café tostado	18.153	139	633	18.925

De los resultados presentados en la Tabla 3, se aprecia que el valor de la HH del café verde (15.897 m³ t⁻¹) se encuentra entre los valores de HH del té (8.856 m³ t⁻¹) y los valores de HH del cacao (19.928 m³ t⁻¹).

Para el caso del café de Colombia, Chapagain y Hoekstra (2003) estimaron un valor de agua virtual del café verde (café almendra) de 12.139 m³ t⁻¹. Mekonnen y Hoekstra (2010) estimaron la HH del café verde producido entre 1996 y 2005 en Colombia, en un valor de 9.690,72 Hm³ año⁻¹ (HH verde de 8.670,85 Hm³ año⁻¹ y HH gris de 1.019,87 Hm³ año⁻¹). Considerando la producción reportada por la Federación Nacional de Cafeteros para ese período, de 110,89 millones de sacos de 60 kg de café verde (FNC, 2020), equivalentes a una producción anual de 665.280 toneladas de café verde, a partir de los datos de

Mekonnen y Hoekstra (2010), se puede estimar la HH del café de Colombia con un valor de $14.566 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ (HH verde de $13.033 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ y HH gris de $1.533 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$).

Debido a las particularidades del café colombiano, cultivado mayoritariamente en condiciones de secano, la mayor parte de la HH recae sobre el componente verde, seguido del componente gris. El componente azul es minoritario, siendo su valor menor al 1%, pues el agua dulce es requerida de forma casi exclusiva durante las etapas de germinación, almácigo y poscosecha, en esta última etapa los valores de consumo varían de 40 a menos de 1,0 L de agua para producir 1,0 kg de cps, en función de la tecnología utilizada; sin embargo, este componente no debe ser despreciado.

Reportes Nacionales

Arévalo et al. (2012), en su publicación “Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica”, estimaron una HH de $11.113 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ de café verde colombiano producido en el año 2008. Los autores estimaron que la HH verde del café representó el 22% de la HH verde del sector agrícola (7.458 Hm^3 de 34.242 Hm^3), la HH azul representó el 3% de la HH azul del sector agrícola (84 Hm^3 de 2.804 Hm^3) y la HH gris representó el 55% de la HH gris del sector agrícola (1.151 Hm^3 de 2.098 Hm^3). Igualmente establecen que la mayor parte de la HH gris de Colombia se encuentra asociada al beneficio del café.

Builes (2013), determinó que la HH del café verde en la cuenca del río Porce (Departamento de Antioquia, Colombia) fue de $7.607 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ (HH verde $7.460 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ y HH gris $147 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$). Barragán y Siachoque (2017), para el café de Colombia, producido en la microcuenca La Plata (Ibagué, Tolima), reportan una HH verde de $3.475,2 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ y una HH gris de $11,01 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ para el café pergamino seco.

Ariza y Arévalo (2018), reportan una HH verde para el café de Colombia producido en el departamento del Huila de $6.328 \text{ L kg}^{-1} \text{ cps}$ y una HH azul de $16,1 \text{ L kg}^{-1} \text{ cps}$. Mild Coffee Company Huila et al. (2018), reportan una HH verde de $6.328,1 \text{ L kg}^{-1}$ de cps, una HH azul de $10,8 \text{ L kg}^{-1}$ de cps y una HH gris de $106.087 \text{ L kg}^{-1}$ de cps para el café cultivado en el Sur del Huila, incluidas las etapas de cultivo, cosecha y beneficio.

Huella Hídrica del café en los Estudios Nacionales del Agua

El análisis de huella hídrica del sector agrícola y pecuario en Colombia, condensados en el ENA 2014, implicó estudiar el requerimiento de agua de los cultivos, producto de su interrelación con las variables climáticas y de los suelos. Los datos climáticos correspondieron

a precipitación total y efectiva, y a la evapotranspiración potencial, suministrados por el Ideam (CTA et al., 2015).

De acuerdo con lo reportado en el ENA 2014 (CTA et al., 2015), el mayor valor de HH verde para los cultivos permanentes en Colombia, evaluados en el año 2012, lo presentó el café con un valor de 11.822,3 Hm³ año⁻¹. Considerando la producción reportada por la Federación Nacional de Cafeteros para ese período, de 7.744 millones de sacos de 60 kg de café verde (FNC, 2020) equivalentes a 464.640 toneladas, se puede calcular una HH verde 25.444 m³ t⁻¹.

En el mismo estudio del ENA 2014 (Ideam, 2015) se expresa que el cultivo de café no reporta HH azul, debido a que se considera que este cultivo no se riega en Colombia.

En el ENA 2018 (Ideam, 2019), el mayor valor de HH verde para los cultivos permanentes en Colombia, evaluados en el año 2016, lo presentó el café con un valor de 10.786,5 Hm³ año⁻¹. Considerando la producción reportada por la Federación Nacional de Cafeteros para ese período, de 14.232 millones de sacos de 60 kg de café verde (FNC, 2020) equivalentes a 853.920 toneladas, se puede calcular una HH verde de 12.632 m³ t⁻¹.

Para el caso de la HH azul, en el ENA 2018, sólo se contabilizó la HH azul del proceso de beneficio, la cual se estimó en un valor de 0,6 Hm³ año⁻¹, equivalente a una HH azul de 0,703 m³ t⁻¹ de café verde, en la cual se cuantifica una demanda hídrica para la etapa de beneficio de 5,5 Hm³ año⁻¹, equivalentes a 6,5 L kg⁻¹ de cps y una cantidad de agua que no retorna a la microcuenca de 0,7 L kg⁻¹ de cps, es decir, el 10,77%.

En la Tabla 4 se resumen los resultados de HH para el café de Colombia reportados por los diferentes autores.

Las variaciones en los valores de la HH reportados en estudios existentes no siempre se deben a la localización o manejo del cultivo, sino que en muchas ocasiones se deben a cuestiones metodológicas y al uso de distintas fuentes de información o incluso por asumir distintas hipótesis de partida.

El uso de información local como el clima, el rendimiento, el manejo del cultivo, la tipología del sistema de beneficio o el tratamiento de efluentes, es esencial para obtener un valor representativo de la HH. De igual forma, una clara definición de los elementos incluidos en el análisis, especialmente en el caso de la HH gris, es imprescindible para obtener valores comparables con otros trabajos. La evaluación de la HH es una metodología que promueve y apoya el uso sostenible del recurso hídrico mediante información transparente y completa sobre el consumo y la contaminación del agua con relación a su disponibilidad (Rojas et al., 2018).

Tabla 4. Valores de la Huella Hídrica del café en almendra de Colombia.

HH verde $m^3 t^{-1}$	HH azul $m^3 t^{-1}$	HH gris $m^3 t^{-1}$	HH total $m^3 t^{-1}$	Referencia
13.033	0	1.533	14.566	Adaptado de Mekonnen y Hoekstra (2010)
-	-	-	11.113	Arévalo et al. (2012)
7.460	0	147	7.607	Builes (2013)
25.444	0	-	-	Adaptado de Ideam (2015)
4.379	-	14	-	Adaptado de Barragán y Siachoque (2017)
7.973	20	-	-	Adaptado de Ariza y Arévalo (2018)
7.973	14	133.670	141.657	Adaptado de Mild Coffee Company Huila et al. (2018)
12.632	0,70	-	-	Adaptado de Ideam (2019)

Diferencia entre Huella Hídrica y Huella de Agua

La huella por el uso del agua en los procesos productivos puede evaluarse desde distintos puntos de vista o enfoques metodológicos. Según la definición propuesta por la Water Footprint Network, la HH es un indicador volumétrico sobre la apropiación de agua dulce por parte del ser humano, cuya contextualización espacial y geográfica es imprescindible para llevar a cabo un análisis de sostenibilidad (Hoekstra et al., 2011).

La norma internacional ISO 14046: “Gestión Ambiental- Huella de agua- Principios, requisitos y directrices”, publicada en 2014, resalta al agua de manera integral como una opción metodológica para evaluar el impacto potencial de productos, servicios u organizaciones, ya que toma en cuenta tanto la cantidad como la calidad del agua y un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), el cual consiste en la recopilación y evaluación de las entradas, salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto, a través de su ciclo de vida.

Aunque en ambas metodologías se estudia el impacto de las actividades, productos o procesos, sobre el recurso hídrico (respecto a consumos y nivel de contaminación), el enfoque propuesto por el ACV evalúa los daños potenciales sobre tres áreas de protección (salud humana, entorno natural y recursos naturales). En el enfoque del ACV se hace un análisis basado en una identificación de impactos potenciales del sistema relacionados con el agua, donde el método de evaluación se expresa como: eutrofización, ecotoxicidad, acidificación, disponibilidad y escasez, entre otros; mientras que el enfoque de la WFN, evalúa el impacto del recurso hídrico

del sistema mediante el indicador volumétrico de la HH integrada por los componentes azul, verde y gris (Rojas et al., 2018).

La huella hídrica y la huella de agua, con enfoque de ciclo de vida, son herramientas que persiguen un objetivo similar (conocer el consumo de agua asociado a diversas unidades de análisis y las consecuencias que ese consumo tienen asociadas) y lo afrontan con diferente metodología (CADIS et al., 2016).

Cada enfoque tiene distinto campo de aplicación y la selección de uno sobre otro dependerá del objetivo del estudio que se quiera llevar a cabo. Ello resulta crucial para recomendar una metodología u otra, según el objeto estudiado y el fin que quiera darse a los resultados obtenidos. Por ejemplo, si se quiere conocer el consumo de agua asociado a una comunidad determinada y poder tomar decisiones respecto de la asignación de los recursos hídricos de un sitio, para satisfacer la demanda de agua directa e indirecta de esa comunidad, puede que resulte más adecuada la metodología de la WFN. Mientras que si el objeto de estudio es conocer el impacto que se produce sobre la disponibilidad de agua o la acidificación acuática, o incluso el daño potencial que podría causar sobre la salud humana o los ecosistemas, el enfoque más apropiado podría ser el de huella de agua (CADIS et al., 2016).

Sin embargo, a pesar de sus diferencias, en la mayoría de los casos son dos enfoques que pueden resultar complementarios y necesarios para la toma de decisiones complejas que aborden la sustentabilidad del uso de los recursos hídricos para satisfacer las necesidades humanas (CADIS et al., 2016).



Objetivos y alcance

General: Cuantificar experimentalmente la huella hídrica para el café pergamino seco producido en Colombia durante un ciclo de 5 años (desde siembra nueva hasta primera renovación por zoca) y realizar su análisis de sostenibilidad, con el fin de generar estrategias que conduzca una eficiente gestión del recurso hídrico en las fincas, que contribuya a la consolidación de una caficultura resiliente, sostenible ambientalmente y productiva, mediante la adopción de prácticas y tecnologías apropiadas, que permitan posicionar al sector cafetero como un sector pionero en la investigación e implementación de acciones para la gestión integral del recurso hídrico.

Específicos: Cuantificar en tres Estaciones Experimentales de Cenicafé: El Rosario (Venecia, Antioquia), Naranjal (Chinchiná, Caldas) y El Tambo (El Tambo, Cauca), la huella hídrica del café de Colombia, en sus tres colores (verde, azul y gris), en las etapas de germinador, almácigo, levante, producción y beneficio, para una densidad de siembra de 10.000 árboles/ha.

Alcance: El presente trabajo de investigación tuvo como alcance la medición experimental de la HH directa, en todo el ciclo de producción de café en la finca, desde la germinación de la semilla hasta la obtención del café pergamino seco y ciclo completo (siembra nueva a renovación por primera zoca), teniendo en cuenta los componentes verde, azul y gris de la HH.

Para el caso de la HH gris se tomaron como valores de referencia, los condensados en la Tabla 5 (página 39), que categorizan al agua en un nivel de calidad aceptable.

En el alcance de la investigación no se contemplan las siguientes operaciones:

- La HH de los insumos para el cultivo del café, como fertilizantes o agroquímicos.
- La HH de cualquier otro insumo utilizado en el proceso de beneficio, más allá del agua de proceso.
- La HH de la energía (diésel, gasolina, carbón, gas o electricidad) empleada en los procesos y la maquinaria necesaria.
- La HH asociada al transporte del café dentro o fuera de la finca.
- La HH de todo el sistema de producción para la comercialización y consumo final.
- La HH asociada a las actividades humanas, como la satisfacción de las necesidades básicas de la familia cafetera.
- La HH asociada a los residuos provenientes de los insumos utilizados, como bolsas de almácigo, envases y empaques de agroquímicos, entre otros.
- Cualquier actividad posterior a la obtención del café pergamino seco.



Metodología

Etapa de germinador

La experimentación de la etapa de germinador para el cálculo de la huella hídrica del café de Colombia se realizó en las Estaciones Experimentales El Rosario (Venecia, Antioquia), Naranjal (Chinchiná, Caldas) y El Tambo (El Tambo, Cauca).

Las actividades realizadas fueron:

1. Se construyeron tres germinadores, con un área de 1,5 m² cada uno (Figura 3).
2. Se realizó la siembra de 1 kg de semilla de café Variedad Castillo® Naranjal, Variedad Castillo® El Rosario, Variedad Castillo® El Tambo, en cada uno de los germinadores, de acuerdo con la zona y los protocolos de Cenicafé (tipo de sustrato, metodología de siembra, entre otros) (FNC, Cartilla Cafetera No. 4, 2004).
3. Se realizó un registro diario de la precipitación en la Estación Experimental, mediante el uso de un pluviómetro, con el fin de determinar la Huella Hídrica Verde.
4. Mediante la utilización de un medidor se cuantificó el volumen de agua utilizada en el riego del germinador, con el fin de determinar la Huella Hídrica Azul.
5. Se recolectaron, midieron y caracterizaron los drenados generados en el germinador, con el fin de determinar la Huella Hídrica Gris.
6. Antes de realizar la siembra de la semilla, se obtuvo una muestra homogénea del sustrato del germinador de 500 g aproximadamente, y se le determinó la humedad de acuerdo con los métodos condensados en el Standard Methods (1992) (Anexo 1).
7. Los drenados obtenidos se conservaron antes de su análisis, de acuerdo con los protocolos condensados en la Tabla 1 del Anexo 1. Posteriormente, se unieron muestras por quincenas y se caracterizaron en los parámetros pH, Turbidez, DQO, Sólidos Suspendidos Totales, P-PO₄ y N-NO₃, de acuerdo con los métodos condensados en el Standard Methods (1992) (Anexo 2).
8. El agua lluvia que ingresó al germinador y el agua de riego se caracterizaron en los parámetros pH, turbidez, DQO, Sólidos Suspendidos Totales, P-PO₄ y N-NO₃, de acuerdo con los métodos condensados en el Standard Methods (1998) (Anexo 2).
9. Una vez obtenidas las chapolas (plántulas de café), se tomaron muestras para determinar su peso y humedad, y calcular el agua incorporada a la biomasa. De igual manera, se tomó una muestra de la arena final, para determinar su humedad y calcular el agua incorporada al sustrato.

En la Figura 3 se presenta el aspecto de los germinadores utilizados para la determinación de la huella hídrica, con detalle en la recolección de los drenados y en la Figura 4 se presenta un aspecto de la práctica de riego de los germinadores y de la recolección de los drenados.



Figura 3. a. Estructura utilizada en la etapa de germinación del café. **b.** Detalle de la recolección de los drenados.



Figura 4. a. Detalle del proceso de aplicación de riego; **b.** recolección de drenados en la etapa de germinador.

Etapa de almácigo

En cada una de las Estaciones Experimentales se llenaron 1.260 bolsas de 17 x 23 cm, con suelo de la Estación y pulpa de café descompuesta, en relación tres a uno, de acuerdo con los protocolos de Cenicafe (FNC, Cartilla Cafetera No. 4, 2004). Estas bolsas se distribuyeron en tres micro-lotes de 420 bolsas cada uno (Figura 5) y se colocaron sobre un plástico que permitiera la recolección de los lixiviados (Figuras 6, 7, y 8).

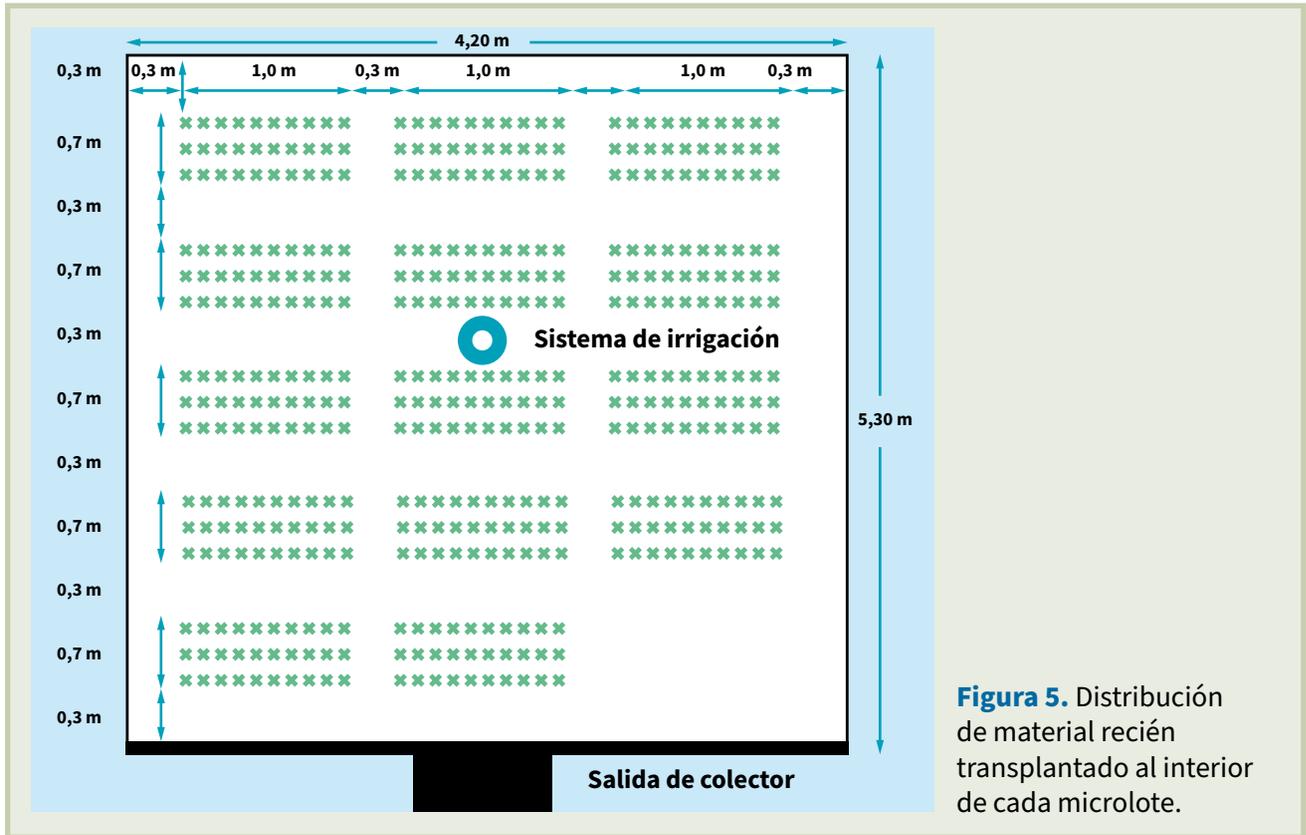


Figura 5. Distribución de material recién transplantado al interior de cada microlote.



Figura 6. Micro-lotes de 420 plántulas, Variedad Castillo® Naranjal. Estación Experimental Naranjal.



Figura 7. Micro-lotes de 420 plántulas, Variedad Castillo® El Tambo. Estación Experimental El Tambo.



Figura 8. Micro-lotes de 420 plántulas, Variedad Castillo® El Rosario. Estación Experimental El Rosario.

Dada la necesidad de caracterizar la huella hídrica en sus diferentes colores, se enrollaron los bordes del plástico en guadua y se le generó una pendiente al plástico hacia el centro y hacia la parte inferior del área experimental, con el fin de canalizar los drenados hacia una tubería de recolección y conducirlos hasta un tanque ubicado en la zona baja de los montajes (Figura 8). Se organizó cada micro-lote y cada colector en forma independiente.

Se realizó un registro diario de la precipitación en la Estación, con el fin de determinar la HH verde. Mediante la utilización de un medidor se cuantificó la cantidad de agua utilizada en el riego del almácigo, con el fin de determinar la HH azul. Se recolectaron, midieron y caracterizaron los drenados generados en el almácigo (Figura 9) con el fin de determinar la HH gris.



Figura 9. Recolección y medición de los drenados.

Los drenados obtenidos se conservaron antes de su análisis (Tabla 1, del Anexo 1). Posteriormente, se unieron muestras por mes y se caracterizaron en los parámetros pH, turbidez, DQO, Sólidos Suspendidos Totales, P-PO₄, y N-NO₃, de acuerdo con los métodos condensados en el Standard Methods (1992) (Anexo 2). El agua lluvia que ingresó al almácigo y el agua de riego se caracterizaron en los parámetros pH, turbidez, DQO, Sólidos Suspendidos Totales, P-PO₄, y N-NO₃, de acuerdo con los métodos condensados en el Standard Methods (1992) (Anexo 2).

Una vez obtenidos los colinos (plantas de café que ya cuentan con dos o más cruces de ramas debidamente formadas), se tomaron muestras para determinar su peso y humedad, y calcular el agua incorporada a la biomasa.

Etapas de levante y producción

Una vez producidos los colinos se inició con la siembra y con la delimitación e instrumentación de las parcelas, para la determinación de la huella hídrica en la etapas de levante (o de crecimiento vegetativo entre 0 a 18 meses) y producción (18 a 60 meses). En cada Estación Experimental se delimitaron tres parcelas experimentales para la etapa de levante y tres parcelas experimentales para la etapa de producción (Figura 10).

Cada parcela estuvo conformada por nueve árboles de café Variedad Castillo® (en sus etapas de levante y producción), con una densidad de siembra de 10.000 árboles/ha. El tamaño de cada parcela fue de 3 x 3 m (9 m²) distribuidas en el área de siembra de los colinos, y aisladas por lo menos 3 m de surcos y caminos, con el fin de evitar el efecto borde. Cada parcela fue sensorizada, de forma que se pudieran determinar las entradas y salidas de agua. Para evaluar la entrada de agua a la parcela (por precipitación) se ubicaron pluviómetros a 2,5 m de altura (Figura 11).

Para determinar la salida de agua (por escorrentía, percolación y evapotranspiración), en cada parcela se instalaron dos sondas de humedad tipo Decagon 5TE (que permitían monitorear las variables humedad, temperatura y conductividad eléctrica), ubicadas a 15 y 45 cm de profundidad (Figura 12), se seleccionaron estos valores de profundidad dado que el campo de monitoreo de las sondas es de 30 cm, ubicando la sonda en el valor medio, permitiendo una valoración del cambio de humedad en los primeros 60 cm del perfil del suelo. De igual manera, se instalaron dos cápsulas de succión, ubicadas a 45 cm de profundidad, separadas 1 m de los sensores de humedad (que permitían la obtención del agua percolada para determinar su calidad) (Figura 13) y se construyó una parcela de escorrentía de 30 cm de ancho (Figura 14), canalizando las aguas de escorrentía a un tanque para su recolección (Figura 15).

Los sensores de humedad y el pluviómetro se conectaron a un datalogger tipo Decagon EM50 (cinco canales) para el registro continuo de la información.

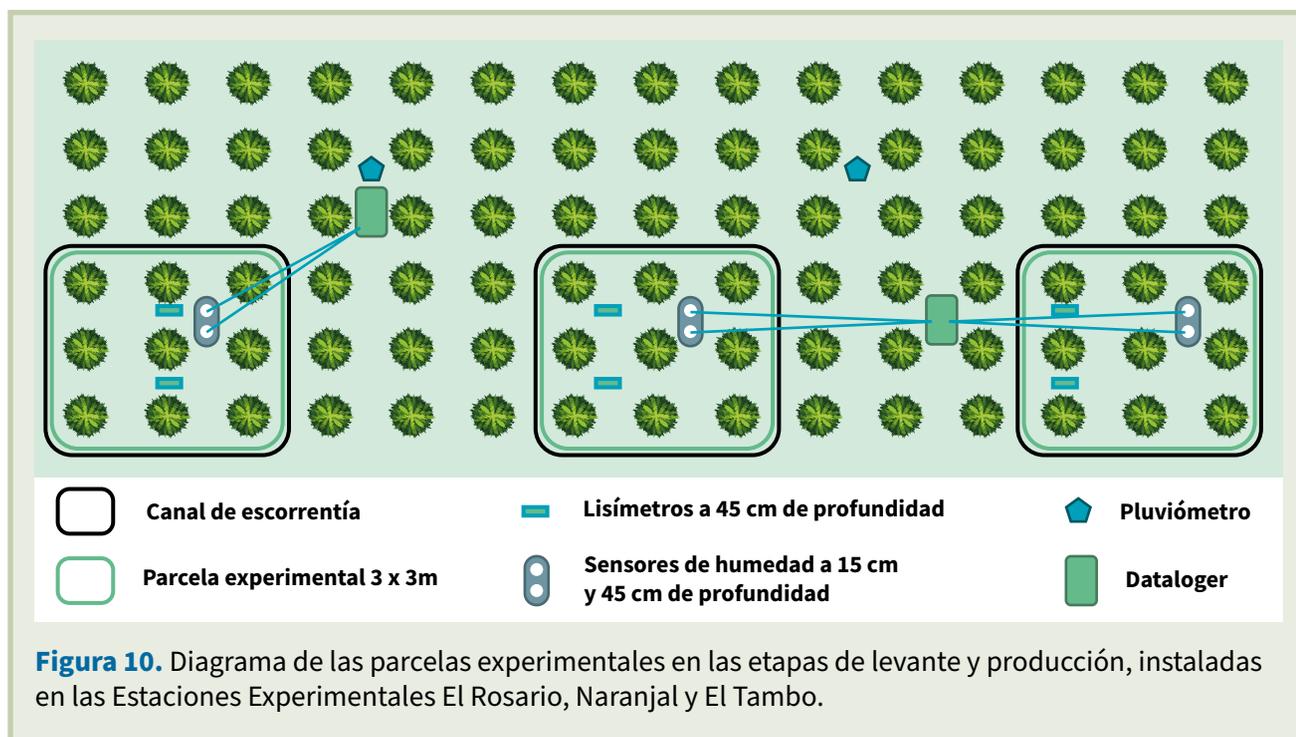




Figura 11. Instalación del pluviómetro a 2,5 m de altura y acople al datalogger.



Figura 12. Instalación de sensores de humedad a 15 y 45 cm de profundidad.

Los drenados obtenidos de las parcelas, a través de la lisimetría y el agua de escorrentía de las mismas, se conservaron antes de su análisis de acuerdo con los protocolos condensados en la Tabla 1 del Anexo 1. Posteriormente, se unieron muestras por mes y se caracterizaron en los parámetros pH, turbidez, DQO, Sólidos Suspendedos Totales, P-PO₄, N-NO₃, N-NH₃ y N_T de acuerdo con los métodos condensados en el Standard Methods (1992).

Se realizó un muestreo compuesto al suelo de las parcelas en levante y producción, para determinar sus características hidráulicas (punto de marchitez permanente, capacidad de campo); características físicas (densidad aparente, textura, conductividad hidráulica) y características químicas (bases de cambio, minerales, materia orgánica, N, P) (Figura 16). Los métodos de análisis se presentan en el Anexo 3. En las Figuras 17, 18 y 19 se presenta el aspecto de las parcelas de levante en las tres estaciones experimentales. En las Figuras 20, 21 y 22 se presenta es aspecto de las parcelas de producción.



Figura 13. Instalación de los lisímetros (cápsulas de succión), a 45 cm de profundidad (dos por parcela experimental). Una vez instalados, se protegió la parte emergente con tubería PVC-S de 2” con su respectivo tapón.



Figura 14. Construcción de las parcelas de escorrentía.

Calibración de los sensores de humedad

El sensor 5TE de Decagon es un sensor electromagnético que realiza una medición indirecta del contenido de humedad del suelo, influenciada por la permitividad dieléctrica o constante dieléctrica (ϵ) del suelo, bajo el concepto de capacitancia. De acuerdo con Decagon (2014), el sensor de capacitancia 5TE mide la constante dieléctrica suministrando una onda oscilante de 70 MHz a las puntas del sensor, como resultado, la carga eléctrica almacenada en las barras del sensor, es proporcional a las propiedades dieléctricas del suelo.



Figura 15. Recolección y muestreo del agua de las parcelas de escorrentía.



Figura 16. Muestreo del suelo de las parcelas de escorrentía.



Figura 17. Parcelas en levante. Estación Experimental Naranjal.



Figura 18. Parcelas en levante. Estación Experimental El Rosario.



Figura 19. Parcelas en levante. Estación Experimental El Tambo.



Figura 20. Parcelas en producción en La Estación Experimental Naranjal.



Figura 21. Parcelas en producción en La Estación Experimental El Tambo.



Figura 22. Parcelas en producción en La Estación Experimental El Rosario.

La constante dieléctrica del agua ($80 = \epsilon$) es mucho mayor que la permitividad de las partículas del suelo ($\epsilon = 3$ a 7), de la materia orgánica ($\epsilon = 2$ - 5) y del aire ($\epsilon = 1$), por lo que pequeños cambios en el contenido de humedad del suelo generan variaciones significativas en la constante dieléctrica del suelo (Ruelle & Laurent, 2008). No todos los suelos tienen las mismas propiedades eléctricas, por lo que se hace necesario realizar una calibración específica del sensor, según Decagon (Decagon Devices, 2014) la calibración puede incrementar la precisión del sensor a $\pm 1\%$ - 2% . La calibración individual del sensor corrige la variabilidad y establece una relación lineal entre la salida del sensor y la permitividad dieléctrica real (Rosenbaum et al., 2010).

Con el fin de asegurar la correcta determinación del contenido volumétrico de humedad del suelo, a continuación, se presenta el procedimiento de laboratorio para la calibración de los sensores 5TE de Decagon, con base en el manual del fabricante (Cobos & Chambers, 2009).

Recolección y preparación de las muestras

La calibración se basó en el procedimiento general para calibración de sensores de capacitancia desarrollado por Starr y Paltineanu (2002). Se realizaron muestreos en las Estaciones Experimentales de Cenicafé (Naranjal, El Rosario, El Tambo), en las parcelas de huella hídrica de las etapas de levante y producción, respectivamente, a las dos profundidades, en las que se encontraban instalados los sensores de humedad de suelo (15 y 45 cm). En cada una de las parcelas, se tomaron tres muestras con cilindro de 5 x 5 cm para la determinación de densidad aparente y una muestra de 5 kg para llevar a cabo el proceso de calibración. Las muestras se secaron a 50°C y posteriormente se tamizaron usando el tamiz 10 (2,0 mm), con el fin de retirar partículas grandes y homogenizar la muestra. Se determinó la densidad aparente con base en el peso seco y el volumen de las muestras tomadas con cilindro.

Calibración

Se empacó el suelo seco en recipientes de 5,0 L, por capas, aproximadamente a la densidad aparente determinada, se introdujo el sensor verticalmente y se tomó la medición en bruto (raw data), es decir, sin aplicar la ecuación de calibración que tiene por defecto. Se tomó una muestra de suelo para la determinación de humedad gravimétrica. Se realizó la calibración de forma incremental de suelo seco a suelo húmedo, con al menos cinco puntos de humedad por muestra. Se determinó la humedad volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) como el producto entre la humedad gravimétrica (g g^{-1}) y la densidad aparente (g cm^{-3}).

Ajuste de la ecuación de calibración

Se encontró la ecuación de calibración a partir del gráfico de dispersión que relaciona la salida del sensor en el eje x y el contenido de humedad volumétrico en el eje y. Para las características del suelo de cada parcela, se determinaron los nuevos coeficientes de la ecuación de calibración para 15 y 45 cm, respectivamente, usando los valores en bruto (Raw counts – Unprocessed Data) registrados por el sensor. Para la mayoría de los suelos evaluados se encontró una relación lineal (Ecuación <1>) y en otros una relación cuadrática (Ecuación <2>), que según Cobos y Chambers (2009), se presenta en suelos con contenidos altos de materia orgánica.

$$\text{Humedad} = A + B \text{ (datos sin procesar) } \langle 1 \rangle$$

$$\text{Humedad} = A + B \text{ (datos sin procesar) } + C \text{ (datos sin procesar)}^2 \langle 2 \rangle$$

Etapas de beneficio

Para los lotes en producción se cosecharon los frutos y se beneficiaron en las Estaciones Experimentales, las cuales contaban con sistemas de tratamiento de aguas residuales del

beneficio. En ellas, se cuantificó el volumen de agua utilizada en el beneficio del café, así como el volumen y la calidad del agua a la salida del sistema de tratamiento.

Las aguas captadas utilizadas en el proceso de beneficio y las aguas residuales tratadas en los sistemas de depuración, ubicados a continuación del beneficiadero, se caracterizaron en los parámetros pH, turbidez, DQO, Sólidos Suspendidos Totales, P-PO₄, N-NO₃, N-NH₃ y N_T (Standard Methods, 1992) (Anexo 2).

Cálculo de las huellas hídricas

Cálculo de la HH verde. Se utilizó la siguiente expresión (Ecuación <3>):

$$HH_{\text{verde}} (\text{L/unidad de producto}) = \frac{ET_{\text{agua verde}} + \text{Incorporación}}{\text{Rendimiento}} \quad \langle 3 \rangle$$

Cálculo de la HH azul. Se utilizó la siguiente expresión (Ecuación <4>):

$$HH_{\text{azul}} (\text{L/unidad de producto}) = \frac{ET_{\text{agua azul}} + \text{Incorporación} + \text{Evaporación (A, A, T)}}{\text{Rendimiento}} \quad \langle 4 \rangle$$

Evaporación (A, A, T) se refiere a la evaporación de agua azul durante la aplicación, almacenamiento y transporte.

Cálculo de la HH gris. La HH gris se calculó dividiendo la carga contaminante que entra en un cuerpo de agua (L) sobre la diferencia entre el nivel máximo permisible de un contaminante (C_{max}) y la concentración natural del mismo (C_{nat}), como se presenta en la Ecuación <5>

$$HH_{\text{gris}} (\text{m}^3/\text{ton}) = \frac{L(\text{Carga})}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} \quad \langle 5 \rangle$$

En los sistemas agrícolas la principal fuente de contaminación de agua es difusa, donde una sustancia química (fertilizante o plaguicida) es aplicada al suelo, y solo una fracción se lixivia hasta un cuerpo de agua subterráneo o es arrastrada por agua de escorrentía superficial. Ya que las condiciones del suelo pueden llegar a ser muy heterogéneas no es claro dónde hacer la toma de una muestra representativa. Para el cálculo de la HH gris en este caso, la carga (L) está determinada por un factor alfa (α) que determina la fracción de lixiviación del compuesto y la cantidad de producto químico aplicado al suelo (Appl), como se presenta en la Ecuación <6>.

$$HH_{\text{gris}} = \frac{L = \alpha \times \text{Appl}}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} \times \frac{1}{\text{Rendimiento}} \quad \langle 6 \rangle$$

Según el diseño experimental planteado y las herramientas de medición a emplear, puede cuantificarse el volumen de agua que sale del sistema a través de percolación y escurrimiento. También se hace posible tomar una muestra para caracterización de calidad. Con los valores reales puede usarse el protocolo de cálculo de huella hídrica gris para fuentes puntuales de contaminación, la carga (L) puede determinarse al medir la cantidad de agua que sale del sistema o volumen del efluente (E_{effl}), la concentración del contaminante en el efluente (C_{effl}), la cantidad de agua que ingresa al sistema (Abstr) y la concentración del contaminante en el agua de ingreso o concentración actual (C_{act}), como se presenta en la Ecuación <7>.

$$L = (E_{\text{effl}} \times C_{\text{effl}} - \text{Abstr} \times C_{\text{act}})$$

$$HH_{\text{gris}} = \frac{(E_{\text{effl}} \times C_{\text{effl}} - \text{Abstr} \times C_{\text{act}})}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} \times \frac{1}{\text{Rendimiento}} \quad <7>$$

Concentración natural del contaminante (C_{nat}): es la concentración que debería tener un cuerpo de agua sin alteraciones antrópicas. Las concentraciones naturales de contaminantes en el agua no se conocen con exactitud, pero se estima que son muy bajas, por lo cual es normal asumirlos como cero.

Concentración máxima permitida de un contaminante (C_{max}): según la ubicación del lugar de estudio debe consultarse la norma de los objetivos de calidad de los ríos de influencia en cada cuenca donde se vierten los efluentes del sistema productivo. Cuando no se cuenta con información de regulación de efluentes en la región pueden usarse como guía de referencia los parámetros dados por el Ideam, para calidad de aguas superficiales y los lineamientos dados en el Decreto 1594 de 1984, con respecto a las características de calidad según el uso del recurso (Tabla 5).

Tabla 5. Valores máximos de parámetros en cuerpos de aguas superficiales con categoría de calidad aceptable.

Contaminante	Valor límite (ppm)	Referencia
DQO	25	Ideam (2013)
SST	100	Ideam (2013)
N-NO ₃	45	Decreto 1594 de 1984
P-PO ₄	6	Normativa Europea
N-NH ₃	2	Decreto 1594 de 1984

Cálculo de la HH total

La cuantificación de la HH total del sistema de producción de café correspondió a la HH directa del sistema en las etapas que lo integran (Ecuación <8>):

$$HH_{\text{total}} \text{ (L/kg)} = HH_{\text{directa}}_{\text{fase de cultivo}} + HH_{\text{directa}}_{\text{fase de beneficio}} \text{ <8>}$$

La HH de cada etapa del proceso productivo estuvo dada por la suma de los tres tipos de huellas a partir de las Ecuaciones <9> y <10>.

$$HH_{\text{fase de cultivo}} \text{ (L/kg)} = HH_{\text{Verde}}_{\text{cultivo}} + HH_{\text{Azul}}_{\text{cultivo}} + HH_{\text{Gris}}_{\text{cultivo}} \text{ <9>}$$

$$HH_{\text{fase de beneficio}} \text{ (L/kg)} = HH_{\text{Azul}}_{\text{beneficio}} + HH_{\text{Gris}}_{\text{beneficio}} \text{ <10>}$$



Resultados y discusión

Etapa de germinador

La etapa de germinador tuvo una duración de 96 días (del 29 de septiembre del 2015 hasta el 03 de enero del 2016) en la Estación Experimental Naranjal, de 92 días (del 8 de septiembre del 2015 hasta el 9 de diciembre del 2015) en la Estación Experimental El Tambo, y de 91 días (del 05 de octubre del 2015 al 04 de enero del 2016) en la Estación Experimental El Rosario, para un promedio de 93 días (3,1 meses). Los rendimientos medios del proceso de germinación fueron del 81,91% en la Estación Experimental Naranjal, del 84,62% en la Estación Experimental El Tambo y del 88,01% en la Estación Experimental El Rosario.

En las Figuras 23 y 24 se presentan los aspectos de las chapolas de café, una vez terminada la etapa de germinador.



Figura 23. Aspecto final de la etapa de germinador en las Estaciones Experimentales El Rosario y Naranjal.



Figura 24. Aspecto final de la etapa de germinador en la Estación Experimental El Tambo.

Cálculos para la determinación del balance hídrico en la etapa de germinador

Para el cálculo de la Huella Hídrica de la etapa de germinador del café de Colombia, se utilizó la Ecuación <11> del balance hídrico:

$$P + R = D + INC + ET \quad <11>$$

Donde:

P: precipitación (entrada)

R: riego (entrada)

D: drenados (salida)

INC: incorporación (salida)

ET: evapotranspiración (Salida)

En la Tabla 6 se presentan los valores de las entradas de agua a los germinadores (por precipitación y riego).

Tabla 6. Entradas de agua al germinador.

Variable del Balance hídrico	Germinador	Estación Experimental		
		Naranjal	El Tambo	El Rosario
Precipitación (L m ⁻²)(Entrada)	1	615,80	442,90	487,00
	2	615,80	442,90	487,00
	3	615,80	442,90	487,00
	Promedio	615,80	442,90	487,00
Precipitación (L/germinador) (Entrada)	1	923,70	664,35	730,50
	2	923,70	664,35	730,50
	3	923,70	664,35	730,50
	Promedio	923,70	664,35	730,50
Riego (L/germinador)(Entrada)	1	262,50	209,00	427,00
	2	262,50	209,00	427,00
	3	262,50	209,00	427,00
	Promedio	262,50	209,00	427,00

En la Tabla 7 se presenta el resumen de los valores de las entradas de agua en la etapa de germinación.

En la Tabla 8 se presentan los valores de las salidas de agua de los germinadores por percolación (drenados).

En la Tabla 9 se presentan los valores de las salidas de agua de los germinadores por agua incorporada en el sustrato (arena).

En la Tabla 10 se presentan los valores de las salidas de agua de los germinadores por agua incorporada en la biomasa (chapolas).

En la Tabla 11 se presenta el resumen de los valores de las salidas de agua de la etapa de germinación por drenados y agua incorporada en la arena y en las chapolas.

Tabla 7. Resumen de las entradas de agua en la etapa de germinador.

Variable	Estación Experimental			Promedio (L/germinador)
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Precipitación (L)	923,70	664,35	730,50	772,85
Riego (L)	262,50	209,00	427,00	299,50
Total (L)	1.186,20	873,35	1.157,50	1.072,35

Tabla 8. Salidas de agua en los germinadores. Drenados

Germinador	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	DrLl	DrR	DrT	DrLl	DrR	DrT	DrLl	DrR	DrT
1	196,83	7,45	204,28	343,05	35,06	378,11	203,43	54,14	252,57
2	224,42	8,09	232,51	335,43	34,29	369,72	211,89	51,22	263,11
3	227,77	8,37	236,14	350,52	33,74	384,26	205,69	58,76	264,45
Prom.	216,34	7,97	224,31	343,00	34,36	377,36	207,00	54,71	261,71

DrLl: drenados por lluvia; DrR: drenados por riego; DrT: drenados totales.

Tabla 9. Salidas de agua en los germinadores. Agua incorporada en el sustrato.

Germinador	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	Hi (%)	Hf (%)	ARet (L)	Hi (%)	Hf (%)	ARet (L)	Hi (%)	Hf (%)	ARet (L)
1	3,28	10,58	29,35	0,59	10,33	42,86	2,44	10,36	26,92
2	3,17	10,65	30,07	0,76	10,08	41,01	2,29	10,09	26,53
3	3,41	10,74	29,47	0,70	10,18	41,71	1,87	9,88	27,23
Promedio	3,29	10,66	29,63	0,68	10,20	41,86	2,20	10,11	26,90

Hi: humedad inicial; Hf: humedad final; ARet: agua retenida.

Tabla 10. Salidas de agua en los germinadores. Agua incorporada en la biomasa (chapolas).

Germinador	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	Peso (kg)	H (%)	ARet (L)	Peso (kg)	H (%)	ARet (L)	Peso (kg)	H (%)	ARet (L)
1	2,54	76,76	1,95	1,95	63,85	1,24	2,10	64,82	1,36
2	2,69	73,21	1,97	2,14	71,07	1,52	1,98	66,82	1,32
3	2,45	75,67	1,85	2,00	66,34	1,33	1,80	65,01	1,17
Promedio	2,56	75,21	1,92	2,03	67,09	1,36	1,96	65,55	1,28

H: humedad; ARet: agua retenida.

Tabla 11. Resumen de las salidas de agua en la etapa de germinador: drenados y agua incorporada.

Variable	Estación Experimental			Promedio (L/germinador)
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Drenados (L)	224,31	377,36	261,71	287,79
Agua Incorporada en el sustrato (L)	29,63	41,86	26,90	32,80
Agua Incorporada en la biomasa (L)	1,92	1,36	1,28	1,52
Total (L)	255,86	420,58	289,89	322,11

En la Tabla 12 se presenta el cálculo de la ET (evapotranspiración real), despejada de la ecuación de balance hídrico (Ecuación <12>), para el tiempo de duración de la etapa de germinador en las tres Estaciones Experimentales. También se presentan los valores diarios promedio de ET (L y mm), los valores diarios promedio de ETo (evapotranspiración de referencia) y el valor resultante del coeficiente de cultivo (Kc), calculado como se expresa en la Ecuación <13>:

$$ET = (P + R) \text{ (Entradas)} - (D + INC) \text{ (Salidas)} \text{ <12>}$$

$$Kc = ET/ETo \text{ <13>}$$

Del agua ET total e incorporada al sustrato y a la biomasa (chapolas), una proviene de la lluvia (HH verde) y otra proviene del riego (HH azul). Para su cálculo se consideró el agua de ingreso (por lluvia o por riego) y las salidas de agua por drenados, los cuales estaban clasificados, tanto los provenientes del agua de lluvia como los provenientes del agua de riego. Los resultados se presentan en la Tabla 13.

Tabla 12. Valores de evapotranspiración real (ET), evapotranspiración de referencia (ETo) y del coeficiente de cultivo (Kc) en la etapa de germinador.

Variable	Estación Experimental			Promedio
	Naranja	El Tambo	El Rosario	
Entradas (L)	1.186,20	873,35	1.157,50	1.072,35
Salidas (L)	255,86	420,58	289,89	322,11
ET total (L)	930,34	452,77	867,61	750,24
Tiempo de germinación (d)	96	92	91	93
ET diaria (L)	9,69	4,92	9,53	8,05
ET diaria (mm)	6,46	3,28	6,36	5,37
ETo diaria (mm)	3,24	3,57	3,40	3,40
Kc	1,99	0,92	1,87	1,59

Tabla 13. Discriminación de la evapotranspiración real (ET) en el germinador.

Estación Experimental								
Naranjal			El Tambo			El Rosario		
I Lluvia (L)	I Riego (L)	I Total (L)	I Lluvia (L)	I Riego (L)	I Total (L)	I Lluvia (L)	I Riego (L)	I Total (L)
923,70	262,50	1186,20	664,35	209,00	873,35	730,50	427,00	1157,50
DrLl (L)	DrR (L)	DrT (L)	DrLl (L)	DrR (L)	DrT (L)	DrLl (L)	DrR (L)	DrT (L)
216,34	7,97	224,31	343,00	34,36	377,36	207,00	54,71	261,71
Inc Ll (L)	Inc R (L)	Inc T (L)	Inc Ll (L)	Inc R (L)	Inc T (L)	Inc Ll (L)	Inc R (L)	Inc T (L)
707,36	254,53	961,89	321,35	174,64	495,99	523,50	372,29	895,79
Inc Ll (%)	Inc R (%)	Inc T (%)	Inc Ll (%)	Inc R (%)	Inc T (%)	Inc Ll (%)	Inc R (%)	Inc T (%)
73,54	26,46	100,00	64,79	35,21	100,00	58,44	41,56	100,00
ETv (L)	ETa (L)	ETt (L)	ETv (L)	ETa (L)	ETt (L)	ETv (L)	ETa (L)	ETt (L)
684,16	246,18	930,34	293,35	159,42	452,77	507,03	360,58	867,61

I: Ingreso de agua. DrLl: Drenados por lluvia. DrR: Drenados por riego. DrT: Drenados totales. IncLl: Agua incorporada al proceso, por lluvia. IncR: Agua incorporada al proceso por riego. IncT: Agua incorporada total. ETv: Agua evapotranspirada de la lluvia. ETa: Agua evapotranspirada del riego. ETt: Agua evapotranspirada total.

Determinación de la HH verde y la HH azul

Para el cálculo se utilizaron las siguientes expresiones (Ecuaciones <14> y <15>):

$$HH_{\text{verde}} \text{ (L/kg de semilla germinada)} = \frac{ET_{\text{agua verde}} + \text{incorporación}}{\text{Rendimiento}} \text{ <14>}$$

$$HH_{\text{azul}} \text{ (L/kg de semilla germinada)} = \frac{ET_{\text{agua azul}} + \text{incorporación}}{\text{Rendimiento}} \text{ <15>}$$

Para el caso de la HH azul, dado que el riego se realizó por acarreo, a partir de un tanque de almacenamiento cerrado, se despreció la evaporación por almacenamiento, transporte y aplicación. En la Tabla 14 se presentan los datos utilizados en las Ecuaciones <14> y <15>.

Tabla 14. Datos utilizados en las Ecuaciones <14> y <15>.

Estación Experimental								
Naranjal			El Tambo			El Rosario		
ETv (L)	ETa(L)	ETt (L)	ETv (L)	ETa(L)	ETt (L)	ETv (L)	ETa(L)	ETt (L)
684,16	246,18	930,34	293,35	159,42	452,77	507,03	360,58	867,61
ISv (L)	ISa (L)	ISt (L)	ISv (L)	ISa (L)	ISt (L)	ISv (L)	ISa (L)	ISt (L)
21,79	7,84	29,63	27,12	14,74	41,86	15,72	11,18	26,90
IBv (L)	IBa (L)	IBt (L)	IBv (L)	IBa (L)	IBt (L)	IBv (L)	IBa (L)	IBt (L)
1,41	0,51	1,92	0,88	0,48	1,36	0,75	0,53	1,28
ITv (L)	ITa (L)	ITt (L)	ITv (L)	ITa (L)	ITt (L)	ITv (L)	ITa (L)	ITt (L)
23,20	8,35	31,55	28,00	15,22	43,22	16,47	11,71	28,18
(ET+IT) verde (L)	(ET+IT) azul (L)	(ET+IT) total (L)	(ET+IT) verde (L)	(ET+IT) azul (L)	(ET+IT) total (L)	(ET+IT) verde (L)	(ET+IT) azul (L)	(ET+IT) total (L)
707,36	254,53	961,89	321,35	174,64	495,99	523,50	372,29	895,79
Semilla Inicial granos	Semilla germ. granos	Rdmt (%)	Semilla inicial granos	Semilla germ. granos	Rdmt (%)	Semilla Inicial granos	Semilla germ. granos	Rdmt (%)
4.545	3.723	81,91	4.545	3.846	84,62	4.545	4.000	88,01

ETv: Agua evapotranspirada de la lluvia. ETa: Agua evapotranspirada de riego. ETt: Agua evapotranspirada total. ISv: Agua incorporada al sustrato de la lluvia. ISa: Agua incorporada al sustrato del riego. ISt: Agua incorporada total. IBv: Agua incorporada a la biomasa de la lluvia. ISa: Agua incorporada a la biomasa del riego. ISt: Incorporada a la biomasa, total. ITv: Agua total incorporada de la lluvia. ITa: Agua total incorporada del riego. ITt: Agua total incorporada. (ET+IT)v: Agua evapotranspirada e incorporada de la lluvia. (ET+IT)a: Agua evapotranspirada e incorporada de riego. (ET+IT)t: Agua total evapotranspirada e incorporada.

En la Tabla 15 se presentan los resultados de la HH verde y la HH azul para la etapa de germinador.

Tabla 15. Valores de la HH verde y HH azul en la etapa de germinador.

Tipo de Huella	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Huella Hídrica Verde	863,58 L kg ⁻¹ semilla germinada	379,76 L kg ⁻¹ semilla germinada	594,82 L kg ⁻¹ semilla germinada	612,72 L kg ⁻¹ semilla germinada
	575,72 L m ⁻² de germinador	253,17 L m ⁻² de germinador	396,55 L m ⁻² de germinador	408,48 L m ⁻² de germinador
	0,190 L/chapola	0,084 L/chapola	0,131 L/chapola	0,135 L/chapola
Huella Hídrica Azul	310,74 L kg ⁻¹ semilla germinada	206,38 L kg ⁻¹ semilla germinada	423,01 L kg ⁻¹ semilla germinada	313,38 L kg ⁻¹ semilla germinada
	207,16 L m ⁻² de germinador	137,59 L m ⁻² de germinador	282,01 L m ⁻² de germinador	208,92 L m ⁻² de germinador
	0,068 L/chapola	0,045 L/chapola	0,093 L/chapola	0,069 L/chapola

Determinación de la HH gris

En las Tablas 16 a la 19 se presentan los resultados de la caracterización realizada a los drenados resultantes de la etapa de germinador. La HH gris se estima teniendo en cuenta la concentración de cada uno de los parámetros evaluados que supere los valores de calidad condensados en la Tabla 5. La HH gris es aquella equivalente a la del parámetro, de los seleccionados por superar los valores de calidad establecidos, que genere el mayor valor, aplicando la **Ecuación <16>**:

$$\text{HH gris Germinador (L kg}^{-1} \text{ sem. germinada)} = \frac{(\text{Vdrenados} \times C_{\text{parámetro}}) - (\text{Va} - \text{Ca})}{C_{\text{maxparámetro}}} \quad \text{<16>}$$

Dónde:

Vdrenados: Volumen de los drenados recogidos (L kg⁻¹).

C_{parámetro} = concentración del parámetro evaluado en los drenados (que supera los valores de calidad establecidos) (g L⁻¹).

Va = volumen de agua que ingresa al germinador (L)

Ca = concentración del parámetro de interés en el agua que ingresa al germinador (g L⁻¹).

C_{maxparámetro} = concentración máxima del parámetro evaluado de acuerdo con los valores de calidad establecidos (g L⁻¹).

De los parámetros caracterizadores, sólo la Demanda Química de Oxígeno (DQO) estuvo por encima de la concentración máxima en cuerpos de agua superficial con calidad aceptable, por tal motivo, la HH gris se calculó con base en este parámetro.

Tabla 16. Caracterización de los drenados de la etapa de germinador. Estación Experimental Naranjal.

Estación Experimental Naranjal						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Germinador 1						
Promedio	6,89	26	98	48	4,84	10,98
Máximo	9,44	46	105	58	6,82	14,80
Mínimo	5,79	9	93	41	3,46	6,80
Datos	12	12	12	12	12	12
DE	1,12	11,62	4,17	6,01	1,08	2,70
CV	16,19	44,87	4,25	12,49	22,35	24,59
IC	0,63	6,57	2,36	3,40	0,61	1,53
Germinador 2						
Promedio	6,21	25	91	52	3,81	8,78
Máximo	6,93	63	104	89	5,61	12,10
Mínimo	5,24	8	75	40	2,42	5,80
Datos	12	12	12	12	12	12
DE	0,57	18,91	9,87	15,10	1,19	1,89
CV	9,24	76,78	10,88	28,95	31,11	21,52
IC	0,32	10,70	5,58	8,54	0,67	1,07
Germinador 3						
Promedio	6,95	20	96	53	3,66	9,34
Máximo	9,49	148	121	77	5,14	15,40
Mínimo	5,89	3	74	41	2,81	5,50
Datos	12	12	12	12	12	12
DE	1,07	40,65	11,56	9,17	0,86	3,12

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental Naranjal						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
CV	15,42	202,32	12,03	17,38	23,44	33,43
IC	0,61	23,00	6,54	5,19	0,49	1,77
Promedio Etapa de germinación Estación Experimental Naranjal						
Promedio	6,68	24	95	51	4,10	9,70
Máximo	9,49	148	121	89	6,82	15,40
Mínimo	5,24	3	74	40	2,42	5,50
Datos	36	36	36	36	36	36
DE	0,99	26,09	9,39	10,67	1,15	2,72
CV	14,77	110,82	9,88	20,92	28,07	27,99
IC	0,32	8,52	3,07	3,49	0,38	0,89

Tabla 17. Caracterización de los drenados de la etapa de germinador. Estación Experimental El Tambo.

Estación Experimental El Tambo						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Germinador 1						
Promedio	6,88	27	95	93	5,08	8,55
Máximo	8,82	110	183	120	8,06	10,70
Mínimo	6,22	2	61	70	3,14	6,30
Datos	12	12	12	12	12	12
DE	0,80	33,32	37,11	16,19	1,74	1,69
CV	11,70	124,98	39,06	17,47	34,29	19,76
IC	0,45	18,85	21,00	9,16	0,98	0,96
Germinador 2						
Promedio	6,20	10	101	94	3,62	8,87
Máximo	7,51	25	149	170	6,22	10,70

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental El Tambo						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
v	4,96	2	62	64	2,08	6,90
Datos	12	12	12	12	12	12
DE	0,69	7,87	33,68	25,83	1,36	1,20
CV	11,11	78,43	33,35	27,43	37,64	13,49
IC	0,39	4,45	19,06	14,61	0,77	0,68
Germinador 3						
Promedio	6,18	22	83	92	2,40	6,88
Máximo	9,02	83	125	112	4,88	10,40
Mínimo	4,89	4	71	69	1,20	4,00
Datos	12	12	12	12	12	12
DE	1,34	23,54	14,80	11,92	1,15	2,16
CV	21,70	107,53	17,83	12,93	47,76	31,32
IC	0,76	13,32	8,37	6,74	0,65	1,22
Promedio Etapa de germinación Estación Experimental El Tambo						
Promedio	6,42	20	93	93	3,70	8,10
Máximo	9,02	110	183	170	8,06	10,70
Mínimo	4,89	2	61	64	1,20	4,00
Datos	36	36	36	36	36	36
DE	1,01	24,35	30,26	18,37	1,78	1,89
CV	15,79	124,66	32,54	19,75	48,23	23,38
IC	0,33	7,95	9,88	6,00	0,58	0,62

Tabla 18. Caracterización de los drenados de la etapa de germinador. Estación Experimental El Rosario.

Estación Experimental El Rosario						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Germinador 1						
Promedio	6,03	14	78	82	1,18	4,07
Máximo	8,82	34	112	121	2,50	8,90
Mínimo	5,15	2	51	50	0,76	2,20
Datos	12	12	12	12	12	12
DE	1,48	9,59	22,33	21,44	0,59	2,19
CV	24,60	70,32	28,54	26,31	49,83	53,90
IC	0,84	5,43	12,63	12,13	0,33	1,24
Germinador 2						
Promedio	8,26	34	94	98	2,36	2,26
Máximo	9,42	76	130	162	2,90	3,00
Mínimo	6,35	10	66	71	1,26	1,40
Datos	12	12	12	12	12	12
DE	1,01	22,35	27,13	23,64	0,52	0,50
CV	12,20	66,52	28,73	24,21	22,26	22,30
IC	0,57	12,65	15,35	13,38	0,29	0,28
Germinador 3						
Promedio	6,95	28	97	100	1,85	2,97
Máximo	9,17	51	134	193	2,89	4,80
Mínimo	6,08	3	74	60	1,04	1,80
Datos	12	12	12	12	12	12
DE	0,83	14,25	16,16	45,72	0,67	1,06
CV	11,95	50,75	16,60	45,79	36,02	35,86
IC	0,47	8,06	9,14	25,87	0,38	0,60

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental El Rosario						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Promedio Etapa de germinación Estación Experimental El Rosario						
Promedio	7,08	25	90	93	1,80	3,10
Máximo	9,42	76	134	193	2,90	8,90
Mínimo	5,15	2	51	50	0,76	1,40
Datos	36	36	36	36	36	36
DE	1,44	17,96	23,29	32,34	0,76	1,59
CV	20,41	71,53	25,88	34,77	42,14	51,20
IC	0,47	5,87	7,61	10,56	0,25	0,52

Tabla 19. Caracterización de los drenados de la etapa de germinador.

Promedio de las tres Estaciones Experimentales						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Promedio	6,73	22	93	79	3,20	6,97
Máximo	9,49	148	183	193	8,06	15,40
Mínimo	4,89	2	51	40	0,76	1,40
Datos	108	108	108	108	108	108
DE	1,19	22,97	22,59	29,76	1,64	3,52
CV	17,66	101,07	24,37	37,66	51,18	50,54
IC	0,22	4,33	4,26	5,61	0,31	0,66

En las Tablas 20, 21 y 22 se presentan los resultados de la caracterización realizada al agua de lluvia y al agua de riego que ingresó al germinador.

Tabla 20. Caracterización del agua de ingreso a los germinadores en la Estación Experimental Naranjal.

Estación Experimental Naranjal						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Caracterización del agua de lluvia						
Promedio	6,33	2,68	8	6	0,09	0,33
Máximo	7,07	4,13	11	8	0,10	0,40
Mínimo	5,23	1,40	5	4	0,08	0,30
Datos	3	3	3	3	3	3
DE	0,97	1,37	3,06	2,08	0,01	0,06
CV	15,32	51,14	36,66	32,87	11,11	17,32
IC	1,10	1,55	3,46	2,36	0,01	0,07
Caracterización del agua de riego						
Promedio	6,34	3,22	7	9	0,33	1,93
Máximo	7,10	4,24	12	12	0,43	2,40
Mínimo	5,23	1,97	3	5	0,27	1,30
Datos	3	3	3	3	3	3
DE	0,98	1,15	4,58	3,61	0,09	0,57
CV	15,48	35,79	65,47	40,06	26,42	29,41
IC	1,11	1,30	5,19	4,08	0,10	0,64

Tabla 21. Caracterización del agua de ingreso a los germinadores en la Estación Experimental El Tambo.

Estación Experimental El Tambo						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Caracterización del agua de lluvia						
Promedio	6,23	2,74	15	12	0,51	1,50
Máximo	6,98	5,05	21	14	0,71	2,40
Mínimo	5,79	1,45	9	10	0,39	0,70

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental El Tambo						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Datos	3	3	3	3	3	3
DE	0,65	2,01	6,00	2,00	0,17	0,85
CV	10,48	73,18	40,00	16,67	33,53	56,96
IC	0,74	2,27	6,79	2,26	0,19	0,97
Caracterización del agua de riego						
Promedio	5,77	3,84	12	15	0,14	2,40
Máximo	5,94	4,91	16	18	0,18	3,40
Mínimo	5,62	1,74	8	12	0,12	1,30
Datos	3	3	3	3	3	3
DE	0,16	1,82	4,04	3,00	0,03	1,05
CV	2,80	47,40	32,77	20,00	22,43	43,90
IC	0,18	2,06	4,57	3,39	0,04	1,19

Tabla 22. Caracterización del agua de ingreso a los germinadores en la Estación Experimental El Rosario.

Estación Experimental El Rosario						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Caracterización del agua de lluvia						
Promedio	6,40	2,61	10	10	0,71	2,23
Máximo	7,08	3,81	14	11	0,81	3,00
Mínimo	5,53	1,57	7	8	0,65	0,90
Datos	3	3	3	3	3	3
DE	0,79	1,13	3,51	1,53	0,09	1,16
CV	12,39	43,32	33,99	15,80	12,28	51,90
IC	0,90	1,28	3,97	1,73	0,10	1,31

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental El Rosario						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Caracterización del agua de riego						
Promedio	6,39	2,44	11	14	0,69	2,53
Máximo	6,78	3,44	12	19	0,90	2,80
Mínimo	5,89	1,27	9	11	0,45	2,20
Datos	3	3	3	3	3	3
DE	0,46	1,10	1,53	4,36	0,23	0,31
CV	7,12	44,85	14,32	31,13	32,83	12,06
IC	0,51	1,24	1,73	4,93	0,26	0,35

Dado que el único parámetro que excedió los valores de calidad fue la DQO, en los drenados caracterizados, se tuvo en cuenta la concentración de este parámetro en el agua de ingreso, para aplicar la fórmula de cálculo de la HH gris, restando a la carga másica de los drenados, la carga másica de los ingresos. En la Tabla 23 se presentan los valores.

Tabla 23. Volumen y DQO de las entradas de agua en la etapa de germinador.

Variable	Estación Experimental		
	Naranjal	El Tambo	El Rosario
Precipitación (L)	923,70	664,35	730,50
DQO en agua de lluvia (mg L ⁻¹)	6	12	10
Carga másica DQO lluvia (g kg ⁻¹)	5,54	7,97	7,31
Riego (L)	262,50	209,00	427,00
DQO en el agua de riego (mg L ⁻¹)	9	15	14
Carga másica DQO riego (g kg ⁻¹)	2,36	3,14	5,98
Carga másica de ingreso (g kg⁻¹)	7,90	11,11	13,28

A continuación, se presentan los cálculos realizados para determinar la HH gris en la etapa de germinador en las tres Estaciones Experimentales.

$$\text{HHg Naranjal (L kg}^{-1} \text{ sem. germinada)} = \frac{(224,31(\text{L kg}^{-1}) * 0,051 (\text{g L}^{-1})) - 7,90(\text{g kg}^{-1})}{0,025 (\text{g L}^{-1})} = \mathbf{141,40 \text{ L kg}^{-1}}$$

$$\text{HHg El Tambo (L kg}^{-1} \text{ sem. germinada)} = \frac{(337,36(\text{L kg}^{-1}) * 0,093 (\text{g L}^{-1})) - 11,11(\text{g kg}^{-1})}{0,025 (\text{g L}^{-1})} = \mathbf{959,49 \text{ L kg}^{-1}}$$

$$\text{HHg El Rosario (L kg}^{-1} \text{ sem. germinada)} = \frac{(261,71(\text{L kg}^{-1}) * 0,093 (\text{g L}^{-1})) - 13,28(\text{g kg}^{-1})}{0,025 (\text{g L}^{-1})} = \mathbf{442,24 \text{ L kg}^{-1}}$$

En la Tabla 24 se presentan los valores de la HH gris para la etapa de germinador en las tres Estaciones Experimentales.

Tabla 24. Valores de la HH gris en la etapa de germinador.

HH gris	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
HH gris (L kg ⁻¹ semilla germinada)	141,40	959,49	442,24	514,38
HH gris (L m ² de germinador)	94,27	639,66	294,83	342,92
HH gris (L/chapola)	0,038	0,249	0,111	0,133

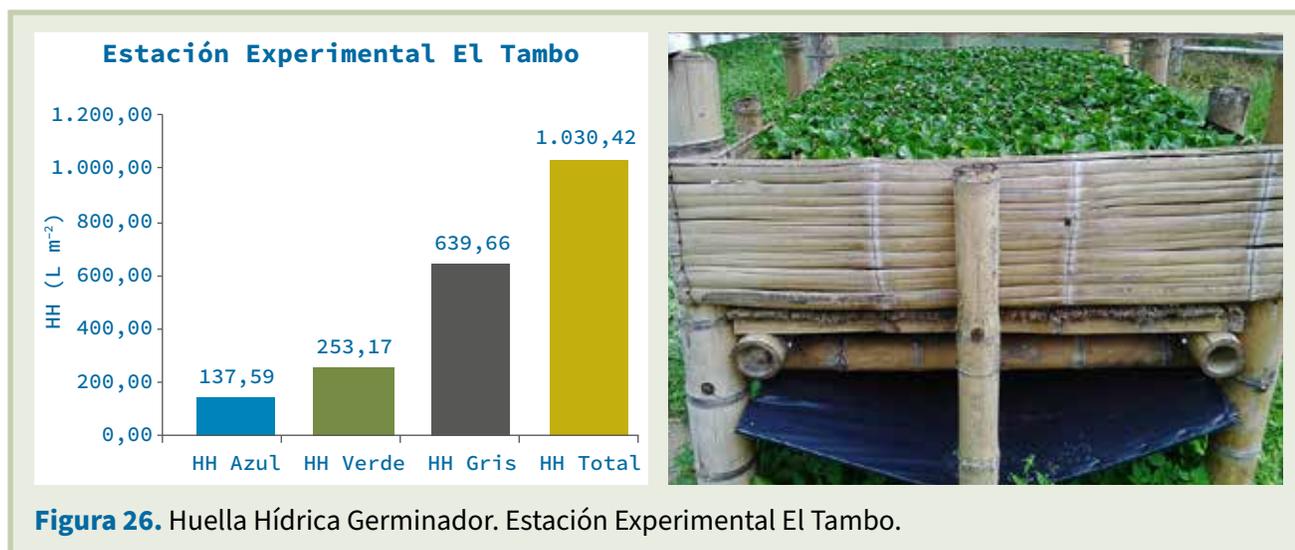
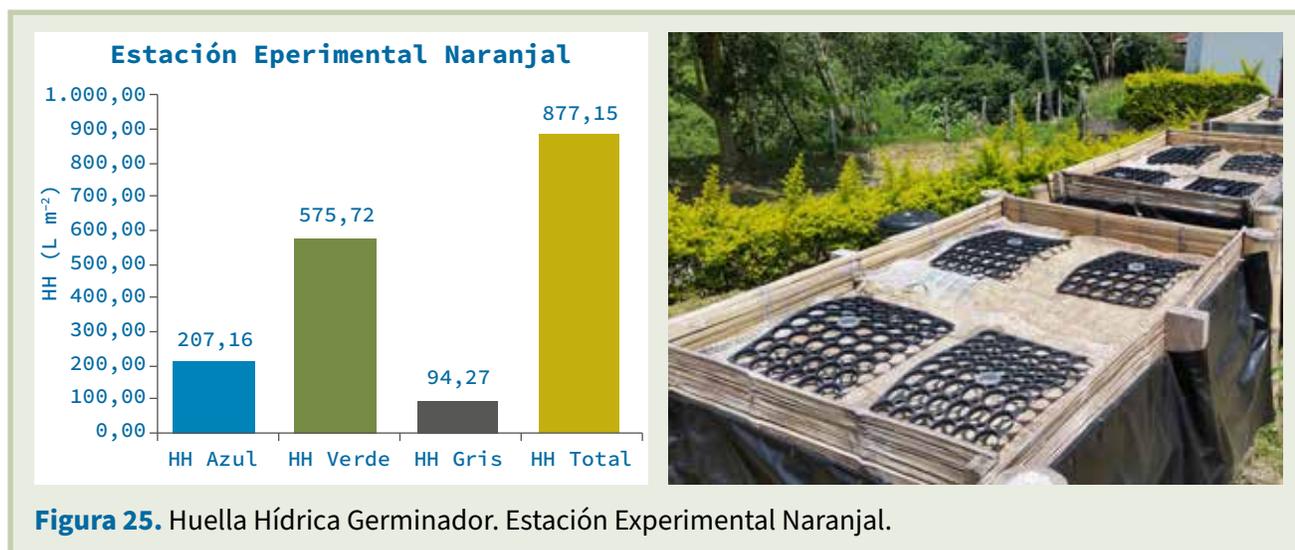
En las Figuras 25, 26 y 27 se presentan los resultados de las HH para las diferentes Estaciones Experimentales para la etapa de germinador.

De los resultados presentados en las Figuras 25, 26 y 27 puede apreciarse que la HH total en la etapa de germinador varió entre 877,15 L m² (en la Estación Experimental Naranjal) y 1.030,42 L m² (en la Estación Experimental El Tambo). La HH azul alcanzó valores de 137,59 L m² (en la

Estación Experimental El Tambo), 207,16 L m² (en la Estación Experimental Naranjal) y 282,01 L m² (en la Estación Experimental El Rosario). La HH verde alcanzó valores de 253,17 L m² (en la Estación Experimental El Tambo), 396,55 L m² (en la Estación Experimental El Rosario) y 575,72 L m² (en la Estación Experimental Naranjal). La HH gris alcanzó valores de 94,27 L m² (en la Estación Experimental Naranjal), 294,83 L m² (en la Estación Experimental El Rosario) y 639,66 L m² (en la Estación Experimental El Tambo).

Resultados Huella Hídrica etapa germinador

En la Tabla 25 y en la Figura 28 se presentan los resultados promedio de la huella hídrica para la etapa de germinador.



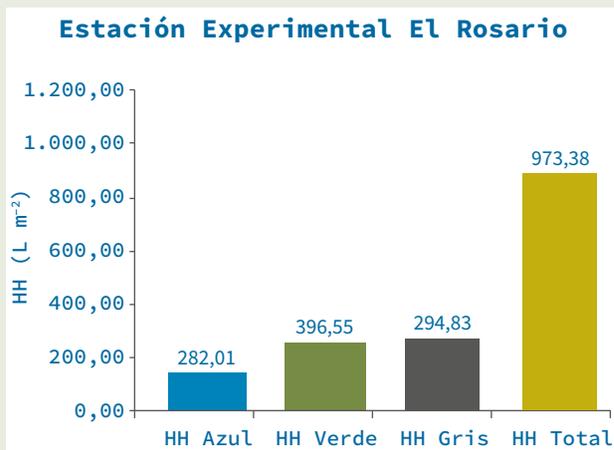


Figura 27. Huella Hídrica Germinador. Estación Experimental El Rosario.

La HH total promedio de la etapa de germinador, evaluada en las tres estaciones experimentales de Cenicafé, fue de 960,32 L m⁻², representando la HH verde el 42,54% (408,48 L m⁻²), la HH gris un porcentaje del 35,71% (342,92 L m⁻²) y la HH azul el 21,76% (208,92 L m⁻²).

En la Tabla 26 y en la Figura 29 se presentan los resultados promedio de la huella hídrica para cada chapola obtenida en los germinadores de las tres Estaciones Experimentales.

Tabla 25. Valores promedio de la HH en la etapa de germinador.

Unidades	HH Azul	HH verde	HH gris	HH total
L m ⁻²	208,92	408,48	342,92	960,32

Tabla 26. Valores promedio de la HH de las chapolas de café.

Tipo de huella	Estación			Promedio
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Azul (L/chapola)	0,068	0,045	0,093	0,069
Verde (L/Chapola)	0,190	0,084	0,131	0,135
Gris (L/ Chapola)	0,038	0,249	0,111	0,133
Total (L/Chapola)	0,296	0,378	0,335	0,336

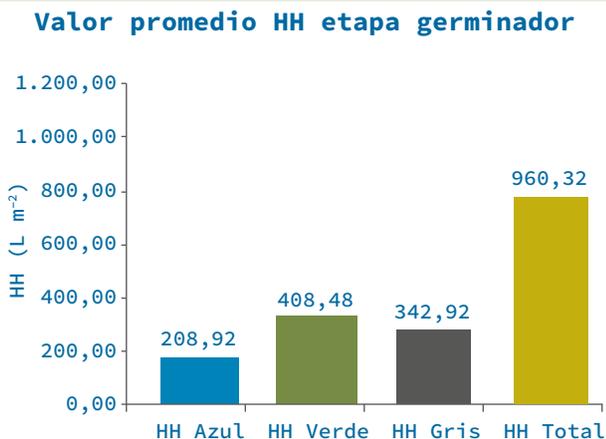


Figura 28. Valores promedio de la Huella Hídrica en la etapa de germinador.

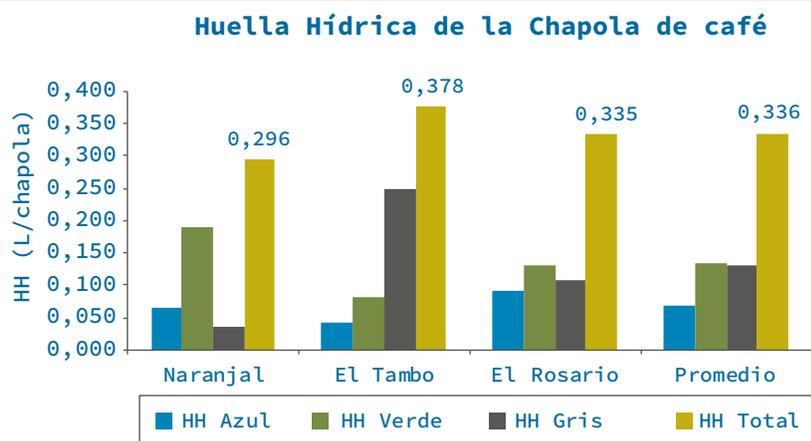


Figura 29. Valores promedio de la Huella Hídrica por chapola de café.

La menor huella hídrica por chapola de café producida fue para la Estación Experimental Naranjal, con un valor de 0,296 L/chapola (la HH verde representó el 64,11% del total de la HH, la HH azul representó el 23,07% y la HH gris representó el 12,82%). Para la Estación Experimental El Rosario, la HH fue de 0,335 L/chapola (La HH verde representó el 39,12% de la HH total, la HH azul representó el 27,82% y la HH gris representó el 33,05%). Para la Estación Experimental El Tambo, la HH fue de 0,378 L/chapola (HH verde del 22,08%, la HH verde representó el 22,08% de la HH total, la HH azul representó el 12,00% y la HH gris representó el 65,92%).

La huella hídrica promedio para la producción de una chapola de café fue de 0,336 L/chapola (HH verde del 40,07%, HH azul del 20,49% y HH gris del 39,44%).

Etapa de almácigo

La etapa de almácigo tuvo una duración de 226 días (del 4 de enero del 2016 hasta el 17 de agosto del 2016) en la Estación Experimental Naranjal, de 182 días (del 26 enero del 2016 hasta el 26 de julio del 2016) en la Estación Experimental El Tambo y de 195 días (del 11 de febrero del 2016 al 25 de agosto del 2016) en la Estación Experimental El Rosario, para un promedio de 201 días (6,7 meses). Los rendimientos medios de la etapa de almácigo fueron del 96% en la Estación Experimental Naranjal, del 94% en la Estación Experimental El Tambo y del 92% en la Estación Experimental El Rosario. En las Figuras 30, 31 y 32 se presentan los aspectos de los colinos de café, una vez terminada la etapa de almácigo.

Cálculos para la determinación del balance hídrico en la etapa almácigo

Para el cálculo de la Huella Hídrica de la etapa de almácigo del café de Colombia se utilizó la Ecuación <11>.

En la Tabla 27 se presentan los valores de las entradas de agua al almácigo (por precipitación y riego).

En la Tabla 28 se presenta el resumen de los valores de las entradas de agua en la etapa de almácigo .

Tabla 27. Entradas de agua al almácigo.

Variable del balance hídrico	Almácigo	Estación Experimental		
		Naranjal	El Tambo	El Rosario
Precipitación (L m ⁻²) (Entrada)	B1	1.352,10	748,10	979,60
	B2	1.352,10	748,10	979,60
	B3	1.352,10	748,10	979,60
	Promedio	1.352,10	748,10	979,60
Precipitación (L/Bloque)(Entrada)	B1	6.625,29	3.665,69	4.800,04
	B2	6.625,29	3.665,69	4.800,04
	B3	6.625,29	3.665,69	4.800,04
	Promedio	6.625,29	3.665,69	4.800,04

Continúa...

...continuación.

Variable del balance hídrico	Almácigo	Estación Experimental		
		Naranjal	El Tambo	El Rosario
Riego (L/Bloque) (Entrada)	B1	1.821,00	1.200,50	4.500,00
	B2	1.818,00	1.202,50	4.620,00
	B3	1.836,50	1.200,50	4.680,00
	Promedio	1.825,17	1.201,17	4.600,00

Tabla 28. Resumen de las entradas de agua al almácigo.

Variable	Estación Experimental			Promedio (L/bloque)
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Precipitación (L)	6.625,29	3.665,69	4.800,04	5.030,34
Riego (L)	1.825,17	1.201,17	4.600,00	2.542,11
Total (L)	8.450,46	4.866,86	9.400,04	7.572,45

En la Tabla 29 se presentan los valores de las salidas de agua del almácigo por percolación (drenados).

Tabla 29. Salidas de agua en los almácigos. Drenados.

Bloque	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	DrLl	DrR	DrT	DrLl	DrR	DrT	DrLl	DrR	DrT
1	1.160,54	307,23	1.467,77	795,88	310,50	1.106,48	1.248,63	648,13	1.896,76
2	934,54	203,19	1.137,73	700,98	299,00	999,98	976,41	687,52	1.663,93
3	1.330,54	338,17	1.668,71	466,98	324,50	791,48	1.252,80	767,01	2.019,81
Prom.	1.141,88	282,86	1.424,74	654,65	311,33	965,98	1.159,28	700,89	1.860,17

DrLl: drenados por lluvia. DrR: drenados por riego. DrT: drenados totales.

En la Tabla 30 se presentan los valores de las salidas de agua de los almácigos por agua incorporada en el sustrato (suelo).



Figura 30. Aspecto final de la etapa de almacigo en la Estación Experimental El Rosario.



Figura 31. Aspecto final de la etapa de almacigo en la Estación Experimental Naranjal.



Figura 32. Aspecto final de la etapa de almacigo en la Estación Experimental El Tambo.

Tabla 30. Salidas de agua en los almácigos. Agua incorporada en el sustrato.

Bloque	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	CC (%)	Vs (L)	ARet (L)	CC (%)	Vs (L)	ARet (L)	CC (%)	Vs (L)	ARet (L)
1	51,2	2,38	511,80	50,90	2,80	598,58	42,90	2,21	398,20
2	51,2	2,31	496,74	50,90	2,71	579,34	42,90	2,26	407,21
3	51,2	2,16	464,49	50,90	2,87	613,55	42,90	2,37	427,03
Promedio	51,2	2,28	491,01	50,90	2,79	597,16	42,90	2,28	410,81

CC: Capacidad de campo. Vs: Volumen de suelo. ARet: Agua retenida.

En la Tabla 31 se presentan los valores de las salidas de agua de los almácigos por agua incorporada en la biomasa (colinos).

Tabla 31. Salidas de agua en los almácigos. Agua incorporada en los colinos.

Bloque	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	Peso (kg)	H (%)	ARet (L)	Peso (kg)	H (%)	ARet (L)	Peso (kg)	H (%)	ARet (L)
1	47,91	74,17	35,53	22,74	72,24	16,43	28,42	71,34	20,27
2	41,92	72,80	30,51	28,84	69,85	20,14	30,09	72,92	21,94
3	39,76	73,08	29,05	31,47	74,36	23,40	34,80	74,11	25,79
Promedio	43,19	73,35	31,70	27,68	72,15	19,99	31,10	72,79	22,67

H: Humedad. ARet: Agua retenida.

En la Tabla 32 se presenta el resumen de los valores de las salidas de agua de la etapa de almácigo por drenados y agua incorporada en el suelo y los colinos.

Tabla 32. Resumen salidas de agua en la etapa de almácigo: drenados y agua incorporada.

Variable	Estación Experimental			Promedio (L/almácigo)
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Drenados (L)	1.424,74	965,98	1.860,17	1.416,96
Incorporada en el sustrato (L)	491,01	597,16	410,81	499,66
Incorporada en la biomasa (L)	31,70	19,99	22,67	24,79
Total (L)	1.947,45	1.583,13	2.293,65	1.941,41

En la Tabla 33 se presenta el cálculo de la ET, despejada de la ecuación de balance hídrico (Ecuación <12>), para el tiempo de duración de la etapa de almácigo en las tres Estaciones. También se presentan los valores diarios promedio de ET, los valores diarios promedio de ETo y el valor resultante del coeficiente de cultivo (Kc) obtenido de la Ecuación <13>.

Del agua ET total e incorporada al sustrato y a la biomasa (colinos), una proviene de la lluvia (HH verde) y otra proviene del riego (HH azul). Para su cálculo se consideró el agua de ingreso (por lluvia o por riego) y las salidas de agua por drenados, los cuales estaban clasificados, tanto los provenientes del agua de lluvia como los provenientes del agua de riego. Los resultados se presentan en la Tabla 34.

Tabla 33. Valores de evapotranspiración real (ET), evapotranspiración de referencia (ETo) y del coeficiente de cultivo (Kc) en la etapa de almácigo.

Variable	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Entradas (L)	8.450,46	4.866,86	9.400,04	7.572,45
Salidas (L)	1.947,45	1.583,13	2.293,65	1.941,41
ET Total (L)	6.503,01	3.283,72	7.106,39	5.631,04
Tiempo de almácigo (d)	226	182	195	201
ET diaria (L)	28,77	18,04	36,44	27,75
ET diaria (mm)	2,94	1,84	3,72	2,83
ETo diaria (mm)	3,46	3,21	3,92	3,53
Kc	0,85	0,57	0,95	0,79

Tabla 34. Discriminación de la evapotranspiración real en el almácigo.

Estación Experimental								
Naranjal			El Tambo			El Rosario		
I Lluvia (L)	I Riego (L)	I Total (L)	I Lluvia (L)	I Riego (L)	I Total (L)	I Lluvia (L)	I Riego (L)	I Total (L)
6.625,29	1.825,17	8.450,46	3.665,69	1.201,17	4.866,86	4.800,04	4.600,00	9.400,04
DrLl (L)	DrR (L)	DrT (L)	DrLl (L)	DrR (L)	DrT (L)	DrLl (L)	DrR (L)	DrT (L)
1.141,88	282,86	1.424,74	654,65	311,33	965,98	1.159,28	700,89	1.860,17
Inc Ll (L)	Inc R (L)	Inc T (L)	Inc Ll (L)	Inc R (L)	Inc T (L)	Inc Ll (L)	Inc R (L)	Inc T (L)
5.483,41	1.542,30	7.025,72	3.011,04	889,83	3.900,87	3.640,76	3.899,11	7.539,87
Inc Ll (%)	Inc R (%)	Inc T (%)	Inc Ll (%)	Inc R (%)	Inc T (%)	Inc Ll (%)	Inc R (%)	Inc T (%)
78,05	21,95	100,00	77,19	22,81	100,00	48,29	51,71	100,00
ETv (L)	ETa (L)	ETt (L)	ETv (L)	ETa (L)	ETt (L)	ETv (L)	ETa (L)	ETt (L)
5.075,45	1.427,56	6.503,01	2.534,67	749,05	3.283,72	3.431,44	3.674,95	7.106,39

I: Ingreso de agua. DrLl: Drenados por lluvia. DrR: Drenados por riego. DrT: Drenados totales. IncLl: Agua incorporada al proceso por lluvia. IncR: Agua incorporada al proceso por riego. IncT: Agua incorporada al proceso total. ETv: Agua evapotranspirada de la lluvia. ETa: Agua evapotranspirada de riego. ETt: Agua evapotranspirada total.

Determinación de la HH verde y la HH azul

Para el cálculo se utilizaron las siguientes expresiones (Ecuaciones <17> y <18>):

$$HH_{\text{verde}} \text{ (L/bloque)} = \frac{ET_{\text{agua verde}} + \text{incorporación}}{\text{Rendimiento}} \quad <17>$$

$$HH_{\text{azul}} \text{ (L/bloque)} = \frac{ET_{\text{azul}} + \text{incorporación}}{\text{Rendimiento}} \quad <18>$$

Para el caso de la HH azul, dado que el riego se realizó por acarreo, a partir de un tanque de almacenamiento cerrado, se despreció la evaporación por almacenamiento, transporte y aplicación. En la Tabla 35 se presentan los datos utilizados en las Ecuaciones <17> y <18>.

Tabla 35. Datos utilizados en las Ecuaciones <17> y <18>.

Estación Experimental								
Naranjal			El Tambo			El Rosario		
ETv (L)	ETa(L)	ETt (L)	ETv (L)	ETa(L)	ETt (L)	ETv (L)	ETa(L)	ETt (L)
5.075,45	1.427,56	6.503,01	2.534,67	749,05	3.283,72	3.431,44	3.674,95	7.106,39
ISv (L)	ISa (L)	ISt (L)	ISv (L)	ISa (L)	ISt (L)	ISv (L)	ISa (L)	ISt (L)
383,22	107,79	491,01	460,94	136,22	597,16	198,37	212,44	410,81
IBv (L)	IBa (L)	IBt (L)	IBv (L)	IBa (L)	IBt (L)	IBv (L)	IBa (L)	IBt (L)
24,74	6,96	31,70	15,43	4,56	19,99	10,95	11,72	22,67
ITv (L)	ITa (L)	ITt (L)	ITv (L)	ITa (L)	ITt (L)	ITv (L)	ITa (L)	ITt (L)
407,96	114,75	522,71	476,37	140,78	617,15	209,31	224,17	433,48
(ET+IT) verde (L)	(ET+IT) azul (L)	(ET+IT) total (L)	(ET+IT) verde (L)	(ET+IT) azul (L)	(ET+IT) total (L)	(ET+IT) verde (L)	(ET+IT) azul (L)	(ET+IT) total (L)
5.483,42	1.542,30	7.025,72	3.011,04	889,83	3.900,87	3.640,76	3.899,11	7.539,87
Rendimiento (%)			Rendimiento (%)			Rendimiento (%)		
96			94			92		

ETv: Agua evapotranspirada de la lluvia. ETa: Agua evapotranspirada de riego. ETt: Agua Evapotranspirada total. ISv: Agua de la lluvia incorporada al sustrato. ISa: Agua del riego incorporada al sustrato. ISt: Incorporada total. IBv: Agua de la lluvia incorporada a la biomasa. ISa: Agua del riego incorporada a la biomasa. ISt: Agua total incorporada a la biomasa. ITv: Agua total incorporada de la lluvia. ITa: Agua total incorporada del riego. ITt: Agua total incorporada. (ET+IT)v: Agua evapotranspirada e incorporada de la Lluvia. (ET+IT)a: Agua evapotranspirada e incorporada de riego. (ET+IT)t: Agua total evapotranspirada e incorporada.

En la Tabla 36 se presentan los resultados de la HH verde y la HH azul para la etapa de almácigo.

Tabla 36. Valores de la HH verde y HH azul en la etapa de almácigo.

Tipo de Huella	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Huella Hídrica Verde	5.711,89 L/bloque	3.203,23 L/bloque	3.957,34 L/bloque	4.290,82 L/bloque
	1.165,69 L m ⁻²	653,72 L m ⁻²	807,62 L m ⁻²	875,68 L m ⁻²
	13,60 L/colino	7,63 L/colino	9,42 L/colino	10,22 L/colino

Continúa...

...continuación.

Tipo de Huella	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Huella Hídrica Azul	1.606,57 L/bloque	946,63 L/bloque	4.238,17 L/bloque	2.263,79 L/bloque
	327,87 L m ⁻²	193,19 L m ⁻²	864,93 L m ⁻²	462,00 L m ⁻²
	3,83 L/colino	2,25 L/colino	10,09 L/colino	5,39 L/colino

Determinación de la HH gris

En las Tabla 37 a la 40 se presentan los resultados de la caracterización realizada a los drenados resultantes de la etapa de almácigo.

La HH gris se estima teniendo en cuenta la concentración de cada uno de los parámetros evaluados que supere los valores de calidad condensados en la Tabla 5. La HH gris es aquella equivalente a la del parámetro, de los seleccionados por superar los valores de calidad establecidos, que genere el mayor valor, aplicando la **Ecuación <19>**:

$$HH\text{Gris almácigo (L/bloque)} = \frac{(V_{\text{drenados}} * C_{\text{parámetro}}) - (V_a * C_a)}{C_{\text{maxparámetro}}} \quad \langle 19 \rangle$$

Dónde

V_{drenados}: volumen de los drenados recogidos (L)

C_{parámetro} = concentración del parámetro evaluado en los drenados (que supera los valores de calidad establecidos) (g L⁻¹).

V_a = volumen de agua que ingresa al almácigo (L).

C_a = concentración del parámetro de interés en el agua que ingresa al almácigo (g L⁻¹).

C_{maxparámetro} = concentración máxima del parámetro evaluado de acuerdo con los valores de calidad establecidos (g L⁻¹).

De los parámetros caracterizadores, sólo la DQO y los SST estuvieron por encima de la concentración máxima en cuerpos de agua superficial con calidad aceptable, por tal motivo la HH gris se calculó con base en estos dos parámetros, seleccionando el mayor valor obtenido.

Tabla 37. Caracterización de los drenados de la etapa de almácigo.

Estación Experimental Naranjal						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Bloque 1						
Promedio	6,19	255	181	131	1,51	21,78
Máximo	6,31	988	488	157	2,84	52,40
Mínimo	6,11	64	64	116	0,54	2,10
Datos	6	6	6	6	6	6
DE	0,08	361,91	164,77	15,17	0,97	20,30
CV	1,25	141,93	91,03	11,55	64,16	93,19
IC	0,06	289,58	131,84	12,14	0,78	16,24
Bloque 2						
Promedio	6,23	139	214	126	2,44	30
Máximo	6,34	261	352	159	4,96	53
Mínimo	6,06	74	42	107	1,14	7
Datos	6	6	6	6	6	6
DE	0,12	66,10	126,02	18,37	1,50	17,66
CV	1,97	47,55	58,98	14,54	61,53	58,78
IC	0,10	52,89	100,84	14,70	1,20	14,13
Bloque 3						
Promedio	5,88	174	328	117	2,05	24
Máximo	6,51	314	742	134	4,79	50
Mínimo	5,45	47	28	101	0,41	5
Datos	6	6	6	6	6	6
DE	0,35	114,03	273,75	13,56	1,70	19,93
CV	6,01	65,47	83,55	11,59	83,05	84,09
IC	0,28	91,24	219,04	10,85	1,36	15,95

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental Naranjal						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Promedio						
Promedio	6,10	189	241	125	2,00	25,18
Máximo	6,51	988	742	159	4,96	52,70
Mínimo	5,45	47	28	101	0,41	2,10
Datos	18	18	18	18	18	18
DE	0,26	214,78	197,19	16,08	1,39	18,52
CV	4,30	113,41	81,90	12,87	69,78	73,56
IC	0,12	99,22	91,10	7,43	0,64	8,56

Tabla 38. Caracterización de los drenados de la etapa de almácigo.

Estación Experimental El Tambo						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Bloque 1						
Promedio	6,07	33	40	74	1,30	6,05
Máximo	7,55	59	56	133	2,63	25,40
Mínimo	5,14	21	20	23	0,39	0,30
Datos	6	6	6	6	6	6
DE	0,85	15,84	12,80	41,34	0,89	9,63
CV	13,96	48,25	31,74	55,61	68,31	159,12
IC	0,68	12,67	10,24	33,08	0,71	7,71
Bloque 2						
Promedio	6,20	40	53	74	1,10	10,38
Máximo	6,94	79	82	141	1,48	51,30

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental El Tambo						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻³)
Mínimo	5,76	21	24	14	0,55	0,40
Datos	6	6	6	6	6	6
DE	0,43	21,13	23,35	41,38	0,38	20,10
CV	6,88	52,61	44,06	55,80	34,60	193,60
IC	0,34	16,91	18,68	33,11	0,30	16,08
Bloque 3						
Promedio	5,98	32	65	116	1,24	5,07
Máximo	6,28	42	126	254	2,36	10,90
Mínimo	5,58	22	26	57	0,45	1,60
Datos	6	6	6	6	6	6
DE	0,26	8,52	33,86	70,89	0,67	3,49
CV	4,33	26,76	51,83	61,11	53,77	68,98
IC	0,21	6,82	27,09	56,72	0,54	2,79
Promedio						
Promedio	6,08	35	53	88	1,21	7,17
Máximo	7,55	79	126	254	2,63	51,30
Mínimo	5,14	21	20	14	0,39	0,30
Datos	18	18	18	18	18	18
DE	0,54	15,53	25,61	53,80	0,64	12,46
CV	8,90	44,44	48,43	61,02	53,04	173,92
IC	0,25	7,17	11,83	24,85	0,30	5,76

Tabla 39. Caracterización de los drenados de la etapa de almácigo.

Estación Experimental El Rosario						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Bloque 1						
Promedio	6,69	128	166	119	4,36	15,17
Máximo	7,04	200	288	135	9,64	35,10
Mínimo	6,21	86	112	108	1,16	4,70
Datos	6	6	6	6	6	6
DE	0,35	42,85	64,94	9,93	3,54	11,01
CV	5,20	33,48	39,04	8,37	81,29	72,59
IC	0,28	34,29	51,96	7,95	2,83	8,81
Bloque 2						
Promedio	6,30	100	75	117	3,13	21,40
Máximo	6,50	170	150	132	5,64	51,50
Mínimo	6,21	55	36	105	0,92	3,20
Datos	6	6	6	6	6	6
DE	0,11	47,16	40,90	10,19	2,11	20,08
CV	1,76	47,40	54,78	8,69	67,30	93,85
IC	0,09	37,74	32,73	8,15	1,69	16,07
Bloque 3						
Promedio	6,55	98	169	120	4	15,87
Máximo	7,08	119	300	131	10	43,40
Mínimo	6,34	79	88	111	1	1,70
Datos	6	6	6	6	6	6
DE	0,27	17,50	76,85	7,97	3,70	16,95
CV	4,16	17,86	45,39	6,62	90,53	106,84
IC	0,22	14,00	61,49	6,38	2,96	13,56

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental El Rosario						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Promedio						
Promedio	6,51	109	137	119	3,86	17,48
Máximo	7,08	200	300	135	10,38	51,50
Mínimo	6,21	55	36	105	0,79	1,70
Datos	18	18	18	18	18	18
DE	0,30	38,55	74,25	8,93	3,05	15,72
CV	4,58	35,53	54,29	7,52	79,11	89,93
IC	0,14	17,81	34,30	4,13	1,41	7,26

Tabla 40. Caracterización de los drenados de la etapa de almácigo.

Promedio de las 3 Estaciones Experimentales						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Promedio	6,23	111	143	111	2,36	16,61
Máximo	7,55	988	742	254	10,38	52,70
Mínimo	5,14	21	20	14	0,39	0,30
Datos	54	54	54	54	54	54
DE	0,43	139,30	143,07	36,05	2,24	17,16
CV	6,89	125,56	99,71	32,59	94,88	103,34
IC	0,11	37,15	38,16	9,62	0,60	4,58

En la Tablas 41, 42 y 43 se presentan los resultados de la caracterización realizada al agua de lluvia y al agua de riego que ingresó al almácigo.

Tabla 41. Caracterización del agua de ingreso a los almácigos.

Estación Experimental Naranjal.						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Caracterización del agua de lluvia						
Promedio	5,98	2,42	16	13	0,10	0,35
Máximo	6,41	3,50	24	22	0,13	0,50
Mínimo	5,42	1,63	10	6	0,07	0,20
Datos	6	6	6	6	6	6
DE	0,37	0,67	5,28	6,00	0,02	0,10
CV	6,19	27,51	33,70	46,15	20,91	29,97
IC	0,30	0,53	4,22	4,80	0,02	0,08
Caracterización del agua de riego						
Promedio	7,38	4,65	17	22	0,56	1,18
Máximo	8,02	5,28	27	39	0,70	2,10
Mínimo	6,55	3,06	9	7	0,28	0,40
Datos	6	6	6	6	6	6
DE	0,65	0,80	6,62	10,98	0,16	0,60
CV	8,81	17,24	39,74	49,54	28,33	50,82
IC	0,52	0,64	5,30	8,79	0,13	0,48

Tabla 42. Caracterización del agua de ingreso a los almácigos.

Estación Experimental El Tambo.						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Caracterización del agua de lluvia						
Promedio	6,76	3,29	19	14	0,40	1,02
Máximo	7,64	5,25	28	21	0,76	1,80
Mínimo	5,68	1,44	3	6	0,18	0,40
Datos	6	6	6	6	6	6

Continúa...

...continuación.

DE	0,80	1,60	8,98	6,29	0,22	0,55
CV	11,84	48,73	48,11	44,95	54,57	54,02
IC	0,64	1,28	7,19	5,04	0,17	0,44
Caracterización del agua de riego						
Promedio	7,41	4,07	21	26	0,52	1,97
Máximo	7,98	5,33	28	37	0,86	3,50
Mínimo	6,76	2,69	13	17	0,15	0,40
Datos	6	6	6	6	6	6
DE	0,44	1,16	5,76	8,34	0,28	1,25
CV	5,90	28,58	27,44	32,09	53,85	63,81
IC	0,35	0,93	4,61	6,68	0,22	1,00

Tabla 43. Caracterización del agua de ingreso a los almácigos.

Estación Experimental El Rosario						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
Caracterización del agua de lluvia						
Promedio	6,37	3,04	10	12	0,52	2,28
Máximo	7,37	4,74	22	15	0,77	3,40
Mínimo	5,17	1,14	3	9	0,22	1,10
Datos	6	6	6	6	6	6
DE	0,87	1,55	7,76	2,32	0,19	0,98
CV	13,68	51,08	75,13	19,04	37,39	42,77
IC	0,70	1,24	6,21	1,85	0,15	0,78
Caracterización del agua de riego						
Promedio	7,01	2,60	19	25	0,60	1,72
Máximo	7,86	4,26	25	44	0,84	3,30
Mínimo	6,21	1,74	10	9	0,26	0,40
Datos	6	6	6	6	6	6

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental El Rosario						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)
DE	0,68	0,95	6,79	12,25	0,26	1,31
CV	9,67	36,68	36,08	48,69	43,53	76,52
IC	0,54	0,76	5,44	9,81	0,21	1,05

Dado que de los dos parámetros que excedieron los valores de calidad (DQO y SST), la mayor HHg se encontró con la DQO, en los drenados caracterizados (Tabla 44), se tuvo en cuenta la concentración de este parámetro en el agua de ingreso, para aplicar la fórmula de cálculo de la HH gris, restando a la carga másica de los drenados, la carga másica de los ingresos. En la Tabla 45 se presentan los valores.

Tabla 44. Valores de la HH para los parámetros que excedieron los valores máximos permisibles establecidos.

HH gris (L/bloque)	Estación Experimental		
	Naranjal	El Tambo	El Rosario
DQO	7.123,70	3.400,26	8.854,41
SST	3.433,63	0	2.548,43

Tabla 45. Volumen y DQO de las entradas de agua en la etapa de almácigo.

Variable	Estación Experimental		
	Naranjal	El Tambo	El Rosario
Precipitación (L)	6.625,29	3.665,69	4.800,04
DQO en agua lluvia (mg L ⁻¹)	13	14	12
Carga másica DQO lluvia (g/bloque)	86,13	51,32	57,60
Riego (L)	1.825,17	1.201,17	4.600,00
DQO en el agua de riego (mg L ⁻¹)	22	26	25
Carga másica DQO riego (g/bloque)	40,15	31,23	115,00
Carga másica de ingreso (g/bloque)	126,28	82,55	172,60

A continuación, se presentan los cálculos realizados para encontrar la Huella Hídrica gris en la etapa de almácigo en las tres estaciones experimentales, con el parámetro de la DQO.

$$\text{HHg Naranjal } \left(\frac{\text{L}}{\text{Bl}} \right) = \frac{(1.424,74(\text{L/bl}) * 0,125 (\text{g L}^{-1})) - 126,28(\text{g/bl})}{0,025 (\text{g L}^{-1})} = \mathbf{2.072,50 \text{ L/Bloque}}$$

$$\text{HHg El Tambo } \left(\frac{\text{L}}{\text{Bl}} \right) = \frac{(965,98(\text{L/bl}) * 0,088 (\text{g L}^{-1})) - 82,55(\text{g/bl})}{0,025 (\text{g L}^{-1})} = \mathbf{98,26 \text{ L/Bloque}}$$

$$\text{HHg El Rosario } \left(\frac{\text{L}}{\text{Bl}} \right) = \frac{(1.860,17(\text{L/bl}) * 0,119 (\text{g L}^{-1})) - 172,60(\text{g/bl})}{0,025 (\text{g L}^{-1})} = \mathbf{1.950,41 \text{ L/Bloque}}$$

En la Tabla 46 se presentan los valores de la HH gris para la etapa de almácigo en las tres Estaciones Experimentales.

Tabla 46. Valores de la HH gris en la etapa de almácigo.

HH gris	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
HH gris (L/bloque)	2.072,50	98,26	1.950,41	1.373,73
HH gris (L m ²)	422,96	20,05	398,04	280,35
HH gris (L/colino)	5,14	0,25	5,05	3,48

En las Figuras 33, 34 y 35 se presentan los resultados de las HH para las diferentes Estaciones Experimentales para la etapa de almácigo.

De los resultados presentados en las Figuras 33, 34 y 35 se puede apreciar que la HH total en la etapa de almácigo varió entre 866,96 L m⁻² en la Estación Experimental El Tambo y 2.070,60 L m⁻² en la Estación Experimental El Rosario. La HH azul alcanzó valores de 193,19 L m⁻² en la Estación Experimental El Tambo, 327,87 L m⁻² en la Estación Experimental Naranjal y 864,93 L m⁻² en la Estación Experimental El Rosario. La HH verde alcanzó valores de 653,72 L m⁻² en la Estación Experimental El Tambo, 807,62 L m⁻² en la Estación Experimental El Rosario y 1.165,69 L m⁻² en la Estación Experimental Naranjal. La HH gris alcanzó valores de 20,05 L m⁻² en la Estación Experimental Naranjal, 398,04 L m⁻² en la Estación Experimental El Rosario y 422,96 L m⁻² en la Estación Experimental Naranjal.



Figura 33. Huella Hídrica Almacigo. Estación Experimental Naranjal.



Figura 34. Huella Hídrica Almacigo. Estación Experimental El Tambo.

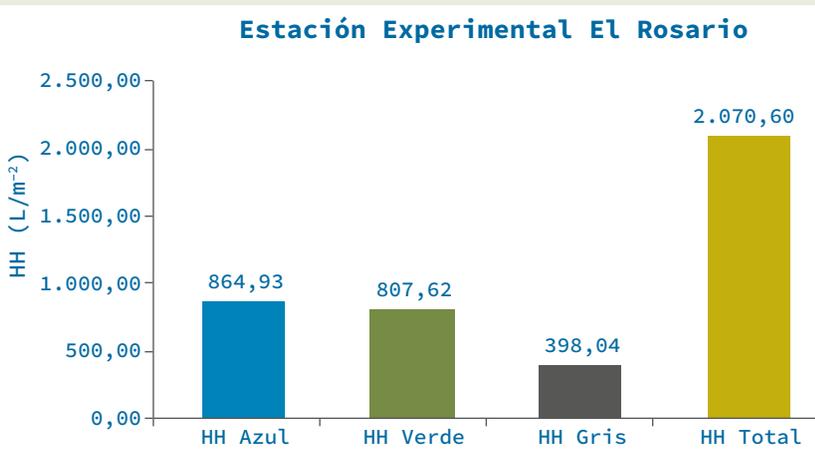


Figura 35. Huella Hídrica Almacigo. Estación Experimental El Rosario.

Resultados Huella Hídrica en la etapa de almácigo

En la Tabla 47 y en la Figura 36 se presentan los resultados promedio de la huella hídrica para la etapa de almácigo.

Tabla 47. Valores promedio de la HH en la etapa de almácigo.

Unidades	HH Azul	HH verde	HH gris	HH total
L m ⁻²	462,00	875,68	280,35	1.618,03

La HH total promedio de la etapa de almácigo, evaluada en las tres estaciones experimentales de Cenicafé, fue de 1.618,03 L m⁻², representando la HH verde un porcentaje del 54,12% (875,68 L m⁻²), la HH azul el 28,55% (462,00 L m⁻²) y la HH gris el 17,33% (280,35 L m⁻²). En la Tabla 48 y en la Figura 37 se presentan los resultados promedio de la huella hídrica para cada colino obtenido en los almácigos de las tres estaciones experimentales.

Tabla 48. Valores promedio de la HH de los colinos de café.

Tipo de huella	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Azul (L/colino)	3,83	2,25	10,09	5,39
Verde (L/colino)	13,60	7,63	9,42	10,22
Gris (L/colino)	5,14	0,25	5,05	3,48
Total (L/colino)	22,57	10,13	24,56	19,09

Valor promedio HH etapa almácigo

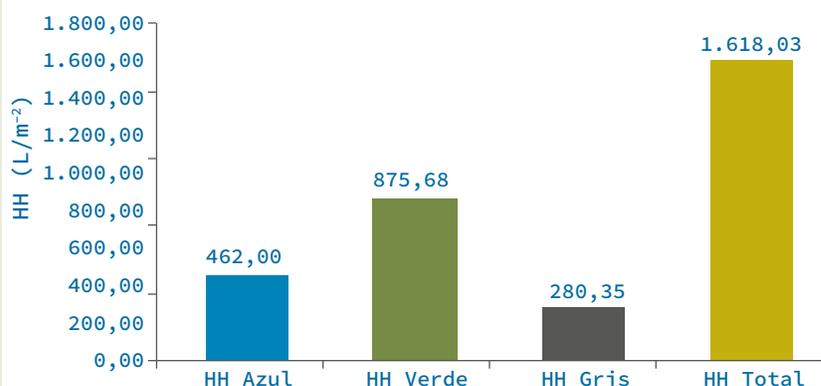


Figura 36. Valores promedio de la Huella Hídrica en la Etapa de almácigo.

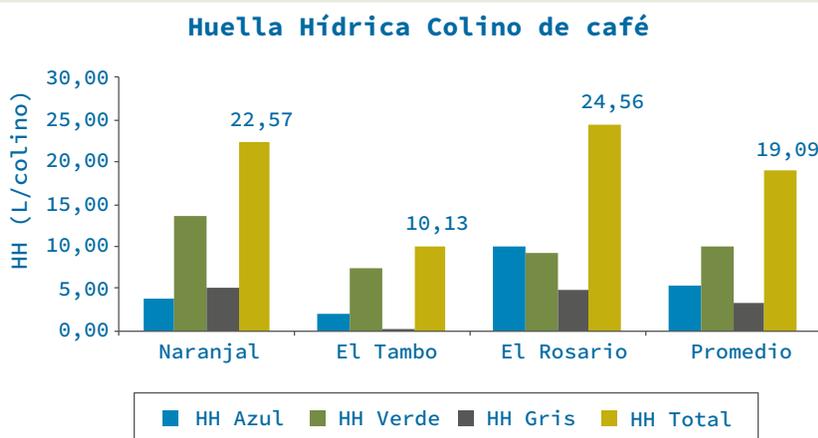


Figura 37. Valores promedio de la Huella Hídrica de un colino de café.

La menor huella hídrica por colino de café producido fue para la Estación Experimental El Tambo, con un valor de 10,13 L/colino (la HH verde representó el 75,29% del total de la HH, la HH azul representó el 22,25% y la HH gris representó el 2,46%). Para la Estación Experimental Naranjal, la HH fue de 22,57 L/colino (La HH verde representó el 60,27% del total de la HH, la HH azul representó el 16,95% y la HH gris representó el 22,78%). Para la Estación Experimental El Rosario, la HH fue de 24,56 L/colino (La HH verde representó el 38,36% de la HH total, la HH azul representó el 41,09% y la HH gris representó el 20,55%).

La huella hídrica promedio para la producción de un colino de café fue de 19,09 L/colino (HH verde del 53,53%, HH azul del 28,24% y HH gris del 18,23%).

Etapa de levante

La etapa de levante tuvo una duración de 733 días en la Estación Experimental Naranjal, de 744 días en la Estación Experimental El Tambo y de 732 días en la Estación Experimental El Rosario, para un promedio de 736 días (24,5 meses) y comprendió el período de tiempo entre la siembra en el campo y la producción de los primeros frutos.

Determinación de la Huella Hídrica Azul

Dado que en esta etapa no se realizó riego, la huella hídrica azul fue de cero.

Determinación de la Huella Hídrica Verde

Para el cálculo del volumen de agua evapotranspirado, y puesto que no se dispuso de lisímetros con capacidad de medir el efluente lixiviado, se utilizó la información generada por las sondas de humedad.

En la Tabla 49 se presentan los coeficientes de las Ecuaciones <20> y <21> para ajustar los datos generados por las sondas.

Tabla 49. Coeficientes de la ecuación de calibración para los valores de humedad generados por las sondas ubicadas a 15 y 45 cm de profundidad en las parcelas en etapa de levante, en las tres estaciones experimentales.

Estación Experimental	Profundidad (Ecuación que aplica)	Da (g cm ³)	Coeficientes de la ecuación de calibración			R ²
			A	B	C	
Naranjal	15 cm (20)	0,83	0,1091	3*10 ⁻⁴	-	0,966
	45 cm (21)	0,95	0,0100	4*10 ⁻⁴	-1*10 ⁻⁷	0,968
El Tambo	15 cm (20)	0,76	0,0673	2*10 ⁻⁴	-	0,984
	45 cm (20)	0,80	0,0941	2*10 ⁻⁴	-	0,972
El Rosario	15 cm (21)	0,78	-0,0252	7*10 ⁻⁴	-3*10 ⁻⁷	0,967
	45 cm (20)	1,55	0,1200	3*10 ⁻⁴	-	0,985

$$\text{Humedad} = A + B \text{ (datos sin procesar del sensor)} \quad \langle 20 \rangle$$

$$\text{Humedad} = A + B \text{ (datos sin procesar)} + C \text{ (datos sin procesar)}^2 \quad \langle 21 \rangle$$

La información generada por los sensores se registró cada 15 minutos y correspondió a valores procesados de humedad volumétrica del suelo (m³m⁻³), temperatura del suelo (°C) y conductividad eléctrica del suelo (mS cm⁻¹) utilizando una ecuación de ajuste genérica del sensor. De igual manera se registraron, en el mismo tiempo, valores sin procesar, de humedad volumétrica del suelo (m³ m⁻³), para ser ajustados a través de las ecuaciones específicas, obtenidas para el suelo en el cual se instalaron los sensores y cuyos coeficientes numéricos aparecen condensados en la Tabla 49.

Con el fin de facilitar el manejo de la información, se tomó para las variables anteriormente descritas el valor promedio diario, que correspondió al promedio de 96 datos.

El valor de la evapotranspiración real (ET) se determinó a través de eventos concretos, de la siguiente manera: Para aquellos días en los cuales no se presentó lluvia y la humedad volumétrica registrada por ambas sondas (15 y 45 cm) y ya ajustada con las respectivas ecuaciones referenciadas en la Tabla 49, estaba por debajo de la capacidad de campo del suelo en el cual estaban instaladas (Tabla 50), se calculó la pérdida de humedad a través de la diferencia entre los valores registrados y ajustados de las sondas en dos días consecutivos.

Se tomaron como valores para el cálculo de la ET, aquellos que arrojaron diferencias positivas (indicador de pérdida de humedad por evapotranspiración, dado que la humedad del suelo

estaba por debajo del valor de la capacidad de campo), para los mismos días y para ambas sondas (ubicadas a 15 y a 45 cm), y que el día anterior también hubieran dado diferencias positivas, pues una diferencia negativa podría deberse a un incremento de humedad por movimiento gravitacional del agua, sin permitir obtener un dato real de ET del día siguiente, pues al mismo tiempo estaría llegando y saliendo agua del área medida.

Cuando se presentaron lluvias, independiente de la cantidad de lluvia registrada, se consideraron sólo los valores registrados por las sondas al segundo día después de la lluvia y posteriores, siempre y cuando al día siguiente y posteriores del evento de lluvia registrado no se volviera a registrar precipitación en las áreas experimentales. No se consideraron los valores registrados al día siguiente del evento de lluvia, dado que los procesos de infiltración que ocurren en el perfil del suelo pueden influir en los valores de humedad registrados por la sonda y se podrían no estar considerando pérdidas de humedad que ocurrieron por evapotranspiración, en los primeros 60 cm del suelo, dado que el movimiento gravitacional del agua en el perfil del suelo estaría compensando estas pérdidas.

Finalmente, para obtener el valor de ET, se multiplicó el valor obtenido por la diferencia de humedad en los 2dos días consecutivos por el volumen de suelo, tanto para la sonda ubicada a 15 cm como para la ubicada a 45 cm, y se realizó la suma para conocer la cantidad de agua evapotranspirada en el perfil del suelo.

En la Tabla 51 se presentan los resultados de la caracterización química de los suelos de las parcelas experimentales, los cuales tienen una influencia directa sobre la producción de café y por lo tanto influyen de manera indirecta en el valor de la huella hídrica obtenido. Los valores obtenidos de ET, en los eventos concretos, lo mismo que los correspondientes a los otros valores medidos, en las parcelas de levante en las tres estaciones experimentales se presentan en las Tablas 52 a la 63.

Tabla 50. Valores del análisis físico del suelo en el que estaban instaladas las sondas de humedad. Parcelas en etapa de levante.

Estación Experimental	Sonda	Da (g cm ⁻³)	Ccampo (%vol) 0,33 Bares	Pto marchitez (%vol) 15,00 Bares	Almacenamiento (%vol)
Naranjal	15 cm	0,90	48,50	46,20	2,3
	45 cm	0,90	44,80	40,40	4,4
El Tambo	15 cm	0,60	42,10	39,90	2,1
	45 cm	0,80	52,50	50,40	2,2
El Rosario	15 cm	1,40	44,60	42,10	2,5
	45 cm	1,60	60,50	57,30	3,2

Tabla 51. Valores del análisis químico del suelo en el que estaban instaladas las sondas de humedad. Parcelas en etapa de levante.

Parámetro	Estación Experimental		
	Naranjal	El Tambo	El Rosario
pH	5,10	4,70	4,70
N (%)	0,27	0,66	0,24
MO (%)	6,10	19,40	5,30
K (cmol kg^{-1})	0,14	0,40	0,22
Ca (cmol kg^{-1})	0,89	1,16	5,10
Mg (cmol kg^{-1})	0,23	0,33	1,62
Na (cmol kg^{-1})	0,08	0,04	0,10
Al (cmol kg^{-1})	0,70	2,40	3,60
($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)	11,50	4,10	24,00
P (mg kg^{-1})	10,00	5,00	5,00
Fe (mg kg^{-1})	81,00	178,00	271,00
Mn (mg kg^{-1})	2,50	57,00	76,00
Zn (mg kg^{-1})	2,55	4,50	3,80
Cu (mg kg^{-1})	4,20	4,00	5,20
B (mg kg^{-1})	0,44	0,11	0,41
S (mg kg^{-1})	24,25	19,50	0,50
Arcilla (%)	23	17	27
Limo (%)	21	40	22
Textura	FArA	F	FArA

Para determinar el coeficiente de cultivo de la etapa de levante (K_c), se utilizó la **Ecuación <13>**. La determinación del valor de la evapotranspiración de referencia (E_{To}), involucró los datos diarios de velocidad del viento, radiación neta, humedad relativa del aire, temperaturas mínimas y máximas, obtenidas de cada estación climática automática instalada en cada una de las Estaciones Experimentales. Para el cálculo de la E_{To} se utilizó el software CROPWAT de la FAO (por medio del método Penman – Monteith) (Allen et al., 2006) (Anexo 4). Los valores de E_{To} se calcularon para los eventos concretos en los cuales se determinó la ET y sus valores, al igual que los datos climáticos que se utilizaron para su cálculo que se presentan en las Tablas

52 a 63. En la Tabla 64 se presenta el resumen del coeficiente de cultivo del café de Colombia en la fase de Levante.

Tabla 52. Parámetros del suelo, parámetros climáticos y evapotranspiración.

Estación Experimental Naranjal. Parcela 1. Etapa de levante							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,383	0,400	0,353	64	0,01	2,76	0,00
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,459	0,483	0,418	64	0,02	4,22	0,00
Temperatura a 15 cm (°C)	22,95	25,24	20,49	64	0,90	3,91	0,22
Conductividad a 15 cm ($mS cm^{-1}$)	0,021	0,248	0,010	64	0,03	160,43	0,01
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,375	0,401	0,356	64	0,01	2,83	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,334	0,354	0,319	64	0,01	2,54	0,00
Temperatura a 45 cm (°C)	22,97	23,99	21,28	64	0,37	1,60	0,09
Conductividad a 45 cm ($mS cm^{-1}$)	0,021	0,130	0,010	64	0,04	178,63	0,01
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento ($m s^{-1}$)	1,17	1,60	0,60	64	0,11	9,35	0,03
Brillo solar (horas)	5,81	9,90	0,10	64	2,74	47,22	0,67
Radiación ($MJ m^2 - d^{-1}$)	17,72	24,60	8,90	64	4,50	25,40	1,10
Temperatura mínima (°C)	16,60	18,70	13,00	64	1,10	6,62	0,27
Temperatura máxima (°C)	29,84	32,70	25,30	64	2,01	6,73	0,49
Humedad relativa (%)	73,59	88,00	59,00	64	0,87	1,18	0,21
ETo, ET y Kc							
ETo ($mm d^{-1}$)	3,85	5,10	2,04	64	0,79	20,58	0,19
ET ($mm d^{-1}$)	2,08	5,32	0,33	64	0,51	24,30	0,12
Kc	0,56	2,42	0,11	64	0,32	57,20	0,08

Tabla 53. Parámetros del suelo, parámetros climáticos y evapotranspiración.

Estación Experimental Naranjal. Parcela 2. Etapa de levante							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,391	0,397	0,386	6	0,00	0,94	0,00
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,471	0,479	0,463	6	0,01	1,16	0,01
Temperatura a 15 cm ($^{\circ}C$)	23,30	24,63	22,83	6	0,62	2,65	0,50
Conductividad a 15 cm ($mS cm^{-1}$)	0,005	0,014	0,000	6	0,01	104,49	0,01
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,431	0,438	0,426	6	0,00	0,97	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,376	0,381	0,373	6	0,00	0,76	0,00
Temperatura a 45 cm ($^{\circ}C$)	23,36	23,70	23,20	6	0,17	0,73	0,14
Conductividad a 45 cm ($mS cm^{-1}$)	0,030	0,030	0,030	6	0,00	0,00	0,00
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento ($m s^{-1}$)	1,23	1,50	1,00	6	0,16	12,96	0,13
Brillo solar (horas)	5,35	8,60	2,20	6	2,31	43,12	1,85
Radiación ($MJ m^{-2} d^{-1}$)	17,30	21,80	12,60	6	3,37	19,46	2,70
Temperatura mínima ($^{\circ}C$)	16,33	17,30	15,50	6	0,53	3,23	0,42
Temperatura máxima ($^{\circ}C$)	29,95	32,70	27,90	6	1,48	4,94	1,18
Humedad relativa (%)	73,50	81,00	69,00	6	4,43	6,02	3,54
ET_o, ET y K_c							
ET _o ($mm d^{-1}$)	3,85	4,78	3,07	6	0,65	16,83	0,52
ET ($mm d^{-1}$)	2,26	3,51	1,20	6	0,90	39,93	0,72
K _c	0,57	0,80	0,34	6	0,15	26,39	0,12

Tabla 54. Parámetros del suelo, parámetros climáticos y evapotranspiración.

Estación Experimental Naranjal. Parcela 3. Etapa de levante							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$ sin corregir)	0,397	0,400	0,394	4	0,00	0,59	0,00
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$ corregida)	0,480	0,483	0,474	4	0,00	0,74	0,00
Temperatura a 15 cm ($^{\circ}C$)	23,30	24,65	22,04	4	0,92	3,97	0,90
Conductividad a 15 cm ($mS cm^{-1}$)	0,028	0,040	0,008	4	0,01	42,76	0,01
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$ sin corregir)	0,376	0,379	0,374	4	0,00	0,48	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$ corregida)	0,334	0,337	0,333	4	0,00	0,43	0,00
Temperatura a 45 cm ($^{\circ}C$)	23,01	23,57	21,87	4	0,67	2,90	0,66
Conductividad a 45 cm ($mS cm^{-1}$)	0,015	0,020	0,010	4	0,00	33,10	0,00
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento ($m s^{-1}$)	1,30	1,50	1,10	4	0,14	10,88	0,14
Brillo solar (horas)	7,50	8,60	6,70	4	0,71	9,48	0,70
Radiación ($MJ m^{-2} d^{-1}$)	20,33	21,80	19,40	4	0,89	4,39	0,87
Temperatura mínima ($^{\circ}C$)	16,23	17,30	15,50	4	0,67	4,12	0,66
Temperatura máxima ($^{\circ}C$)	31,18	32,70	30,10	4	1,00	3,20	0,98
Humedad relativa (%)	70,50	72,00	69,00	4	1,12	1,59	1,10
ETo, ET y Kc							
ETo ($mm d^{-1}$)	4,42	4,78	4,22	4	0,22	4,87	0,22
ET ($mm d^{-1}$)	2,26	3,01	1,74	4	0,47	20,59	0,46
Kc	0,51	0,70	0,41	4	0,11	22,03	0,11

Tabla 55. Parámetros del suelo, parámetros climáticos y evapotranspiración.

Estación Experimental Naranjal. Promedio Parcela 1, 2, 3. Etapa de levante							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,385	0,400	0,353	74	0,01	2,76	0,00
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,461	0,483	0,418	74	0,01	3,24	0,00
Temperatura a 15 cm ($^{\circ}C$)	23,00	25,24	20,49	74	1,00	4,33	0,23
Conductividad a 15 cm ($mS cm^{-1}$)	0,020	0,248	0,000	74	0,03	152,01	0,01
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,380	0,438	0,356	74	0,02	4,83	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) Corregida	0,337	0,381	0,319	74	0,01	4,18	0,00
Temperatura a 45 cm ($^{\circ}C$)	23,00	23,99	21,28	74	0,75	3,26	0,17
Conductividad a 45 cm ($mS cm^{-1}$)	0,022	0,130	0,010	74	0,02	99,65	0,00
Parámetros Climáticos							
Velocidad del viento ($m s^{-1}$)	1,18	1,60	0,60	74	0,19	15,92	0,04
Brillo solar (horas)	5,87	9,90	0,10	74	2,74	46,70	0,62
Radiación ($MJ m^{-2} d^{-1}$)	17,82	24,60	8,90	74	4,14	23,23	0,94
Temperatura mínima ($^{\circ}C$)	16,56	18,70	13,00	74	1,24	7,50	0,28
Temperatura máxima ($^{\circ}C$)	29,92	32,70	25,30	74	1,52	5,08	0,35
Humedad relativa (%)	73,42	88,00	59,00	74	5,90	8,04	1,34
ETo, ET y Kc							
ETo ($mm d^{-1}$)	3,88	5,10	2,04	74	0,77	19,87	0,18
ET ($mm d^{-1}$)	2,10	5,32	0,33	74	0,93	44,31	0,21
Kc	0,56	2,42	0,11	74	0,30	54,15	0,07

Tabla 56. Parámetros del suelo, parámetros climáticos y evapotranspiración.

Estación Experimental El Tambo. Parcela 1. Etapa de levante							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) sin corregir	0,419	0,477	0,321	93	0,04	8,47	0,01
Humedad a 15 cm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) corregida	0,340	0,413	0,249	93	0,04	11,18	0,01
Temperatura a 15 cm ($^{\circ}\text{C}$)	20,69	22,40	19,27	93	0,74	3,58	0,15
Conductividad a 15 cm (mS cm^{-1})	0,034	0,150	0,010	93	0,02	59,64	0,00
Humedad a 45 cm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) sin corregir	0,381	0,422	0,356	93	0,02	4,12	0,00
Humedad a 45 cm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) corregida	0,326	0,368	0,303	93	0,02	4,62	0,00
Temperatura a 45 cm ($^{\circ}\text{C}$)	20,70	22,04	19,99	93	0,51	2,49	0,10
Conductividad a 45 cm (mS cm^{-1})	0,031	0,110	0,010	93	0,03	94,98	0,01
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento (m s^{-1})	0,95	5,60	0,30	93	0,91	95,85	0,18
Brillo solar (horas)	5,70	10,00	0,30	93	2,37	41,64	0,48
Radiación ($\text{MJ m}^{-2}\text{-d}^{-1}$)	17,42	24,30	9,60	93	3,64	20,90	0,74
Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$)	13,51	18,30	7,70	93	1,99	14,74	0,40
Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)	27,14	31,30	22,50	93	1,69	6,23	0,34
Humedad relativa (%)	76,85	97,00	46,00	93	10,52	13,69	2,14
ETo, ET y Kc							
ETo (mm d^{-1})	3,53	5,93	2,11	93	0,76	21,45	0,15
ET (mm d^{-1})	3,19	12,72	0,93	93	2,12	66,44	0,43
Kc	0,95	5,09	0,27	93	0,76	79,46	0,15

Tabla 57. Parámetros del suelo, parámetros climáticos y evapotranspiración.

Estación Experimental El Tambo. Parcela 2. Etapa de levante							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,337	0,406	0,299	91	0,02	6,50	0,00
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,261	0,323	0,232	91	0,02	6,90	0,00
Temperatura a 15 cm ($^{\circ}C$)	21,20	26,22	19,45	91	1,14	5,38	0,23
Conductividad a 15 cm ($mS cm^{-1}$)	0,039	0,154	0,019	91	0,02	57,79	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,359	0,457	0,336	91	0,02	6,11	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,307	0,410	0,286	91	0,02	7,06	0,00
Temperatura a 45 cm ($^{\circ}C$)	21,38	26,30	19,34	91	0,79	3,70	0,16
Conductividad a 45 cm ($mS cm^{-1}$)	0,044	0,130	0,020	91	0,03	72,44	0,01
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento ($m s^{-1}$)	0,90	5,40	0,30	91	0,80	88,54	0,16
Brillo solar (horas)	5,64	10,00	0,20	91	2,67	47,28	0,55
Radiación ($MJ m^{-2} d^{-1}$)	17,30	24,30	9,50	91	4,07	23,55	0,84
Temperatura mínima ($^{\circ}C$)	13,81	20,10	7,70	91	2,26	16,37	0,46
Temperatura máxima ($^{\circ}C$)	27,09	31,30	21,60	91	1,81	6,68	0,37
Humedad relativa (%)	78,24	97,00	46,00	91	10,65	13,61	2,19
ET_o, ET y K_c							
ET _o ($mm d^{-1}$)	3,48	5,93	2,03	91	0,80	23,07	0,16
ET ($mm d^{-1}$)	1,66	10,74	0,25	91	1,95	117,53	0,40
K _c	0,58	4,53	0,06	91	0,81	138,52	0,17

Tabla 58. Parámetros del suelo, parámetros climáticos y evapotranspiración.

Estación Experimental El Tambo. Parcela 3. Etapa de levante							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm (m ³ m ⁻³) sin corregir	0,300	0,405	0,240	77	0,03	8,43	0,01
Humedad a 15 cm (m ³ m ⁻³) corregida	0,234	0,322	0,195	77	0,02	7,72	0,00
Temperatura a 15 cm (°C)	21,06	22,55	20,02	77	0,68	3,21	0,15
Conductividad a 15 cm (mS cm ⁻¹)	0,030	0,128	0,010	77	0,02	72,60	0,00
Humedad a 45 cm (m ³ m ⁻³) sin corregir	0,383	0,420	0,353	77	0,02	4,13	0,00
Humedad a 45 cm (m ³ m ⁻³) corregida	0,328	0,365	0,301	77	0,02	4,65	0,00
Temperatura a 45 cm (°C)	21,02	21,90	20,35	77	0,35	1,68	0,08
Conductividad a 45 cm (mS cm ⁻¹)	0,029	0,110	0,010	77	0,04	123,36	0,01
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento (m s ⁻¹)	0,97	5,40	0,30	77	0,82	85,06	0,18
Brillo solar (horas)	5,83	10,00	0,30	77	2,73	46,90	0,61
Radiación (MJ m ⁻² -d ⁻¹)	17,61	24,30	9,60	77	4,22	23,94	0,94
Temperatura mínima (°C)	13,71	19,60	7,70	77	2,42	17,64	0,54
Temperatura máxima (°C)	27,19	31,30	22,60	77	1,64	6,03	0,37
Humedad relativa (%)	76,23	97,00	46,00	77	10,06	13,20	2,25
ET_o, ET y K_c							
ET _o (mm d ⁻¹)	3,57	5,93	2,11	77	0,85	23,67	0,19
ET (mm d ⁻¹)	1,39	6,69	0,09	77	1,19	85,95	0,27
K _c	0,45	2,77	0,04	77	0,46	102,94	0,10

Tabla 59. Parámetros del suelo, parámetros climáticos y evapotranspiración.

Estación Experimental El Tambo. Promedio Parcela 1, 2, 3. Etapa de levante							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,355	0,477	0,240	261	0,06	16,04	0,01
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,282	0,413	0,195	261	0,05	18,65	0,01
Temperatura a 15 cm ($^{\circ}C$)	20,98	26,22	19,27	261	0,91	4,35	0,11
Conductividad a 15 cm ($mS cm^{-1}$)	0,035	0,154	0,010	261	0,02	63,17	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,374	0,457	0,336	261	0,02	5,65	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,320	0,410	0,286	261	0,02	6,28	0,00
Temperatura a 45 cm ($^{\circ}C$)	21,03	26,30	19,34	261	0,66	3,12	0,08
Conductividad a 45 cm ($mS cm^{-1}$)	0,035	0,130	0,010	261	0,03	94,26	0,00
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento ($m s^{-1}$)	0,94	5,60	0,30	261	0,85	90,33	0,10
Brillo solar (horas)	5,72	10,00	0,20	261	2,59	45,27	0,31
Radiación ($MJ m^{-2} d^{-1}$)	17,44	24,30	9,50	261	3,97	22,78	0,48
Temperatura mínima ($^{\circ}C$)	13,67	20,10	7,70	261	2,22	16,25	0,27
Temperatura máxima ($^{\circ}C$)	27,14	31,30	21,60	261	1,72	6,34	0,21
Humedad relativa (%)	77,15	97,00	46,00	261	10,47	13,57	1,27
ET_o, ET y K_c							
ET _o ($mm d^{-1}$)	3,52	5,93	2,03	261	0,80	22,72	0,10
ET ($mm d^{-1}$)	2,13	12,72	0,09	261	2,00	93,98	0,24
K _c	0,67	5,09	0,04	261	0,73	108,76	0,09

Tabla 60. Parámetros del suelo, parámetros climáticos y evapotranspiración.

Estación Experimental El Rosario. Parcela 1. Etapa de levante							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) sin corregir	0,372	0,420	0,353	6	0,02	6,24	0,02
Humedad a 15 cm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) corregida	0,379	0,383	0,372	6	0,00	0,85	0,00
Temperatura a 15 cm ($^{\circ}\text{C}$)	22,94	24,14	21,58	6	0,99	4,31	0,79
Conductividad a 15 cm (mS cm^{-1})	0,161	0,200	0,124	6	0,02	14,94	0,02
Humedad a 45 cm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) sin corregir	0,367	0,390	0,352	6	0,02	4,43	0,02
Humedad a 45 cm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) corregida	0,448	0,479	0,429	6	0,02	4,92	0,02
Temperatura a 45 cm ($^{\circ}\text{C}$)	22,86	24,03	21,52	6	0,95	4,15	0,76
Conductividad a 45 cm (mS cm^{-1})	0,174	0,184	0,153	6	0,01	6,13	0,01
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento (m s^{-1})	0,92	1,31	0,56	6	0,27	29,56	0,22
Brillo solar (horas)	5,72	8,10	2,30	6	2,05	35,86	1,64
Radiación ($\text{MJ m}^{-2}\text{-d}^{-1}$)	17,28	21,80	11,60	6	3,41	19,72	2,73
Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$)	17,09	18,01	15,99	6	0,79	4,64	0,63
Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)	27,59	29,98	24,88	6	1,64	5,96	1,31
Humedad relativa (%)	72,62	84,88	63,18	6	7,82	10,77	6,26
ETo, ET y Kc							
ETo (mm d^{-1})	3,61	4,66	2,45	6	0,71	19,56	0,57
ET (mm d^{-1})	1,28	1,67	0,81	6	0,26	20,06	0,21
Kc	0,37	0,59	0,21	6	0,12	31,36	0,10

Tabla 61. Parámetros del suelo, Parámetros climáticos y Evapotranspiración.

Estación Experimental El Rosario. Parcela 2. Etapa de levante							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros Suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) Sin Corregir	0,338	0,363	0,296	35	0,02	4,93	0,01
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) Corregida	0,370	0,381	0,346	35	0,01	2,17	0,00
Temperatura a 15 cm ($^{\circ}C$)	22,24	24,96	20,44	35	1,11	4,98	0,37
Conductividad a 15 cm ($mS cm^{-1}$)	0,061	0,070	0,050	35	0,01	10,38	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) Sin Corregir	0,404	0,432	0,386	35	0,01	3,03	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) Corregida	0,501	0,548	0,473	35	0,02	3,92	0,01
Temperatura a 45 cm ($^{\circ}C$)	22,01	24,44	20,77	35	0,80	3,61	0,27
Conductividad a 45 cm ($mS cm^{-1}$)	0,071	0,090	0,060	35	0,01	13,61	0,00
Parámetros Climáticos							
Velocidad del viento ($m s^{-1}$)	1,00	1,28	0,54	27	0,23	23,35	0,09
Brillo Solar (horas)	7,01	10,60	0,00	35	3,23	46,08	1,07
Radiación ($MJ m^{-2} d^{-1}$)	18,79	24,20	8,30	35	4,72	25,13	1,56
Temperatura Mínima ($^{\circ}C$)	16,54	18,54	14,26	35	0,99	6,00	0,33
Temperatura Máxima ($^{\circ}C$)	27,96	32,21	22,35	35	2,12	7,57	0,70
Humedad Relativa (%)	69,84	89,81	58,43	35	8,01	11,47	2,65
ETo, ET y Kc							
ETo ($mm d^{-1}$)	3,67	5,03	1,78	35	0,97	26,56	0,32
ET ($mm d^{-1}$)	2,00	9,11	0,63	35	1,65	82,31	0,55
Kc	0,66	4,09	0,15	35	0,76	115,09	0,25

Tabla 62. Parámetros del suelo, parámetros climáticos y evapotranspiración.

Estación Experimental El Rosario. Parcela 3. Etapa de levante							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm (m ³ m ⁻³) sin corregir	0,371	0,381	0,341	16	0,01	2,56	0,00
Humedad a 15 cm (m ³ m ⁻³) corregida	0,382	0,383	0,373	16	0,00	0,62	0,00
Temperatura a 15 cm (°C)	22,25	23,72	20,83	16	1,02	4,57	0,50
Conductividad a 15 cm (mS cm ⁻¹)	0,146	0,213	0,120	16	0,03	17,57	0,01
Humedad a 45 cm (m ³ m ⁻³) sin corregir	0,446	0,461	0,429	16	0,01	2,19	0,00
Humedad a 45 cm (m ³ m ⁻³) Corregida	0,574	0,603	0,543	16	0,02	3,33	0,01
Temperatura a 45 cm (°C)	22,16	23,70	20,88	16	0,89	4,03	0,44
Conductividad a 45 cm (mS cm ⁻¹)	0,272	0,353	0,249	16	0,03	10,57	0,01
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento (m s ⁻¹)	0,96	1,22	0,54	14	0,24	24,85	0,13
Brillo solar (horas)	6,56	9,80	0,10	16	2,74	41,70	1,34
Radiación (MJ m ² -d ⁻¹)	18,28	23,30	8,50	16	4,01	21,95	1,96
Temperatura mínima (°C)	16,99	18,54	16,13	16	0,70	4,11	0,34
Temperatura máxima (°C)	28,19	32,21	22,93	16	2,12	7,53	1,04
Humedad relativa (%)	69,95	83,75	59,40	16	6,63	9,48	3,25
ET_o, ET y K_c							
ET _o (mm d ⁻¹)	3,84	5,03	1,98	16	0,79	20,66	0,39
ET (mm d ⁻¹)	0,96	2,77	0,20	16	0,73	75,26	0,36
K _c	0,29	1,40	0,06	16	0,33	111,36	0,16

Tabla 63. Parámetros del suelo, parámetros climáticos y evapotranspiración.

Estación Experimental El Rosario. Promedio Parcela 1, 2, 3. Etapa de levante							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm (m ³ m ⁻³) sin corregir	0,351	0,420	0,296	57	0,02	6,46	0,01
Humedad a 15 cm (m ³ m ⁻³) corregida	0,374	0,383	0,346	57	0,01	2,20	0,00
Temperatura a 15 cm (°C)	22,32	24,96	20,44	57	1,09	4,90	0,28
Conductividad a 15 cm (mS cm ⁻¹)	0,096	0,213	0,050	57	0,05	48,56	0,01
Humedad a 45 cm (m ³ m ⁻³) sin corregir	0,412	0,461	0,352	57	0,03	6,53	0,01
Humedad a 45 cm (m ³ m ⁻³) corregida	0,516	0,603	0,429	57	0,04	8,57	0,01
Temperatura a 45 cm (°C)	22,14	24,44	20,77	57	0,88	3,97	0,23
Conductividad a 45 cm (mS cm ⁻¹)	0,138	0,353	0,060	57	0,09	65,54	0,02
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento (m s ⁻¹)	0,97	1,31	0,54	47	0,24	24,74	0,07
Brillo solar (horas)	6,75	10,60	0,00	57	3,02	44,73	0,78
Radiación (MJ m ⁻² -d ⁻¹)	18,49	24,20	8,30	57	4,43	23,98	1,15
Temperatura mínima (°C)	16,72	18,54	14,26	57	0,93	5,55	0,24
Temperatura máxima (°C)	27,99	32,21	22,35	57	2,08	7,43	0,54
Humedad relativa (%)	70,17	89,81	58,43	57	7,67	10,94	1,99
ET_o, ET y K_c							
ET _o (mm d ⁻¹)	3,71	5,03	1,78	57	0,91	24,39	0,24
ET (mm d ⁻¹)	1,63	9,11	0,20	57	1,43	87,43	0,37
K _c	0,53	4,09	0,06	57	0,65	122,30	0,17

Tabla 64. Coeficiente de cultivo del café de Colombia en la etapa de levante.

Coeficiente de cultivo en la etapa de levante del café de Colombia				
Parcela	Parámetro Estadístico	Estación Experimental		
		Naranjal	El Rosario	El Tambo
Levante_1	Promedio	0,56	0,37	0,95
	Máximo	2,42	0,59	5,09
	Mínimo	0,11	0,21	0,27
	Datos	64	6	93
	DE	0,32	0,12	0,76
	CV	57,20	31,36	79,46
	IC	0,08	0,10	0,15
Levante_2	Promedio	0,57	0,66	0,58
	Máximo	0,80	4,09	4,53
	Mínimo	0,34	0,15	0,06
	Datos	6	35	91
	DE	0,15	0,76	0,81
	CV	26,39	115,09	138,52
	IC	0,12	0,25	0,17
Levante_3	Promedio	0,51	0,29	0,45
	Máximo	0,70	1,40	2,77
	Mínimo	0,41	0,06	0,04
	Datos	4	16	77
	DE	0,11	0,33	0,46
	CV	22,03	111,36	102,94
	IC	0,11	0,16	0,10

Continúa...

...continuación.

Coeficiente de cultivo en la etapa de levante del café de Colombia				
Parcela	Parámetro Estadístico	Estación Experimental		
		Naranjal	El Rosario	El Tambo
Tres Parcelas	Promedio	0,56	0,53	0,67
	Máximo	2,42	4,09	5,09
	Mínimo	0,11	0,06	0,04
	Datos	74	57	261
	DE	0,30	0,65	0,73
	CV	54,15	122,30	108,76
	IC	0,07	0,17	0,09
Etapa levante en las tres estaciones	Promedio	0,63		
	Máximo	5,09		
	Mínimo	0,04		
	Datos	392		
	DE	0,66		
	CV	105,08		
	IC	0,07		

Como se observa en la Tabla 64, el Kc promedio de 392 datos, para la etapa de levante del cultivo de café de Colombia fue de $0,63 \pm 0,07$. Es de anotar que, hasta hace algunos años, para cafetales en Colombia, el valor de la Evapotranspiración del cultivo (ETc o simplemente ET) ha sido estimado más no observado ni medido, y para ello, los investigadores han utilizado valores de Kc entre 0,8 y 1,1 provenientes de mediciones de ETc en cafetales brasileros en etapa productiva, con densidades de siembra mayores a 6.000 plantas/ha (Castaño y García 2018). En estudios realizados en Colombia por Castaño & García (2018), utilizando el sistema Eddy Covariance en un cultivo de café variedad Castillo Paraguaicito®, con una densidad de siembra de 7.143 árboles/ha a plena exposición solar, los autores reportan un valor de Kc de $0,62 \pm 0,03$ para la etapa de levante.

Para el cálculo de la HH verde se utilizó la expresión (Ecuación <22>):

$$\text{Huella Hídrica verde}_{\text{levante}} \left(L^1 m^{-2} \right) = ET \left(\frac{mm}{d} \right) \times \text{tiempo (d)} \quad \text{<22>}$$

En la Tabla 65 se presentan los resultados de la HHv y los valores utilizados para su determinación para las tres parcelas evaluadas, en las tres estaciones experimentales y sus valores promedio.

Tabla 65. Resultados de la HHv y valores utilizados en su determinación en la Etapa de Levante.

Parcela	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	ET (mm d ⁻¹)	Tiempo (d)	HHv (L m ²)	ET (mm d ⁻¹)	Tiempo (d)	HHv (L m ²)	ET (mm d ⁻¹)	Tiempo (d)	HHv (L m ²)
1	2,08	733	1.524,64	3,19	744	2.373,36	1,28	732	936,96
2	2,26	733	1.656,58	1,66	744	1.235,04	2,00	732	1.464,00
3	2,26	733	1.656,58	1,39	744	1.034,16	0,96	732	702,72
Promedio Estación	2,10	733	1.539,30	2,13	744	1.584,72	1,63	732	1.193,16
Promedio general de la etapa levante (L m⁻²)						1.439,06			

Determinación de la Huella Hídrica Gris

La HH gris se estimó en función de los volúmenes de agua recolectados por escorrentía y por infiltración, considerando las características de calidad en el agua recolectada.

Adicionalmente, se tuvo en cuenta la concentración de cada uno de los parámetros evaluados, que superara los valores de calidad condensados en la Tabla 5. La HH gris es aquella equivalente a la del parámetro de los seleccionados, por superar los valores de calidad establecidos, que genere el mayor valor, aplicando la **Ecuación <23>**.

$$\text{HH gris levante} = \frac{V_e * C_e}{C_{m\acute{a}x}} + \frac{V_i * C_i}{C_{m\acute{a}x}} - \frac{V_a * C_a}{C_{m\acute{a}x}} \quad \langle 23 \rangle$$

Dónde:

HH gris Levante = Huella Hídrica Gris en la Etapa de Levante en L m⁻²

Ve = Volumen recolectado por escorrentía (L)

Vi = Volumen recolectado por infiltración (L)

Va = Volumen de agua lluvia de ingreso

Ce = Concentración del parámetro en el agua de escorrentía que excede los límites de calidad (g L^{-1})

Ci = Concentración del parámetro en el agua de infiltración que excede los límites de calidad (g L^{-1})

Ca = Concentración del parámetro de interés en el agua de lluvia (g L^{-1})

$C_{\text{máx}}$ = Concentración del parámetro según los límites de calidad (g L^{-1})

En la Tabla 66 se presentan los volúmenes de agua de escorrentía recolectada en cada una de las parcelas, en las tres estaciones experimentales y su valor promedio.

En la Tabla 67 se presentan los volúmenes de agua de infiltración estimados en cada una de las parcelas en etapa de levante, en las tres estaciones experimentales y su valor promedio.

En la Tablas 68 a la 75 se presentan los resultados de la caracterización del agua de escorrentía y del agua de infiltración medida a 45 cm de profundidad, en cada una de las parcelas en etapa de levante, en las tres estaciones experimentales y su valor promedio.

Tabla 66. Volúmenes de agua de escorrentía recolectados en las parcelas experimentales. Etapa de levante.

Volúmenes de agua de Escorrentía									
Parcela	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	Precipitación: 6.380,40 mm			Precipitación: 3.347,23 mm			Precipitación 3.394,92 mm		
	Eventos	(L m ⁻²)	(L)	Eventos	(L m ⁻²)	(L)	Eventos	(L m ⁻²)	(L)
1	124	404,18	3.637,62	93	189,72	1.707,44	101	207,24	1.865,20
2	124	261,13	2.350,13	80	112,32	1.010,92	101	200,90	1.808,12
3	123	294,77	2.652,90	69	90,93	818,38	97	216,07	1.944,67
Prom	124	320,02	2.880,22	81	130,99	1.178,91	100	208,07	1.872,67
	Porcentaje de la lluvia		5,02	Porcentaje de la lluvia via		3,91	Porcentaje de la lluvia		6,13

Tabla 67. Volúmenes de agua de infiltración estimados a 60 cm de profundidad del perfil del suelo. Parcelas experimentales. Etapa de levante.

Parcela	Volúmenes de agua de Infiltración								
	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	Eventos	(L m ⁻²)	(L)	Eventos	(L m ⁻²)	(L)	Eventos	(L m ⁻²)	(L)
1	0	0	0	0	0	0	20	5,58	50,18
2	0	0	0	0	0	0	40	15,34	138,05
3	0	0	0	0	0	0	104	45,72	411,47
Prom.	0						55	22,21	199,90

Tabla 68. Caracterización de los drenados de escorrentía. Etapa de levante.

Estación Experimental Naranjal										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Levante 1										
Promedio	4,94	218	59	218	147	291	0,84	3,98	80,23	14,14
Máximo	6,25	329	221	725	586	835	2,88	8,60	118,30	23,20
Mínimo	3,91	83	3	61	4	83	0,26	1,30	28,90	5,60
Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	7	7
DE	0,59	80,46	64,74	162,84	175,26	230,78	0,64	1,84	42,22	7,26
CV	0,12	0,37	1,10	0,75	1,19	0,79	0,76	0,46	0,53	0,51
IC	0,25	34,41	27,69	69,65	74,96	98,70	0,27	0,79	31,28	5,38
Levante 2										
Promedio	5,03	224	58	210	119	280	1,58	6,70	91,07	8,80
Máximo	6,31	554	364	815	424	929	3,88	14,60	212,80	15,30
Mínimo	4,07	83	5	47	4	56	0,36	2,60	28,00	5,60

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental Naranjal										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	7	7
DE	0,57	102,08	78,42	176,51	107,47	198,68	1,06	3,36	60,08	3,24
CV	0,11	0,46	1,35	0,84	0,90	0,71	0,67	0,50	0,66	0,37
IC	0,24	43,66	33,54	75,49	45,97	84,98	0,45	1,44	44,50	2,40
Levante 3										
Promedio	5,20	228	48	244	108	227	1,67	7,40	102,37	7,99
Máximo	7,45	329	215	565	548	830	4,29	21,20	236,60	9,30
Mínimo	3,45	102	6	42	10	72	0,14	1,74	39,20	6,80
Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	7	7
DE	0,98	66,81	57,56	154,49	146,40	183,35	1,10	4,57	80,26	0,92
CV	0,19	0,29	1,21	0,63	1,35	0,81	0,66	0,62	0,78	0,12
IC	0,42	28,57	24,62	66,07	62,61	78,42	0,47	1,95	59,46	0,68
Promedio										
Promedio	5,06	223	55	224	125	266	1,36	6,03	91,22	10,31
Máximo	7,45	554	364	815	586	929	4,29	21,20	236,60	23,20
Mínimo	3,45	83	3	42	4	56	0,14	1,30	28,00	5,60
Datos	63	63	63	63	63	63	63	63	21	21
DE	0,73	83,11	66,56	162,85	144,28	203,80	1,01	3,70	60,30	5,20
CV	0,15	0,37	1,22	0,73	1,16	0,77	0,74	0,61	0,66	0,50
IC	0,18	20,52	16,44	40,21	35,63	50,32	0,25	0,91	25,79	2,22

Tabla 69. Caracterización de los drenados de infiltración. Etapa de levante.

Estación Experimental Naranjal										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Levante 1										
Promedio	5,84	197	2	97	17	84	0,67	3,16	42,41	9,40
Máximo	7,24	267	5	232	57	120	2,44	5,50	81,20	12,70
Mínimo	4,99	77	0	38	8	45	0,13	1,10	12,80	6,80
Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	7	7
DE	0,60	41,88	1,27	50,61	10,87	26,45	0,54	1,34	34,76	2,66
CV	0,10	0,21	0,74	0,52	0,65	0,31	0,81	0,42	0,82	0,28
IC	0,26	17,91	0,54	21,65	4,65	11,31	0,23	0,57	25,75	1,97
Levante 2										
Promedio	5,74	204	5	88	8	93	1,03	4,41	47,03	8,53
Máximo	6,44	258	72	230	37	145	3,29	12,30	72,80	12,90
Mínimo	4,58	139	0	31	2	37	0,13	1,30	25,20	1,40
Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	7	7
DE	0,47	32,30	15,47	58,14	8,08	27,77	0,70	2,54	20,29	4,59
CV	0,08	0,16	2,85	0,66	1,02	0,30	0,68	0,58	0,43	0,54
IC	0,20	13,82	6,62	24,87	3,46	11,88	0,30	1,09	15,03	3,40
Levante 3										
Promedio	5,90	211	2	74	7	119	0,77	11,48	35,24	8,13
Máximo	6,47	269	20	164	36	227	2,00	21,20	70,30	14,80
Mínimo	4,63	159	0	41	2	64	0,18	3,10	11,20	3,80
Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	7	7
DE	0,41	29,32	4,27	28,67	7,67	43,89	0,47	4,81	23,28	4,16
CV	0,07	0,14	1,77	0,39	1,03	0,37	0,60	0,42	0,66	0,51

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental Naranjal										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
IC	0,18	12,54	1,83	12,26	3,28	18,77	0,20	2,06	17,25	3,08
Promedio										
Promedio	5,83	204	3	86	11	99	0,82	6,35	41,56	8,69
Máximo	7,24	269	72	232	57	227	3,29	21,20	81,20	14,80
Mínimo	4,58	77	0	31	2	37	0,13	1,10	11,20	1,40
Datos	63	63	63	63	63	63	63	63	21	21
DE	0,50	34,81	9,29	47,65	9,84	36,22	0,59	4,87	25,95	3,73
CV	0,09	0,17	2,91	0,55	0,92	0,37	0,72	0,77	0,62	0,43
IC	0,12	8,60	2,29	11,77	2,43	8,94	0,15	1,20	11,10	1,60

Tabla 70. Caracterización de los drenados de escorrentía. Etapa de levante.

Estación Experimental El Tambo										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Levante 1										
Promedio	6,18	196	97	241	115	355	1,30	6,86	74,60	7,86
Máximo	6,98	266	559	612	546	2.290	3,89	17,10	94,70	11,20
Mínimo	5,49	113	2	86	18	59	0,12	1,30	54,20	4,20
Datos	23	23	23	23	23	23	23	23	8	8
DE	0,41	50,47	133,42	134,83	109,78	454,78	0,90	3,47	13,10	2,56
CV	0,07	0,26	1,37	0,56	0,96	1,28	0,70	0,51	0,18	0,33
IC	0,17	20,63	54,53	55,10	44,87	185,86	0,37	1,42	9,08	1,78

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental El Tambo										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Levante 2										
Promedio	6,36	187	82	249	97	320	1,68	9,42	101,70	9,89
Máximo	7,86	284	343	984	328	1.848	6,26	37,80	199,40	15,40
Mínimo	5,82	100	10	86	20	161	0,29	3,40	54,80	7,00
Datos	23	23	23	23	23	23	23	23	8	8
DE	0,45	40,21	103,64	182,56	60,68	345,40	1,30	8,20	46,07	2,94
CV	0,07	0,21	1,26	0,73	0,62	1,08	0,78	0,87	0,45	0,30
IC	0,18	16,43	42,36	74,61	24,80	141,16	0,53	3,35	31,92	2,04
Levante 3										
Promedio	6,22	196	32	186	86	231	1,48	7,78	77,70	8,15
Máximo	6,73	241	73	310	157	329	4,34	11,40	98,80	11,20
Mínimo	5,47	137	10	118	44	170	0,53	2,50	55,10	4,30
Datos	19	19	19	19	19	19	19	19	6	6
DE	0,34	29,08	13,99	48,19	35,16	46,61	1,00	2,91	15,94	3,02
CV	0,05	0,15	0,43	0,26	0,41	0,20	0,67	0,37	0,21	0,37
IC	0,15	13,07	6,29	21,67	15,81	20,96	0,45	1,31	12,75	2,41
Promedio										
Promedio	6,25	193	73	228	100	306	1,49	8,03	85,30	8,68
Máximo	7,86	284	559	984	546	2.290	6,26	37,80	199,40	15,40
Mínimo	5,47	100	2	86	18	59	0,12	1,30	54,20	4,20
Datos	65	65	65	65	65	65	65	65	22	22
DE	0,41	41,06	102,95	138,22	76,79	339,58	1,08	5,55	31,43	2,85
CV	0,06	0,21	1,41	0,61	0,77	1,11	0,73	0,69	0,37	0,33
IC	0,10	9,98	25,03	33,60	18,67	82,55	0,26	1,35	13,13	1,19

Tabla 71. Caracterización de los drenados de infiltración. Etapa de levante.

Estación Experimental El Tambo										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Levante 1										
Promedio	5,76	185	5	106	31	98	0,88	5,57	43,60	5,05
Máximo	7,24	273	15	243	93	193	2,50	24,10	57,10	6,80
Mínimo	4,55	118	1	10	2	45	0,29	2,10	30,10	3,80
Datos	19	19	19	19	19	19	19	19	6	6
DE	0,78	39,10	3,78	67,14	21,73	33,33	0,54	5,48	10,30	1,25
CV	0,14	0,21	0,77	0,64	0,70	0,34	0,61	0,98	0,24	0,25
IC	0,35	17,58	1,70	30,19	9,77	14,98	0,24	2,46	8,24	1,00
Levante 2										
Promedio	5,96	207	8	93	30	91	0,86	6,15	54,08	6,09
Máximo	6,87	346	52	230	87	182	2,09	14,60	61,30	9,10
Mínimo	4,43	137	2	18	10	50	0,25	1,30	43,10	4,30
Datos	23	23	23	23	23	23	23	23	8	8
DE	0,67	58,11	10,38	39,74	18,00	36,51	0,49	4,08	6,76	1,52
CV	0,11	0,28	1,24	0,43	0,61	0,40	0,57	0,66	0,13	0,25
IC	0,27	23,75	4,24	16,24	7,35	14,92	0,20	1,67	4,68	1,06
Levante 3										
Promedio	6,11	214	7	103	37	100	0,64	6,68	54,52	6,20
Máximo	7,44	278	16	197	102	219	1,15	16,70	70,10	9,30
Mínimo	5,53	156	1	50	8	30	0,18	2,50	39,40	4,30
Datos	19	19	19	19	19	19	19	19	6	6
DE	0,45	37,78	3,50	39,63	31,48	49,73	0,31	3,58	10,04	1,76
CV	0,07	0,18	0,53	0,38	0,86	0,50	0,48	0,54	0,18	0,28

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental El Tambo										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
IC	0,20	16,99	1,57	17,82	14,16	22,36	0,14	1,61	8,04	1,41
Promedio										
Promedio	5,95	203	7	100	32	96	0,80	6,14	51,07	5,81
Máximo	7,44	346	52	243	102	219	2,50	24,10	70,10	9,30
Mínimo	4,43	118	1	10	2	30	0,18	1,30	30,10	3,80
Datos	61	61	61	61	61	61	61	61	20	20
DE	0,65	47,65	7,04	49,33	23,81	39,75	0,46	4,38	9,82	1,53
CV	0,11	0,24	1,04	0,49	0,74	0,41	0,58	0,71	0,19	0,26
IC	0,16	11,96	1,77	12,38	5,98	9,97	0,12	1,10	4,30	0,67

Tabla 72. Caracterización de los drenados de escorrentía. Etapa de levante.

Estación Experimental El Rosario										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Levante 1										
Promedio	6,05	214	113	172	80	244	1,99	8,86	46,28	8,18
Máximo	7,03	318	590	330	189	658	4,38	34,70	81,30	12,70
Mínimo	4,43	137	11	54	32	75	0,60	2,20	28,70	4,10
Datos	22	22	22	22	22	22	22	22	8	8
DE	0,59	54,73	154,48	84,21	45,04	162,91	1,05	6,95	18,06	2,85
CV	0,10	0,26	1,37	0,49	0,56	0,67	0,53	0,78	0,39	0,35
IC	0,25	22,87	64,55	35,19	18,82	68,07	0,44	2,91	12,51	1,97

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental El Rosario										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Levante 2										
Promedio	5,96	213	194	237	115	334	2,69	7,71	110,84	18,45
Máximo	6,74	379	904	626	248	836	5,09	16,60	140,60	32,10
Mínimo	3,41	111	18	57	49	74	0,63	2,10	80,10	7,10
Datos	22	22	22	22	22	22	22	22	8	8
DE	0,69	49,58	249,86	149,88	58,37	222,18	1,40	4,16	21,12	8,72
CV	0,12	0,23	1,29	0,63	0,51	0,66	0,52	0,54	0,19	0,47
IC	0,29	20,72	104,41	62,63	24,39	92,84	0,59	1,74	14,64	6,04
Levante 3										
Promedio	6,12	174	61	155	104	276	3,31	10,42	81,17	7,75
Máximo	6,73	261	275	368	220	864	5,09	18,40	118,30	11,20
Mínimo	5,55	121	20	54	28	116	0,54	2,90	29,40	4,20
Datos	18	18	18	18	18	18	18	18	6	6
DE	0,31	32,89	56,34	87,14	51,73	163,33	1,25	4,12	28,98	2,30
CV	0,05	0,19	0,92	0,56	0,50	0,59	0,38	0,40	0,36	0,30
IC	0,14	15,20	26,03	40,26	23,90	75,46	0,58	1,90	23,19	1,84
Promedio										
Promedio	6,04	202	127	191	100	285	2,62	8,91	79,27	11,80
Máximo	7,03	379	904	626	248	864	5,09	34,70	140,60	32,10
Mínimo	3,41	111	11	54	28	74	0,54	2,10	28,70	4,10
Datos	62	62	62	62	62	62	62	62	22	22
DE	0,56	50,00	183,15	116,49	53,35	187,29	1,33	5,34	35,39	7,47
CV	0,09	0,25	1,45	0,61	0,54	0,66	0,51	0,60	0,45	0,63
IC	0,14	12,45	45,59	29,00	13,28	46,62	0,33	1,33	14,79	3,12

Tabla 73. Caracterización de los drenados de infiltración. Etapa de levante.

Estación Experimental El Rosario										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Levante 1										
Promedio	6,17	179	6	90	33	122	1,44	4,12	53,13	7,13
Máximo	6,94	226	20	219	65	250	4,27	11,20	67,10	8,20
Mínimo	5,70	139	0	29	2	30	0,46	1,80	40,10	5,90
Datos	18	18	18	18	18	18	18	18	6	6
DE	0,37	24,23	6,88	53,58	18,29	60,22	0,95	2,42	10,97	0,93
CV	0,06	0,14	1,11	0,59	0,55	0,49	0,66	0,59	0,21	0,13
IC	0,17	11,19	3,18	24,75	8,45	27,82	0,44	1,12	8,78	0,74
Levante 2										
Promedio	6,04	161	7	95	36	172	1,36	7,71	91,10	7,20
Máximo	7,37	241	21	232	110	752	2,71	18,10	153,10	13,10
Mínimo	4,06	124	1	20	4	46	0,35	1,20	35,40	2,40
Datos	22	22	22	22	22	22	22	22	8	8
DE	0,75	26,54	4,95	60,17	25,55	163,82	0,74	4,88	42,38	3,76
CV	0,12	0,16	0,68	0,63	0,71	0,95	0,54	0,63	0,47	0,52
IC	0,31	11,09	2,07	25,14	10,68	68,46	0,31	2,04	29,37	2,61
Levante 3										
Promedio	6,21	176	5	64	25	95	1,44	5,08	34,95	4,83
Máximo	7,70	268	21	192	67	183	2,50	14,60	47,90	6,70
Mínimo	5,64	94	0	27	2	34	0,41	1,20	25,80	3,20
Datos	18	18	18	18	18	18	18	18	6	6
DE	0,45	39,78	5,11	38,42	24,10	47,19	0,62	3,55	8,08	1,29

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental El Rosario										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
CV	0,07	0,23	1,09	0,60	0,95	0,50	0,43	0,70	0,23	0,27
IC	0,21	18,38	2,36	17,75	11,13	21,80	0,29	1,64	6,46	1,03
Promedio										
Promedio	6,13	171	6	84	32	132	1,41	5,78	62,87	6,47
Máximo	7,70	268	21	232	110	752	4,27	18,10	153,10	13,10
Mínimo	4,06	94	0	20	2	30	0,35	1,20	25,80	2,40
Datos	58	58	58	58	58	58	58	58	20	20
DE	0,56	31,18	5,66	53,11	23,10	112,75	0,76	4,09	36,36	2,66
CV	0,09	0,18	0,92	0,63	0,73	0,85	0,54	0,71	0,58	0,41
IC	0,14	8,02	1,46	13,67	5,95	29,02	0,20	1,05	15,94	1,17

Tabla 74. Caracterización de los drenados de escorrentía. Etapa de levante.

Promedio de las tres Estaciones										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Promedio	5,79	206	84	214	108	286	1,82	7,65	85,17	10,26
Máximo	7,86	554	904	984	586	2.290	6,26	37,80	236,60	32,10
Mínimo	3,41	83	2	42	4	56	0,12	1,30	28,00	4,10
Datos	190	190	190	190	190	190	190	190	65	65
DE	0,78	61,71	129,58	140,82	99,42	253,51	1,27	5,06	43,54	5,58
CV	0,13	0,30	1,53	0,66	0,92	0,89	0,70	0,66	0,51	0,54
IC	0,11	8,77	18,42	20,02	14,14	36,05	0,18	0,72	10,58	1,36

Tabla 75. Caracterización de los drenados de infiltración. Etapa de levante.

Promedio de las tres Estaciones										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Promedio	5,96	193	5	90	25	109	1,00	6,10	51,66	7,02
Máximo	7,70	346	72	243	110	752	4,27	24,10	153,10	14,80
Mínimo	4,06	77	0	10	2	30	0,13	1,10	11,20	1,40
Datos	182	182	182	182	182	182	182	182	61	61
DE	0,58	41,26	7,65	50,30	22,19	72,42	0,67	4,45	27,41	3,03
CV	0,10	0,21	1,44	0,56	0,90	0,67	0,67	0,73	0,53	0,43
IC	0,08	5,99	1,11	7,31	3,22	10,52	0,10	0,65	6,88	0,76

En la Tabla 76 se presentan los valores de los parámetros que excedieron la concentración límite en las caracterizaciones de las aguas de escorrentía en la etapa de levante.

En la Tabla 77 se presentan los resultados de la huella hídrica gris por escorrentía para los tres parámetros que excedieron la concentración límite: DQO, SST y N-NH₃.

Tabla 76. Valores de los parámetros que excedieron las concentraciones límite en las caracterizaciones de las aguas de escorrentía. Etapa de levante.

Parcela	Estación Experimental											
	Naranjal				El Tambo				El Rosario			
	Vol. (L)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)	Vol. (L)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)	Vol. (L)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
1	3.637,62	218	147	14,14	1.707,44	241	115	7,86	1.865,20	172	-	8,18
2	2.350,13	210	119	8,80	1.010,92	249	-	9,89	1.808,12	237	115	18,45
3	2.652,90	244	108	7,99	818,38	186	-	8,15	1.944,67	155	104	7,75
Prom. Estación	2.880,22	224	125	10,31	1.178,91	228	-	8,68	1.872,67	191	-	11,80

Tabla 77. Resultados de la HHg por escorrentía para los parámetros que excedieron las concentraciones límite en la etapa de levante.

Parcela	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
1	3.524,45	594,14	2.857,55	1.828,86	218,17	745,58	1.425,84	-	847,63
2	2.193,45	310,74	1.148,95	1.118,75	-	555,44	1.904,55	231,04	1.853,32
3	2.876,92	318,35	1.177,59	676,53	-	370,54	1.339,66	224,72	837,29
Promedio Estación	2.867,42	400,03	1.649,73	1.194,63	-	568,50	1.589,69	-	1.227,64

A continuación, se presentan los cálculos realizados para encontrar la Huella Hídrica Gris por escorrentía en la etapa de levante, en las tres estaciones experimentales, con base en el parámetro que generó los valores más altos, que en este caso fue la DQO.

$$\text{HH Gris Levante Naranjal} = \frac{2.880,22 \left(\frac{\text{L}}{\text{Parcela}} \right) * 0,224 \text{ (g L}^{-1}\text{)}}{0,025 \text{ (g L}^{-1}\text{)}} = \frac{\quad}{9 \text{ m}^2} = \mathbf{2.867,42 \text{ L m}^{-2}}$$

$$\text{HH Gris Levante El Tambo} = \frac{1.178,91 \left(\frac{\text{L}}{\text{Parcela}} \right) * 0,228 \text{ (g L}^{-1}\text{)}}{0,025 \text{ (g L}^{-1}\text{)}} = \frac{\quad}{9 \text{ m}^2} = \mathbf{1.194,63 \text{ L m}^{-2}}$$

$$\text{HH Gris Levante El Rosario} = \frac{1.872,67 \left(\frac{\text{L}}{\text{Parcela}} \right) * 0,191 \text{ (g L}^{-1}\text{)}}{0,025 \text{ (g L}^{-1}\text{)}} = \frac{\quad}{9 \text{ m}^2} = \mathbf{1.589,69 \text{ L m}^{-2}}$$

En la Tabla 78 se presentan los resultados de la huella hídrica gris por escorrentía, para las tres estaciones experimentales.

Para el caso del agua infiltrada a más de 45 cm del perfil del suelo, sólo se presentaron drenados para la Estación Experimental El Rosario.

En la Tabla 79 se presentan los valores de los parámetros que excedieron la concentración límite en las caracterizaciones de las aguas de infiltración en la etapa de levante y el valor de la HH gris.

En la Tabla 80 se presentan los resultados de la huella hídrica gris total (HHg por escorrentía + HHg por infiltración) para las tres estaciones experimentales.

En la Tabla 81 se presentan los resultados de la caracterización del agua de lluvia, en las tres estaciones experimentales.

Tabla 78. Valores de la huella hídrica gris por escorrentía. Parcelas de levante.

Estación	Naranjal	El Tambo	El Rosario	Promedio
HHg (L m ⁻²)	2.867,42	1.194,63	1.589,69	1.883,91

Tabla 79. Valores de la huella hídrica gris por infiltración. Etapa de levante.

Estación Experimental El Rosario.						
Parcela	Volumen (L)	DQO (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)	HHg/DQO (mg L ⁻¹)	HHg/N-NH ₃ (mg L ⁻¹)	HHg (mg L ⁻¹)
1	50,18	90	7,13	20,07	19,88	20,07
2	138,05	95	7,20	58,29	55,22	58,29
3	411,47	64	4,83	117,04	110,41	117,04
Promedio	199,90	84	6,47	74,63	71,85	74,63

Tabla 80. Valores de la huella hídrica gris por escorrentía+infiltración. Parcelas de levante.

Estación	Naranjal	El Tambo	El Rosario	Promedio
HHg (L m ⁻²)	2.867,42	1.194,63	1.661,54	1.907,86

Tabla 81. Caracterización del agua de lluvia que ingresó de ingreso a las parcelas de levante.

Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Estación Experimental Naranjal							
Promedio	6,02	2,54	12	12	0,45	1,53	0,48
Máximo	7,14	4,40	21	18	0,82	12,11	0,85
Mínimo	5,08	0,97	4	5	0,15	0,18	0,11
Datos	24	24	24	24	24	24	24
DE	0,59	0,91	4,73	4,37	0,19	2,35	0,20
CV	9,78	35,79	37,94	36,93	41,90	153,75	42,83
IC	0,24	0,36	1,89	1,75	0,08	0,94	0,08
Estación Experimental El Tambo							
Promedio	6,63	3,34	10	8	0,61	2,01	0,42
Máximo	7,60	5,00	26	18	0,87	3,30	0,66
Mínimo	4,91	1,11	2	4	0,10	0,80	0,11
Datos	24	24	24	24	24	24	24
DE	0,86	1,12	5,09	4,71	0,23	0,81	0,19
CV	12,92	33,59	49,50	55,94	37,13	40,48	45,88
IC	0,34	0,45	2,04	1,88	0,09	0,33	0,08
Estación Experimental El Rosario							
Promedio	6,49	3,30	11	10	0,46	1,75	0,54
Máximo	7,78	5,14	25	26	0,85	3,50	0,69
Mínimo	5,06	1,14	2	4	0,10	0,50	0,34
Datos	24	24	24	24	24	24	24
DE	0,96	1,10	6,97	5,92	0,25	0,97	0,10
CV	14,74	33,46	63,38	57,48	54,48	55,40	18,35
IC	0,38	0,44	2,79	2,37	0,10	0,39	0,04

En la Tabla 82 se presenta la lluvia efectiva que llegó a las parcelas de levante. Para su cálculo se tuvieron en cuenta los porcentajes recomendados por Allen et al. (2006), del 90% de la lluvia total para el primer año y del 75% de la lluvia total para el segundo año.

Tabla 82. Volumen y DQO de las entradas de agua en las parcelas de levante.

Variable	Estación Experimental		
	Naranjal	El Tambo	El Rosario
Precipitación (L) (primer año)	20.377,80	16.054,20	18.837,72
Lluvia efectiva (L) (primer año)	18.340,02	14.448,78	16.953,95
Precipitación (L) (segundo año)	37.045,80	14.070,87	11.716,56
Lluvia efectiva (L) (segundo año)	27.784,35	10.553,15	8.787,42
Lluvia efectiva (L) (Levante)	46.124,37	25.001,93	25.741,37
DQO en la lluvia (mg L ⁻¹)	12	8	10
Carga másica de ingreso (g DQO)	553,49	200,02	257,41
HHg de la carga másica de ingreso (L)	22.139,70	8.000,62	10.296,55
HHg de la carga másica de ingreso (L m⁻²)	2.459,97	888,96	1.144,06

En la Tabla 83 se presentan los resultados de la huella hídrica gris total (HHg por escorrentía + HHg por infiltración – HHg del agua de lluvia de ingreso) para las tres estaciones experimentales.

Tabla 83. Valores de la huella hídrica gris total. Parcelas de levante.

Estación	Naranjal	El Tambo	El Rosario	Promedio
HHg (escorrentía + infiltración) (L m ⁻²)	2.867,42	1.194,63	1.661,54	1.907,86
HHg (agua lluvia de ingreso) (L m ⁻²)	2.459,97	888,96	1.144,06	1.497,66
HHg etapa de levante (L m ⁻²)	407,45	305,67	517,48	410,20

Resultados Huella Hídrica en la etapa de levante

En la Tabla 84 y en las Figuras 38 a la 40 se presentan los resultados promedio de la huella hídrica para la etapa de levante, en las tres estaciones experimentales.

Tabla 84. Valores de la HH verde, HH azul y HH gris en la etapa de levante.

Tipo de Huella	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Huella Hídrica Azul	0	0	0	0
Huella Hídrica Verde	1.539,30	1.584,72	1.193,16	1.439,06
Huella Hídrica Gris	407,45	305,67	517,48	410,20
Huella Hídrica Total	1.946,75	1.890,39	1.710,64	1.849,26

De los resultados presentados en las Figuras 38, 39 y 40 se puede apreciar que la HH total en la etapa de levante varió entre 1.710,64 L m⁻² en la Estación Experimental El Rosario y 1.946,75 L m⁻² en la Estación Experimental Naranjal.

La HH verde alcanzó valores de 1.193,16 L m⁻² en la Estación Experimental El Rosario, 1.539,30 L m⁻² en la Estación Experimental Naranjal y 1.584,72 L m⁻² en la Estación Experimental El Tambo.

La HH gris alcanzó valores de 305,67 L m⁻² en la Estación Experimental El Tambo, 407,45 L m⁻² en la Estación Experimental Naranjal y 517,48 L m⁻² en la Estación Experimental El Rosario.

En la Tabla 85 y en la Figura 41 se presentan los resultados promedio de la huella hídrica para la etapa de levante.

Tabla 85. Valores promedio de la HH en la etapa de levante.

Unidades	HH Azul	HH verde	HH gris	HH total
L m ⁻²	0,00	1.439,06	410,20	1.849,26

La HH total promedio de la etapa de levante, evaluada en las tres estaciones experimentales de Cenicafé, fue de 1.849,26 L m⁻², representando la HH verde un porcentaje del 77,82% (1.439,06 L m⁻²) y la HH gris el 22,18% (410,20 L m⁻²).

Etapa de producción

La etapa de producción se monitoreó durante 733 días en la Estación Experimental Naranjal, durante 744 días en la Estación Experimental El Tambo y durante 730 días en la Estación Experimental El Rosario, para un promedio de 736 días (24,5 meses).

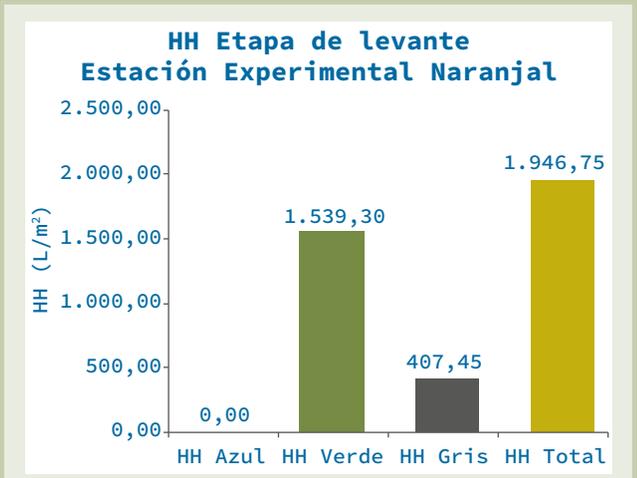


Figura 38. Valores promedio de la Huella Hídrica en la Etapa de Levante, en la Estación Experimental NaranjaJal.

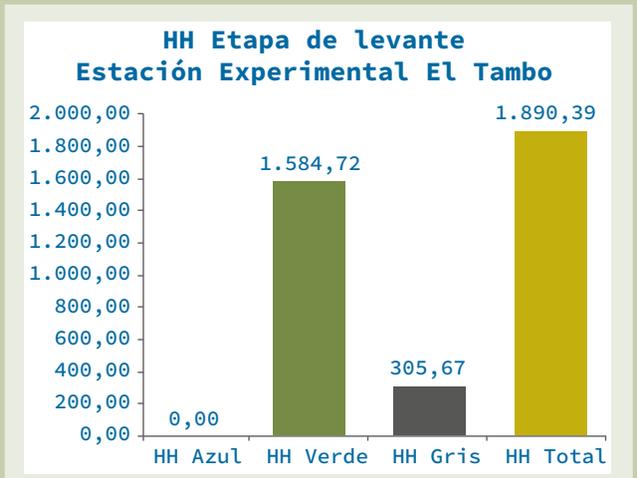


Figura 39. Valores promedio de la Huella Hídrica en la Etapa de Levante, en la Estación Experimental EL Tambo.

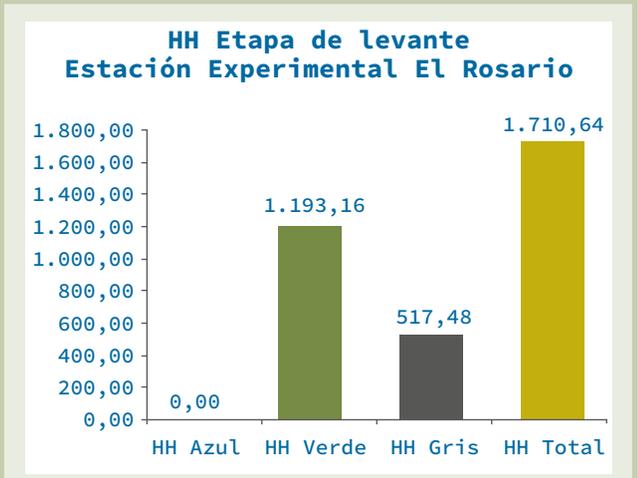


Figura 40. Valores promedio de la Huella Hídrica en la Etapa de Levante, en la Estación Experimental EL Rosario.

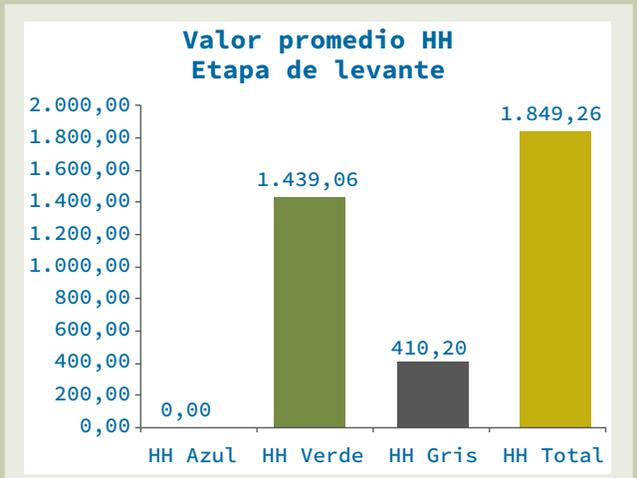


Figura 41. Valores promedio de la Huella Hídrica en la Etapa de levante.

Determinación de la Huella Hídrica Azul

Dado que en esta etapa no se realizó riego, la huella hídrica azul fue de cero.

Determinación de la Huella Hídrica Verde

Para el cálculo del volumen de agua evapotranspirado, y puesto que no se dispuso de lisímetros con capacidad de medir el efluente lixiviado, se utilizó la información generada por las sondas de humedad.

En la Tabla 86 se presentan los coeficientes de las Ecuaciones <24> y <25> para ajustar los datos generados por las sondas.

$$\text{Humedad} = A + B \text{ (datos sin procesar del sensor)} \text{ <24>}$$

$$\text{Humedad} = A + B \text{ (datos sin procesar)} + C \text{ (datos sin procesar)}^2 \text{ <25>}$$

Tabla 86. Coeficientes de la ecuación de calibración para los valores de humedad generados por las sondas ubicadas a 15 y 45 cm de profundidad en las parcelas en etapa de producción, en las tres estaciones experimentales.

Estación	Profundidad (Ecuación que aplica)	Densidad aparente (g cm ⁻³)	Coeficientes de la ecuación de calibración			R ²
			A	B	C	
Naranjal	15 cm (24)	0,68	0,0622	3*10 ⁻⁴	-	0,981
	45 cm (24)	0,83	0,0933	2*10 ⁻⁴	-	0,985
El Tambo	15 cm (24)	0,65	0,0948	2*10 ⁻⁴	-	0,985
	45 cm (24)	0,65	0,0733	2*10 ⁻⁴	-	0,968
El Rosario	15 cm (25)	1,52	-0,0285	7*10 ⁻⁴	-2*10 ⁻⁷	0,962
	45 cm (25)	1,01	0,2263	4*10 ⁻⁴	-9*10 ⁻⁸	0,933

La información generada por los sensores se registró cada 15 minutos y correspondió a valores procesados de humedad volumétrica del suelo (m³ m⁻³), temperatura del suelo (°C) y conductividad eléctrica del suelo (mS cm⁻¹) utilizando una ecuación de ajuste genérica del sensor. De igual manera, se registraron en el mismo tiempo, valores sin procesar de humedad volumétrica del suelo (m³ m⁻³), para ser ajustados a través de las ecuaciones específicas obtenidas para el suelo en el cual se instalaron los sensores y cuyos coeficientes numéricos aparecen condensados en la Tabla 86.

Con el fin de facilitar el manejo de la información, para las variables anteriormente descritas se tomó el valor promedio diario, que correspondió al promedio de 96 datos. El valor de la evapotranspiración real (ET) se determinó a través de eventos concretos, tal como se describió en la etapa de levante.

En las Tablas 87 y 88 se presentan los resultados de la caracterización física y química de los suelos en los cuales se instalaron las sondas de humedad.

Tabla 87. Valores del análisis físico del suelo en el que estaban instaladas las sondas de humedad. Parcelas en etapa de producción.

Estación	Sonda	Densidad aparente (g cm ⁻³)	Ccampo (%vol) 0,33 Bares	Pto marchitez (%vol) 15,00 Bares	Almacenamiento (%vol)
Naranjal	15 cm	0,80	55,40	54,00	1,40
	45 cm	0,90	56,30	53,50	2,80
El Tambo	15 cm	0,70	51,00	43,00	8,10
	45 cm	0,60	58,10	48,60	9,50
El Rosario	15 cm	0,80	53,10	51,10	2,00
	45 cm	0,90	57,30	52,40	4,90

Tabla 88. Valores del análisis químico del suelo en el que estaban instaladas las sondas de humedad. Parcelas en etapa de Producción.

Parámetro	Estación Experimental		
	Naranjal	El Tambo	El Rosario
pH	4,85	4,90	3,90
N (%)	0,26	0,60	0,36
MO (%)	5,90	16,82	8,80
K (cmol kg ⁻¹)	0,14	0,57	0,60
Ca (cmol kg ⁻¹)	0,88	4,42	1,12
Mg (cmol kg ⁻¹)	0,11	1,85	0,82
Na (cmol kg ⁻¹)	0,05	0,06	0,03
Al (cmol kg ⁻¹)	0,85	0,69	7,80
CIC	10,00	nd	28,00
P (mg kg ⁻¹)	10,50	8,00	49,00
Fe (mg kg ⁻¹)	99,50	nd	493,00
Mn (mg kg ⁻¹)	1,50	nd	26,00
Zn (mg kg ⁻¹)	2,05	nd	8,80
Cu (mg kg ⁻¹)	3,40	nd	1,90
B (mg kg ⁻¹)	0,20	nd	0,43

Continúa...

...continuación.

Parámetro	Estación Experimental		
	Naranjal	El Tambo	El Rosario
S (mg kg ⁻¹)	18,55	nd	18,80
Arcilla (%)	26	31	36
Limo (%)	21	32	25
Textura	FARa	FAR	FAR

nd: No determinado

Para determinar el coeficiente de cultivo de la etapa de producción (K_c), se utilizó la Ecuación 13. La determinación del valor de la evapotranspiración de referencia (ET_o) involucró los datos diarios de velocidad del viento, radiación neta, humedad relativa del aire, temperaturas mínimas y máximas, obtenidas de cada estación climática automática instalada en cada una de las estaciones experimentales. Para el cálculo de la ET_o se utilizó el software CROPWAT de la FAO (por medio del método Penman – Monteith) (Allen et al., 2006) (Anexo 4).

Los valores de ET_o se calcularon para los eventos concretos en los cuales se determinó la ET y sus valores, al igual que los datos climáticos que se utilizaron para su cálculo y que se presentan en las Tablas 89 a la 100. En la Tabla 101 se presenta el resumen del coeficiente de cultivo del café de Colombia en la etapa de producción.

Tabla 89. Parámetros del suelo, climáticos y evapotranspiración. Etapa de producción.

Estación Experimental Naranjal. Parcela 1							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm (m ³ m ⁻³) sin corregir	0,428	0,450	0,391	52	0,02	3,91	0,01
Humedad a 15 cm (m ³ m ⁻³) corregida	0,483	0,524	0,423	52	0,03	5,96	0,01
Temperatura a 15 cm (°C)	21,09	22,43	20,30	52	0,42	1,99	0,11
Conductividad a 15 cm (mS cm ⁻¹)	9,65	22,83	0,01	52	10,76	111,45	2,92
Humedad a 45 cm (m ³ m ⁻³) sin corregir	0,42	0,44	0,39	52	0,02	3,90	0,01

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental Naranjal. Parcela 1							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,36	0,39	0,33	52	0,02	4,99	0,01
Temperatura a 45 cm ($^{\circ}C$)	21,20	21,88	20,14	52	0,43	2,04	0,12
Conductividad a 45 cm ($mS cm^{-1}$)	0,018	0,060	0,010	52	0,01	62,88	0,00
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento ($m s^{-1}$)	1,18	1,60	0,60	52	0,19	16,07	0,05
Brillo solar (horas)	6,35	9,90	0,40	52	2,69	42,36	0,73
Radiación ($MJ m^{-2} d^{-1}$)	18,41	24,60	9,40	52	3,99	21,65	1,08
Temperatura mínima ($^{\circ}C$)	16,16	18,40	11,90	52	1,40	8,68	0,38
Temperatura máxima ($^{\circ}C$)	29,88	32,70	25,70	52	1,36	4,55	0,37
Humedad relativa (%)	71,79	84,00	59,00	52	5,49	7,65	1,49
ETo, ET y Kc							
ETo ($mm d^{-1}$)	3,97	5,10	2,36	52	0,70	17,68	0,19
ET ($mm d^{-1}$)	4,25	22,40	1,23	52	2,78	65,46	0,76
Kc	1,08	5,37	0,37	52	0,66	61,43	0,18

Tabla 90. Parámetros del suelo, climáticos y evapotranspiración. Etapa de producción.

Estación Experimental Naranjal. Parcela 2							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,400	0,436	0,354	55	0,02	5,08	0,01
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,438	0,497	0,373	55	0,03	7,05	0,01
Temperatura a 15 cm ($^{\circ}C$)	20,96	22,18	19,92	55	0,52	2,49	0,14

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental Naranjal. Parcela 2							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Conductividad a 15 cm (mS cm ⁻¹)	0,058	0,440	0,010	55	0,08	143,15	0,02
Humedad a 45 cm (m ³ m ⁻³) sin corregir	0,366	0,403	0,317	55	0,02	6,16	0,01
Humedad a 45 cm (m ³ m ⁻³) corregida	0,312	0,346	0,271	55	0,02	6,31	0,01
Temperatura a 45 cm (°C)	20,90	21,71	19,90	55	0,43	2,07	0,11
Conductividad a 45 cm (mS cm ⁻¹)	0,068	0,155	0,010	55	0,05	71,60	0,01
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento (m s ⁻¹)	1,18	1,60	0,60	55	0,19	15,83	0,05
Brillo solar (horas)	6,37	9,90	0,40	55	2,66	41,66	0,70
Radiación (MJ m ² -d ⁻¹)	18,50	24,60	9,40	55	3,96	21,40	1,05
Temperatura mínima (°C)	16,22	18,40	11,90	55	1,40	8,63	0,37
Temperatura máxima (°C)	29,94	32,70	25,70	55	1,36	4,54	0,36
Humedad relativa (%)	71,82	84,00	59,00	55	5,42	7,55	1,43
ET _o , ET y K _c							
ET _o (mm d ⁻¹)	3,99	5,10	2,36	55	0,70	17,64	0,18
ET (mm d ⁻¹)	4,84	9,76	1,38	55	1,52	31,32	0,40
K _c	1,23	2,26	0,41	55	0,38	30,86	0,10

Tabla 91. Parámetros del suelo, climáticos y evapotranspiración. Etapa de producción.

Estación Experimental Naranjal. Parcela 3							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,388	0,440	0,344	54	0,03	7,38	0,01
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,421	0,505	0,361	54	0,04	10,16	0,01
Temperatura a 15 cm ($^{\circ}C$)	20,97	22,06	19,90	54	0,53	2,53	0,14
Conductividad a 15 cm ($mS cm^{-1}$)	0,011	0,050	0,000	54	0,01	82,88	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,453	0,480	0,406	54	0,02	4,28	0,01
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,407	0,445	0,349	54	0,03	6,22	0,01
Temperatura a 45 cm ($^{\circ}C$)	21,44	22,09	20,60	54	0,40	1,88	0,11
Conductividad a 45 cm ($mS cm^{-1}$)	0,018	0,040	0,010	54	0,01	42,66	0,00
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento ($m s^{-1}$)	1,18	1,60	0,60	54	0,19	15,98	0,05
Brillo solar (horas)	6,45	9,90	0,40	54	2,62	40,58	0,70
Radiación ($MJ m^2-d^{-1}$)	18,61	24,60	9,40	54	3,91	21,02	1,04
Temperatura mínima ($^{\circ}C$)	16,22	18,40	11,90	54	1,41	8,71	0,38
Temperatura máxima ($^{\circ}C$)	29,97	32,70	25,70	54	1,34	4,48	0,36
Humedad relativa (%)	71,85	84,00	59,00	54	5,47	7,61	1,46
ETo, ET y Kc							
ETo ($mm d^{-1}$)	4,01	5,10	2,36	54	0,70	17,45	0,19
ET ($mm d^{-1}$)	4,71	7,95	2,09	54	1,42	30,17	0,38
Kc	1,19	2,18	0,59	54	0,35	29,56	0,09

Tabla 92. Parámetros del suelo, climáticos y evapotranspiración. Etapa de producción.

Estación Experimental Naranjal. Promedios parcelas 1, 2 y 3							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm (m ³ m ⁻³) sin corregir	0,405	0,450	0,344	161	0,03	6,89	0,00
Humedad a 15 cm (m ³ m ⁻³) corregida	0,447	0,524	0,361	161	0,04	9,70	0,01
Temperatura a 15 cm (°C)	21,00	22,43	19,90	161	0,50	2,37	0,08
Conductividad a 15 cm (mS cm ⁻¹)	3,141	22,827	0,000	161	7,59	241,65	1,17
Humedad a 45 cm (m ³ m ⁻³) sin corregir	0,413	0,480	0,317	161	0,04	10,00	0,01
Humedad a 45 cm (m ³ m ⁻³) corregida	0,361	0,445	0,271	161	0,04	12,38	0,01
Temperatura a 45 cm (°C)	21,18	22,09	19,90	161	0,48	2,25	0,07
Conductividad a 45 cm (mS cm ⁻¹)	0,035	0,155	0,010	161	0,04	108,70	0,01
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento (m s ⁻¹)	1,18	1,60	0,60	161	0,19	15,96	0,03
Brillo Solar (horas)	6,39	9,90	0,40	161	2,65	41,53	0,41
Radiación (MJ m ² -d ⁻¹)	18,51	24,60	9,40	161	3,95	21,36	0,61
Temperatura mínima (°C)	16,20	18,40	11,90	161	1,41	8,68	0,22
Temperatura máxima (°C)	29,93	32,70	25,70	161	1,35	4,53	0,21
Humedad relativa (%)	71,82	84,00	59,00	161	5,46	7,60	0,84
ETo, ET y Kc							
ETo (mm d ⁻¹)	3,99	5,10	2,36	161	0,70	17,59	10,81
ET (mm d ⁻¹)	4,60	22,40	1,23	161	2,01	43,56	0,31
Kc	1,17	5,37	0,37	161	0,49	41,67	0,08

Tabla 93. Parámetros del suelo, climáticos y evapotranspiración. Etapa de producción.

Estación Experimental El Tambo. Parcela 1							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) sin corregir	0,342	0,448	0,320	120	0,02	5,45	0,00
Humedad a 15 cm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) corregida	0,293	0,400	0,275	120	0,02	5,69	0,00
Temperatura a 15 cm ($^{\circ}\text{C}$)	19,08	26,19	17,54	120	1,36	7,13	0,24
Conductividad a 15 cm (mS cm^{-1})	0,051	0,194	0,030	120	0,04	73,22	0,01
Humedad a 45 cm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) sin corregir	0,364	0,431	0,321	120	0,02	6,20	0,00
Humedad a 45 cm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) corregida	0,290	0,357	0,254	120	0,02	7,02	0,00
Temperatura a 45 cm ($^{\circ}\text{C}$)	19,46	26,44	18,60	120	1,21	6,24	0,22
Conductividad a 45 cm (mS cm^{-1})	0,072	0,154	0,027	120	0,03	46,08	0,01
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento (m s^{-1})	0,88	5,60	0,30	120	0,86	98,08	0,15
Brillo solar (horas)	5,24	10,00	0,40	120	2,41	45,90	0,43
Radiación ($\text{MJ m}^{-2}\text{-d}^{-1}$)	16,78	24,30	9,60	120	3,64	21,71	0,65
Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$)	13,87	19,60	7,70	120	2,11	15,21	0,38
Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)	27,19	31,30	22,60	120	1,54	5,67	0,28
Humedad relativa (%)	78,54	97,00	46,00	120	10,53	13,40	1,88
ETo, ET y Kc							
ETo (mm d^{-1})	3,42	5,93	2,11	120	0,75	21,80	0,13
ET (mm d^{-1})	2,34	16,98	0,22	120	2,96	126,72	0,53
Kc	0,73	4,93	0,06	120	0,90	123,54	0,16

Tabla 94. Parámetros del suelo, climáticos y evapotranspiración. Etapa de producción.

Estación Experimental El Tambo. Parcela 2							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros Suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,341	0,368	0,319	91	0,01	2,70	0,00
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,292	0,314	0,275	91	0,01	2,52	0,00
Temperatura a 15 cm ($^{\circ}C$)	18,82	21,42	17,44	91	0,62	3,30	0,13
Conductividad a 15 cm ($mS cm^{-1}$)	0,070	0,345	0,040	91	0,05	70,61	0,01
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,384	0,432	0,344	91	0,02	5,25	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,308	0,359	0,272	91	0,02	6,28	0,00
Temperatura a 45 cm ($^{\circ}C$)	19,46	20,10	18,81	91	0,32	1,67	0,07
Conductividad a 45 cm ($mS cm^{-1}$)	0,162	0,518	0,076	91	0,08	48,10	0,02
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento ($m s^{-1}$)	0,90	5,60	0,30	91	0,94	103,94	0,19
Brillo Solar (horas)	5,21	10,00	0,70	91	2,47	47,51	0,51
Radiación ($MJ m^2-d^{-1}$)	16,64	24,30	9,60	91	3,74	22,50	0,77
Temperatura Mínima ($^{\circ}C$)	13,78	17,20	8,50	91	1,97	14,30	0,40
Temperatura Máxima ($^{\circ}C$)	27,14	30,30	22,60	91	1,52	5,59	0,31
Humedad Relativa (%)	78,58	97,00	46,00	91	10,66	13,56	2,19
ETo, ET y Kc							
ETo ($mm d^{-1}$)	3,39	5,93	2,11	91	0,77	22,61	0,16
ET ($mm d^{-1}$)	2,01	19,03	0,24	91	2,22	110,56	0,46
Kc	0,65	4,70	0,07	91	0,71	110,15	0,15

Tabla 95. Parámetros del suelo, climáticos y evapotranspiración. Etapa de producción.

Estación Experimental El Tambo. Parcela 3							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm (m ³ m ⁻³) sin corregir	0,366	0,457	0,338	72	0,02	4,89	0,00
Humedad a 15 cm (m ³ m ⁻³) corregida	0,313	0,413	0,290	72	0,02	5,54	0,00
Temperatura a 15 cm (°C)	19,67	25,85	17,97	72	1,37	6,97	0,32
Conductividad a 15 cm (mS cm ⁻¹)	0,067	0,174	0,030	72	0,03	48,61	0,01
Humedad a 45 cm (m ³ m ⁻³) sin corregir	0,350	0,434	0,325	72	0,02	5,59	0,00
Humedad a 45 cm (m ³ m ⁻³) corregida	0,278	0,361	0,258	72	0,02	6,64	0,00
Temperatura a 45 cm (°C)	19,73	24,98	18,81	72	0,91	4,61	0,21
Conductividad a 45 cm (mS cm ⁻¹)	0,184	0,436	0,039	72	0,09	49,89	0,02
Parámetros climáticos	0,84	5,40	0,30	72	0,88	104,46	0,20
Velocidad del viento (m s⁻¹)							
Brillo solar (horas)	4,78	10,00	0,80	72	2,29	47,96	0,53
Radiación (MJ m ² -d ⁻¹)	16,10	23,60	9,80	72	3,47	21,55	0,80
Temperatura mínima (°C)	14,84	19,60	7,70	72	1,80	12,14	0,42
Temperatura máxima (°C)	26,68	30,20	22,60	72	1,46	5,47	0,34
Humedad relativa (%)	85,28	97,00	61,00	72	6,22	7,30	1,44
ET_o, ET y K_c							
ET _o (mm d ⁻¹)	3,22	5,93	2,12	72	0,67	20,74	0,15
ET (mm d ⁻¹)	2,18	9,39	0,43	72	1,80	82,58	0,42
K _c	0,73	4,09	0,11	72	0,65	89,93	0,15

Tabla 96. Parámetros del suelo, climáticos y evapotranspiración. Etapa de producción.

Estación Experimental El Tambo. Promedios Parcelas 1, 2 y 3							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,348	0,457	0,319	283	0,02	5,50	0,00
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,297	0,413	0,275	283	0,02	5,73	0,00
Temperatura a 15 cm ($^{\circ}C$)	19,14	26,19	17,44	283	1,22	6,38	0,14
Conductividad a 15 cm ($mS cm^{-1}$)	0,061	0,345	0,030	283	0,04	68,08	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,367	0,434	0,321	283	0,02	6,76	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,292	0,361	0,254	283	0,02	7,77	0,00
Temperatura a 45 cm ($^{\circ}C$)	19,53	26,44	18,60	283	0,94	4,81	0,11
Conductividad a 45 cm ($mS cm^{-1}$)	0,129	0,518	0,027	283	0,08	65,03	0,01
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento ($m s^{-1}$)	0,88	5,60	0,30	283	0,89	101,67	0,10
Brillo solar (horas)	5,11	10,00	0,40	283	2,41	47,09	0,28
Radiación ($MJ m^{-2} d^{-1}$)	16,56	24,30	9,60	283	3,64	22,00	0,42
Temperatura mínima ($^{\circ}C$)	14,09	19,60	7,70	283	2,04	14,47	0,24
Temperatura máxima ($^{\circ}C$)	27,05	31,30	22,60	283	1,53	5,65	0,18
Humedad relativa (%)	80,27	97,00	46,00	283	10,09	12,58	1,18
ETo, ET y Kc							
ETo ($mm d^{-1}$)	3,36	5,93	2,11	283	0,74	21,97	0,09
ET ($mm d^{-1}$)	2,19	19,03	0,22	283	2,48	113,16	0,29
Kc	0,70	4,93	0,06	283	0,79	112,01	0,09

Tabla 97. Parámetros del suelo, climáticos y evapotranspiración. Etapa de producción.

Estación Experimental El Rosario. Parcela 1							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,321	0,352	0,299	68	0,01	4,27	0,00
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,440	0,475	0,413	68	0,02	3,69	0,00
Temperatura a 15 cm ($^{\circ}C$)	19,72	20,61	18,93	68	0,41	2,06	0,10
Conductividad a 15 cm ($mS cm^{-1}$)	0,016	0,041	0,006	68	0,01	56,83	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,315	0,329	0,288	68	0,01	2,94	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,510	0,520	0,486	68	0,01	1,56	0,00
Temperatura a 45 cm ($^{\circ}C$)	19,97	20,50	19,54	68	0,24	1,20	0,06
Conductividad a 45 cm ($mS cm^{-1}$)	0,013	0,020	0,010	68	0,00	33,53	0,00
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento ($m s^{-1}$)	0,95	1,33	0,29	54	0,28	29,98	0,07
Brillo solar (horas)	7,63	10,60	0,00	68	2,59	33,93	0,62
Radiación ($MJ m^{-2} d^{-1}$)	20,05	24,90	8,90	68	3,76	18,76	0,89
Temperatura mínima ($^{\circ}C$)	16,93	18,55	14,26	68	1,07	6,33	0,25
Temperatura máxima ($^{\circ}C$)	28,49	31,42	22,55	68	1,71	6,01	0,41
Humedad relativa (%)	64,56	77,89	55,52	68	5,34	8,27	1,27
ET_o, ET y K_c							
ET _o ($mm d^{-1}$)	4,10	5,49	1,95	68	0,81	19,82	0,19
ET ($mm d^{-1}$)	1,36	2,65	0,19	68	0,55	40,55	0,13
K _c	0,36	1,12	0,05	68	0,21	58,37	0,05

Tabla 98. Parámetros del suelo, climáticos y evapotranspiración. Etapa de producción.

Estación Experimental El Rosario. Parcela 2							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,317	0,339	0,290	39	0,01	3,91	0,00
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,436	0,464	0,402	39	0,02	3,57	0,01
Temperatura a 15 cm ($^{\circ}C$)	20,380	21,286	19,752	39	0,41	2,03	0,13
Conductividad a 15 cm ($mS cm^{-1}$)	0,039	0,090	0,020	39	0,02	43,46	0,01
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,287	0,362	0,247	39	0,02	8,48	0,01
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,486	0,551	0,452	39	0,02	4,37	0,01
Temperatura a 45 cm ($^{\circ}C$)	20,40	20,82	19,68	39	0,29	1,43	0,09
Conductividad a 45 cm ($mS cm^{-1}$)	0,009	0,028	0,000	39	0,01	78,13	0,00
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento ($m s^{-1}$)	1,03	1,32	0,60	37	0,22	21,16	0,07
Brillo solar (horas)	7,18	10,60	0,00	39	2,67	37,16	0,84
Radiación ($MJ m^2-d^{-1}$)	19,54	24,90	9,40	39	3,94	20,14	1,24
Temperatura mínima ($^{\circ}C$)	16,98	18,84	14,35	39	1,02	6,02	0,32
Temperatura máxima ($^{\circ}C$)	28,70	31,42	22,89	39	1,65	5,74	0,52
Humedad relativa (%)	64,52	77,92	55,52	39	6,18	9,58	1,94
ETo, ET y Kc							
ETo ($mm d^{-1}$)	4,16	5,25	1,95	39	0,83	20,04	0,26
ET ($mm d^{-1}$)	2,64	20,42	0,38	39	4,08	154,83	1,28
Kc	0,66	5,02	0,09	39	1,01	153,93	0,32

Tabla 99. Parámetros del suelo, climáticos y evapotranspiración. Etapa de producción.

Estación Experimental El Rosario. Parcela 3							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,284	0,310	0,226	56	0,02	8,28	0,01
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,393	0,426	0,320	56	0,03	8,02	0,01
Temperatura a 15 cm ($^{\circ}C$)	20,1	20,9	19,4	56	0,37	1,85	0,10
Conductividad a 15 cm ($mS cm^{-1}$)	0,014	0,039	0,010	56	0,01	49,67	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,323	0,469	0,284	56	0,05	15,36	0,01
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,509	0,572	0,483	56	0,02	4,80	0,01
Temperatura a 45 cm ($^{\circ}C$)	20,13	24,83	18,98	56	1,22	6,06	0,32
Conductividad a 45 cm ($mS cm^{-1}$)	0,032	0,174	0,000	56	0,05	150,99	0,01
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento ($m s^{-1}$)	0,88	1,33	0,29	46	0,28	32,12	0,08
Brillo solar (horas)	7,60	10,60	0,00	56	2,65	34,89	0,69
Radiación ($MJ m^{-2} d^{-1}$)	19,98	24,90	8,90	56	3,88	19,43	1,02
Temperatura mínima ($^{\circ}C$)	16,93	18,84	14,26	56	1,10	6,52	0,29
Temperatura máxima ($^{\circ}C$)	28,25	31,34	22,55	56	1,62	5,74	0,42
Humedad relativa (%)	64,96	76,25	55,52	56	5,15	7,92	1,35
ETo, ET y Kc							
ETo ($mm d^{-1}$)	4,06	5,25	1,95	56	0,82	20,16	0,21
ET ($mm d^{-1}$)	1,78	3,13	0,52	56	0,56	31,77	0,15
Kc	0,46	1,00	0,12	56	0,18	39,34	0,05

Tabla 100. Parámetros del suelo, climáticos y evapotranspiración. Etapa de producción.

Estación Experimental El Rosario. Promedio de parcelas 1, 2 y 3							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,307	0,352	0,226	163	0,02	7,88	0,00
Humedad a 15 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,423	0,475	0,320	163	0,03	7,42	0,00
Temperatura a 15 cm ($^{\circ}C$)	20,01	21,29	18,93	163	0,48	2,39	0,07
Conductividad a 15 cm ($mS cm^{-1}$)	0,020	0,090	0,006	163	0,01	72,64	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) sin corregir	0,311	0,469	0,247	163	0,03	11,19	0,00
Humedad a 45 cm ($m^3 m^{-3}$) corregida	0,504	0,572	0,452	163	0,02	4,16	0,00
Temperatura a 45 cm ($^{\circ}C$)	20,13	24,83	18,98	163	0,76	3,80	0,12
Conductividad a 45 cm ($mS cm^{-1}$)	0,019	0,174	0,000	163	0,03	163,30	0,00
Parámetros climáticos							
Velocidad del viento ($m s^{-1}$)	0,95	1,33	0,29	137	0,27	28,87	0,05
Brillo solar (horas)	7,51	10,60	0,00	163	2,64	35,09	0,41
Radiación ($MJ m^{-2} d^{-1}$)	19,90	24,90	8,90	163	3,85	19,35	0,59
Temperatura mínima ($^{\circ}C$)	16,94	18,84	14,26	163	1,07	6,32	0,16
Temperatura máxima ($^{\circ}C$)	28,46	31,42	22,55	163	1,67	5,88	0,26
Humedad relativa (%)	64,69	77,92	55,52	163	5,49	8,49	0,84
ETo, ET y Kc							
ETo ($mm d^{-1}$)	4,10	5,49	1,95	163	0,82	20,01	0,13
ET ($mm d^{-1}$)	1,81	20,42	0,19	163	2,11	116,77	0,32
Kc	0,47	5,02	0,05	163	0,54	115,53	0,08

Tabla 101. Coeficiente de cultivo del café de Colombia en la etapa de producción.

Parcela	Parámetro Estadístico	Estación Experimental		
		Naranjal	El Rosario	El Tambo
Producción_1	Promedio	1,08	0,36	0,73
	Máximo	5,37	1,12	4,93
	Mínimo	0,37	0,05	0,06
	Datos	52	68	120
	DE	0,66	0,21	0,90
	CV	61,43	58,37	123,54
	IC	0,18	0,05	0,16
Producción_2	Promedio	1,23	0,66	0,65
	Máximo	2,26	5,02	4,70
	Mínimo	0,41	0,09	0,07
	Datos	55	39	91
	DE	0,38	1,01	0,71
	CV	30,86	153,93	110,15
	IC	0,10	0,32	0,15
Producción_3	Promedio	1,19	0,46	0,73
	Máximo	2,18	1,00	4,09
	Mínimo	0,59	0,12	0,11
	Datos	54	56	72
	DE	0,35	0,18	0,65
	CV	29,56	39,34	89,93
	IC	0,09	0,05	0,15

Continúa...

...continuación.

Parcela	Parámetro Estadístico	Estación Experimental		
		Naranjal	El Rosario	El Tambo
Tres parcelas	Promedio	1,17	0,47	0,70
	Máximo	5,37	5,02	4,93
	Mínimo	0,37	0,05	0,06
	Datos	161	163	283
	DE	0,49	0,54	0,79
	CV	41,67	115,53	112,01
	IC	0,08	0,08	0,09
Etap Producción en las tres estaciones	Promedio	0,76		
	Máximo	5,37		
	Mínimo	0,05		
	Datos	607		
	DE	0,71		
	CV	92,58		
	IC	0,06		

Como se observa en la Tabla 101, el Kc promedio de 607 datos, para la etapa de producción del cultivo de café de Colombia fue de $0,76 \pm 0,06$. En estudios realizados en Colombia por Castaño y García (2018), utilizando el sistema Eddy Covariance en un cultivo de café variedad Castillo® Paraguaicito con una densidad de siembra de 7.143 árboles/ha a plena exposición solar, los autores reportan un valor de Kc de $0,88 \pm 0,02$ para la etapa de producción.

Para el cálculo de la HH verde se utilizó la siguiente expresión (Ecuación <26>):

$$\text{Huella Hídrica verde}_{\text{Producción}} \left(\frac{L}{m^2} \right) = ET \left(\frac{mm}{d} \right) \times \text{tiempo (d)} \quad \text{<26>}$$

En la Tabla 102 se presentan los resultados de la HHv y los valores utilizados para su determinación para las tres parcelas evaluadas, en las tres estaciones experimentales y sus valores promedio.

Tabla 102. Resultados de la HHv y valores utilizados en su determinación en la etapa de producción.

Parcela	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	ET (mm d ⁻¹)	Tiempo (d)	HHv (L m ⁻²)	ET (mm d ⁻¹)	Tiempo (d)	HHv (L m ⁻²)	ET (mm d ⁻¹)	Tiempo (d)	HHv (L m ⁻²)
1	4,25	733	3.115,25	2,34	744	1.740,96	1,36	730	992,80
2	4,84	733	3.547,72	2,01	744	1.495,44	2,64	730	1.927,20
3	4,71	733	3.452,43	2,18	744	1.621,92	1,78	730	1.299,40
Promedio Estación	4,60	733	3.371,80	2,19	744	1.629,36	1,81	730	1.321,30
Promedio General Etapa Producción (L m⁻²)						2.107,49			

Determinación de la Huella Hídrica Gris

La HH gris se estimó en función de los volúmenes de agua recolectados por escorrentía y por infiltración, considerando las características de calidad en el agua recolectada. Adicionalmente, se tuvo en cuenta la concentración de cada uno de los parámetros evaluados que superara los valores de calidad condensados en la Tabla 5. La HH gris es aquella equivalente a la del parámetro, de los seleccionados por superar los valores de calidad establecidos, que genere el mayor valor, aplicando la **Ecuación <27>**.

$$\text{HH gris Producción} = \frac{V_e * C_e}{C_{m\acute{a}x}} + \frac{V_i * C_i}{C_{m\acute{a}x}} - \frac{V_a * C_a}{C_{m\acute{a}x}} \quad \text{<27>}$$

Donde:

HH gris Producción = Huella Hídrica Gris en la Etapa de Producción en L m⁻².

Ve = Volumen recolectado por escorrentía (L).

Vi = Volumen recolectado por infiltración (L).

Va = Volumen de agua lluvia de ingreso.

Ce = Concentración del parámetro en el agua de escorrentía que excede los límites de calidad (g L^{-1}).

Ci = Concentración del parámetro en el agua de infiltración que excede los límites de calidad (g L^{-1}).

Ca = Concentración del parámetro de interés en el agua de lluvia (g L^{-1}).

$C_{\text{máx}}$ = Concentración del parámetro según los límites de calidad (g L^{-1}).

En la Tabla 103 se presentan los volúmenes de agua de escorrentía recolectados en cada una de las parcelas en producción, en las tres estaciones experimentales y su valor promedio.

En la Tabla 104 se presentan los volúmenes de agua de infiltración estimados en cada una de las parcelas en producción, en las tres estaciones experimentales y su valor promedio.

En las Tablas 105 a 112 se presentan los resultados de la caracterización del agua de escorrentía y del agua de infiltración medida a 45 cm de profundidad, en cada una de las parcelas experimentales y su valor promedio.

Tabla 103. Volúmenes de agua de escorrentía recolectados en las parcelas experimentales. Etapa de producción.

Parcela	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	Precipitación: 6.899,60 mm			Precipitación: 4.924,95 mm			Precipitación: 2.863,03 mm		
	Eventos	(L m ⁻²)	(L)	Eventos	(L m ⁻²)	(L)	Eventos	(L m ⁻²)	(L)
1	117	317,43	2.856,88	99	145,55	1.309,95	105	215,55	1.939,96
2	116	305,31	2.747,78	93	161,12	1.450,09	103	193,03	1.737,29
3	118	302,51	2.722,61	74	110,12	991,12	101	213,92	1.925,26
Prom.	117	308,42	2.775,76	89	138,93	1.250,39	103	207,50	1.867,50
	Porcentaje de la lluvia		4,47	Porcentaje de la lluvia		2,82	Porcentaje de la lluvia		7,25

Tabla 104. Volúmenes de agua de infiltración estimados a 60 cm de profundidad del perfil del suelo. Parcelas experimentales. Etapa de producción.

Lote	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	Eventos	(L m ⁻²)	(L)	Eventos	(L m ⁻²)	(L)	Eventos	(L m ⁻²)	(L)
1	0	0	0	0	0	0	115	34,82	313,34
2	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
3	0	0	0	0	0	0	134	37,32	335,87
Prom.	0	0	0	0	0	0	83	24,04	216,40

Tabla 105. Caracterización de los drenados por escorrentía. Etapa de producción.

Estación Experimental Naranjal										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Producción 1										
Promedio	5,18	263	55	171	100	313	0,91	5,78	54,80	11,94
Máximo	6,56	397	168	256	194	1260	2,79	12,90	91,50	23,20
Mínimo	3,32	146	10	64	28	116	0,26	1,40	11,20	2,80
Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	7	7
DE	0,75	56,13	35,95	58,67	43,01	273,76	0,66	3,49	33,97	7,18
CV	0,14	0,21	0,65	0,34	0,43	0,88	0,72	0,60	0,62	0,60
IC	0,32	24,01	15,38	25,09	18,39	117,09	0,28	1,49	25,16	5,32
Producción 2										
Promedio	4,68	285	57	157	94	232	1,41	6,13	68,29	11,84
Máximo	6,55	385	262	250	248	511	3,89	17,90	158,20	17,20
Mínimo	3,36	134	11	61	4	95	0,29	1,30	18,20	8,40
Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	7	7

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental Naranjal										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
DE	0,78	65,51	55,86	60,02	53,99	114,59	0,93	4,01	60,91	2,71
CV	0,17	0,23	0,98	0,38	0,58	0,49	0,66	0,65	0,89	0,23
IC	0,34	28,02	23,89	25,67	23,09	49,01	0,40	1,72	45,12	2,01
Producción 3										
Promedio	4,76	238	72	186	113	279	1,34	9,39	84,00	12,03
Máximo	6,98	365	282	330	306	735	3,89	12,30	152,40	24,30
Mínimo	3,65	65	13	80	10	148	0,44	4,30	28,70	7,10
Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	7	7
DE	0,79	95,18	71,85	54,45	62,21	147,03	0,97	2,33	57,72	5,99
CV	0,17	0,40	1,00	0,29	0,55	0,53	0,72	0,25	0,69	0,50
IC	0,34	40,71	30,73	23,29	26,61	62,89	0,42	1,00	42,76	4,43
Promedio										
Promedio	4,87	262	61	171	102	274	1,22	7,10	69,03	11,94
Máximo	6,98	397	282	330	306	1.260	3,89	17,90	158,20	24,30
Mínimo	3,32	65	10	61	4	95	0,26	1,30	11,20	2,80
Datos	63	63	63	63	63	63	63	63	21	21
DE	0,79	75,51	56,08	58,07	53,43	191,06	0,88	3,68	51,07	5,33
CV	0,16	0,29	0,91	0,34	0,52	0,70	0,72	0,52	0,74	0,45
IC	0,20	18,65	13,85	14,34	13,19	47,18	0,22	0,91	21,84	2,28

Tabla 106. Caracterización de los drenados e infiltración. Etapa de producción.

Estación Experimental Naranjal										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Producción 1										
Promedio	5,79	195	2	81	7	82	0,89	3,47	38,93	10,73
Máximo	6,63	239	7	161	24	136	3,46	13,90	49,00	23,70
Mínimo	4,25	134	0	40	2	44	0,20	1,10	26,20	2,80
Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	7	7
DE	0,51	27,70	1,77	35,97	5,93	27,95	0,75	3,16	9,07	8,12
CV	0,09	0,14	0,91	0,44	0,87	0,34	0,84	0,91	0,23	0,76
IC	0,22	11,85	0,76	15,39	2,54	11,95	0,32	1,35	6,72	6,02
Producción 2										
Promedio	5,19	257	2	69	9	91	1,30	5,40	50,04	15,07
Máximo	6,89	315	4	125	32	136	4,37	18,70	120,30	23,20
Mínimo	4,01	148	0	37	2	31	0,22	1,10	18,20	8,40
Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	7	7
DE	0,93	51,04	0,81	24,46	7,86	27,52	1,15	4,73	38,77	5,58
CV	0,18	0,20	0,42	0,35	0,91	0,30	0,89	0,87	0,77	0,37
IC	0,40	21,83	0,35	10,46	3,36	11,77	0,49	2,02	28,72	4,13
Producción 3										
Promedio	5,48	231	2	81	14	99	1,10	3,68	37,37	11,11
Máximo	6,38	270	4	187	79	234	3,18	10,20	58,70	15,10
Mínimo	4,21	89	0	35	2	4	0,29	1,20	15,40	4,20
Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	7	7
DE	0,58	37,93	1,02	39,39	21,63	57,61	0,80	2,55	14,86	3,51
CV	0,11	0,16	0,64	0,49	1,59	0,58	0,73	0,69	0,40	0,32

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental Naranjal										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
IC	0,25	16,22	0,44	16,85	9,25	24,64	0,34	1,09	11,01	2,60
Promedio										
Promedio	5,49	228	2	77	10	91	1,10	4,18	42,11	12,30
Máximo	6,89	315	7	187	79	234	4,37	18,70	120,30	23,70
Mínimo	4,01	89	0	35	2	4	0,20	1,10	15,40	2,80
Datos	63	63	63	63	63	63	63	63	21	21
DE	0,73	46,96	1,26	33,81	13,81	40,20	0,92	3,64	23,99	6,07
CV	0,13	0,21	0,69	0,44	1,42	0,44	0,84	0,87	0,57	0,49
IC	0,18	11,60	0,31	8,35	3,41	9,93	0,23	0,90	10,26	2,60

Tabla 107. Caracterización de los drenados por escorrentía. Etapa de producción.

Estación Experimental El Tambo										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Producción 1										
Promedio	6,50	214	34	210	72	167	1,27	7,61	64,07	7,08
Máximo	7,60	267	78	450	148	287	2,26	17,90	87,40	11,60
Mínimo	5,41	154	8	95	16	50	0,43	3,10	47,10	4,80
Datos	19	19	19	19	19	19	19	19	6	6
DE	0,56	29,49	21,21	81,06	43,99	67,72	0,61	3,55	15,41	2,49
CV	0,09	0,14	0,63	0,39	0,61	0,41	0,48	0,47	0,24	0,35
IC	0,25	13,26	9,54	36,45	19,78	30,45	0,28	1,59	12,33	1,99

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental El Tambo										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Producción 2										
Promedio	6,70	198	27	183	68	184	1,82	6,86	78,30	8,52
Máximo	8,75	285	65	254	156	492	4,64	17,10	96,10	12,50
Mínimo	5,42	91	6	96	20	93	0,55	2,70	60,10	5,80
Datos	19	19	19	19	19	19	19	19	6	6
DE	0,93	49,05	18,63	38,82	37,49	96,42	1,34	3,66	15,20	2,97
CV	0,14	0,25	0,68	0,21	0,55	0,53	0,74	0,53	0,19	0,35
IC	0,42	22,05	8,38	17,45	16,86	43,35	0,60	1,65	12,16	2,37
Producción 3										
Promedio	5,95	182	26	146	72	171	1,19	5,98	74,27	9,87
Máximo	7,08	232	77	252	176	409	1,88	22,90	115,30	23,60
Mínimo	4,55	105	3	59	18	41	0,41	1,60	40,30	3,20
Datos	19	19	19	19	19	19	19	19	6	6
DE	0,74	39,38	24,18	65,60	49,00	94,32	0,42	4,91	27,82	7,26
CV	0,13	0,22	0,94	0,45	0,68	0,55	0,35	0,82	0,37	0,74
IC	0,33	17,71	10,87	29,50	22,03	42,41	0,19	2,21	22,26	5,81
Promedio										
Promedio	6,39	198	29	180	70	174	1,43	6,82	72,21	8,49
Máximo	8,75	285	78	450	176	492	4,64	22,90	115,30	23,60
Mínimo	4,55	91	3	59	16	41	0,41	1,60	40,30	3,20
Datos	57	57	57	57	57	57	57	57	18	18
DE	0,81	41,57	21,35	68,48	43,00	85,85	0,92	4,07	20,08	4,61
CV	0,13	0,21	0,74	0,38	0,61	0,49	0,64	0,60	0,28	0,54
IC	0,21	10,79	5,54	17,78	11,16	22,29	0,24	1,06	9,28	2,13

Tabla 108. Caracterización de los drenados por infiltración. Etapa de producción.

Estación Experimental El Tambo										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Producción 1										
Promedio	6,18	204	9	98	39	104	0,70	6,02	50,48	5,75
Máximo	6,93	247	35	176	102	228	1,24	12,10	60,10	7,20
Mínimo	5,82	133	2	49	9	56	0,37	1,90	43,20	4,90
Datos	19	19	19	19	19	19	19	19	6	6
DE	0,29	33,42	7,19	41,96	27,14	51,92	0,26	3,09	5,49	0,85
CV	0,05	0,16	0,80	0,43	0,70	0,50	0,37	0,51	0,11	0,15
IC	0,13	15,03	3,23	18,87	12,20	23,34	0,12	1,39	4,39	0,68
Producción 2										
Promedio	6,40	189	6	95	38	89	0,74	4,34	54,32	5,98
Máximo	7,28	247	17	177	101	214	1,53	10,20	83,10	8,30
Mínimo	5,14	118	2	48	6	47	0,22	1,90	39,10	4,10
Datos	19	19	19	19	19	19	19	19	6	6
DE	0,51	33,06	3,61	43,20	26,46	44,22	0,33	2,86	17,20	1,47
CV	0,08	0,18	0,61	0,45	0,70	0,50	0,45	0,66	0,32	0,25
IC	0,23	14,87	1,62	19,43	11,90	19,88	0,15	1,29	13,77	1,18
Producción 3										
Promedio	6,07	182	6	111	29	98	0,73	6,15	47,02	5,53
Máximo	6,99	231	27	228	91	193	1,33	14,40	60,20	8,10
Mínimo	4,15	130	2	59	8	45	0,38	2,00	40,10	3,90
Datos	19	19	19	19	19	19	19	19	6	6
DE	0,67	25,72	5,77	51,21	21,36	33,94	0,26	4,29	7,84	1,45
CV	0,11	0,14	0,90	0,46	0,73	0,35	0,36	0,70	0,17	0,26

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental El Tambo										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
IC	0,30	11,56	2,59	23,03	9,61	15,26	0,12	1,93	6,27	1,16
Promedio										
Promedio	6,22	191	7	101	35	97	0,72	5,50	50,61	5,76
Máximo	7,28	247	35	228	102	228	1,53	14,40	83,10	8,30
Mínimo	4,15	118	2	48	6	45	0,22	1,90	39,10	3,90
Datos	57	57	57	57	57	57	57	57	18	18
DE	0,52	31,67	5,78	45,37	25,04	43,62	0,28	3,51	11,11	1,22
CV	0,08	0,17	0,82	0,45	0,71	0,45	0,39	0,64	0,22	0,21
IC	0,14	8,22	1,50	11,78	6,50	11,32	0,07	0,91	5,13	0,57

Tabla 109. Caracterización de los drenados por escorrentía. Etapa de producción.

Estación Experimental El Rosario										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Producción 1										
Promedio	6,12	195	121	221	99	317	2,49	9,68	62,42	8,42
Máximo	6,51	248	881	678	292	1.043	5,82	16,60	83,20	9,80
Mínimo	5,53	61	11	62	36	174	0,70	4,20	26,60	6,90
Datos	18	18	18	18	18	18	18	18	6	6
DE	0,23	53,55	199,99	166,14	62,87	195,80	1,25	3,98	21,50	1,19
CV	0,04	0,28	1,66	0,75	0,64	0,62	0,50	0,41	0,34	0,14
IC	0,11	24,74	92,39	76,75	29,05	90,45	0,58	1,84	17,20	0,95
Producción 2										
Promedio	6,11	159	72	190	99	286	2,57	8,30	86,73	9,78

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental El Rosario										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Máximo	6,65	277	212	422	196	688	4,96	15,20	112,30	18,30
Mínimo	5,64	30	22	64	32	108	0,82	2,10	60,10	5,60
Datos	18	18	18	18	18	18	18	18	6	6
DE	0,27	70,48	49,15	108,70	54,76	137,29	1,24	3,75	18,82	4,67
CV	0,04	0,44	0,68	0,57	0,55	0,48	0,48	0,45	0,22	0,48
IC	0,12	32,56	22,70	50,22	25,30	63,42	0,57	1,73	15,05	3,74
Producción 3										
Promedio	5,97	133	74	176	80	231	2,52	8,06	74,38	9,38
Máximo	6,61	261	173	322	176	372	5,21	18,00	112,10	20,20
Mínimo	4,98	4	8	57	36	160	0,41	2,10	54,90	5,90
Datos	18	18	18	18	18	18	18	18	6	6
DE	0,49	77,48	49,36	89,73	41,79	56,35	1,30	4,81	22,39	5,49
CV	0,08	0,58	0,66	0,51	0,52	0,24	0,51	0,60	0,30	0,58
IC	0,23	35,79	22,80	41,45	19,30	26,03	0,60	2,22	17,92	4,39
Promedio										
Promedio	6,06	162	89	196	93	278	2,52	8,68	74,51	9,19
Máximo	6,65	277	881	678	292	1.043	5,82	18,00	112,30	20,20
Mínimo	4,98	4	8	57	32	108	0,41	2,10	26,60	5,60
Datos	54	54	54	54	54	54	54	54	18	18
DE	0,35	71,31	122,06	124,88	53,62	143,73	1,24	4,19	22,18	4,00
CV	0,06	0,44	1,37	0,64	0,58	0,52	0,49	0,48	0,30	0,44
IC	0,09	19,02	32,56	33,31	14,30	38,33	0,33	1,12	10,25	1,85

Tabla 110. Caracterización de los drenados por infiltración. Etapa de producción.

Estación Experimental El Rosario										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Producción 1										
Promedio	5,74	191	8	73	30	106	0,92	3,74	42,08	4,90
Máximo	7,08	295	34	232	70	282	2,27	8,70	55,70	6,70
Mínimo	4,11	131	2	22	2	44	0,28	1,20	29,70	3,80
Datos	18	18	18	18	18	18	18	17	6	5
DE	0,73	37,62	7,63	60,54	24,88	62,16	0,65	1,99	10,34	1,28
CV	0,13	0,20	0,93	0,83	0,84	0,58	0,70	0,53	0,25	0,26
IC	0,34	17,38	3,52	27,97	11,49	28,72	0,30	0,95	8,27	1,12
Producción 2										
Promedio	5,98	212	3	51	20	86	0,89	3,48	55,75	5,00
Máximo	7,24	328	7	82	44	121	2,50	7,60	89,40	6,20
Mínimo	4,75	144	0	24	4	56	0,18	1,10	38,90	3,10
Datos	18	18	18	18	18	18	18	18	6	6
DE	0,68	62,62	2,07	18,88	12,56	17,04	0,66	2,00	21,50	1,31
CV	0,11	0,30	0,69	0,37	0,64	0,20	0,74	0,57	0,39	0,26
IC	0,31	28,93	0,95	8,72	5,80	7,87	0,30	0,92	17,21	1,05
Producción 3										
Promedio	5,64	216	6	73	24	80	1,31	6,33	61,57	5,58
Máximo	6,95	314	32	196	70	141	2,45	11,20	80,30	8,10
Mínimo	3,89	162	0	22	2	44	0,35	1,90	38,50	4,20
Datos	18	18	18	18	18	18	18	18	6	6
DE	0,87	44,45	8,37	51,10	19,85	26,80	0,68	2,66	18,24	1,42
CV	0,15	0,21	1,41	0,70	0,83	0,34	0,52	0,42	0,30	0,25

Continúa...

...continuación.

Estación Experimental El Rosario										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
IC	0,40	20,54	3,87	23,60	9,17	12,38	0,31	1,23	14,60	1,14
Promedio										
Promedio	5,79	206	6	66	24	91	1,04	4,53	53,13	5,18
Máximo	7,24	328	34	232	70	282	2,50	11,20	89,40	8,10
Mínimo	3,89	131	0	22	2	44	0,18	1,10	29,70	3,10
Datos	54	54	54	54	54	54	54	53	18	17
DE	0,76	49,68	6,86	47,22	19,81	41,17	0,68	2,56	18,33	1,29
CV	0,13	0,24	1,20	0,72	0,81	0,45	0,65	0,56	0,34	0,25
IC	0,20	13,25	1,83	12,60	5,28	10,98	0,18	0,69	8,47	0,62

Tabla 111. Caracterización de los drenados por escorrentía de la etapa de producción.

Promedio tres estaciones										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N _T (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Promedio	5,74	210	59	182	89	243	1,69	7,50	71,76	9,98
Máximo	8,75	397	881	678	306	1.260	5,82	22,90	158,20	24,30
Mínimo	3,32	4	3	57	4	41	0,26	1,30	11,20	2,80
Datos	174	174	174	174	174	174	174	174	57	57
DE	0,96	76,86	80,12	87,20	51,80	155,26	1,16	4,03	34,76	4,88
CV	0,17	0,37	1,35	0,48	0,58	0,64	0,68	0,54	0,48	0,49
IC	0,14	11,42	11,90	12,96	7,70	23,07	0,17	0,60	9,03	1,27

Tabla 112. Caracterización de los drenados por infiltración de la etapa de producción.

Promedio tres estaciones										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (ppm)	SST (ppm)	ST (ppm)	P-PO ₄ (ppm)	N-NO ₃ (ppm)	N _T (ppm)	N-NH ₃ (ppm)
Promedio	5,82	209	5	81	23	93	0,96	4,73	48,28	8,04
Máximo	7,28	328	35	232	102	282	4,37	18,70	120,30	23,70
Mínimo	3,89	89	0	22	2	4	0,18	1,10	15,40	2,80
Datos	174	174	174	174	174	174	174	173	57	56
DE	0,74	45,83	5,57	44,43	22,49	41,50	0,70	3,33	19,20	5,05
CV	0,13	0,22	1,17	0,55	0,99	0,45	0,74	0,70	0,40	0,63
IC	0,11	6,81	0,83	6,60	3,34	6,17	0,10	0,50	4,98	1,32

En la Tabla 113 se presentan los valores de los parámetros que excedieron la concentración límite en las caracterizaciones de las aguas de escorrentía en la etapa de producción.

En la Tabla 114 se presentan los resultados de la huella hídrica gris por escorrentía, para los tres parámetros que excedieron la concentración límite: DQO, SST y N-NH₃.

Tabla 113. Valores de los parámetros que excedieron las concentraciones límite en las caracterizaciones de las aguas de escorrentía. Etapa de producción.

Parcela	Estación Experimental			
	Naranjal			
	Vol. (L)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
1	2.856,88	171	-	11,94
2	2.747,78	157	-	11,84
3	2.722,61	186	113	12,03

Continúa...

...continuación.

Prom Est.	2.775,76	171	-	11,94
Parcela	Estación Experimental			
	El Tambo			
	Vol. (L)	DQO (mg L⁻¹)	SST (mg L⁻¹)	N-NH₃ (mg L⁻¹)
1	1.309,95	210	-	7,08
2	1.450,09	183	-	8,52
3	991,12	146	-	9,87
Prom Est.	1.250,39	180	-	8,49
Parcela	Estación Experimental			
	El Rosario			
	Vol. (L)	DQO (mg L⁻¹)	SST (mg L⁻¹)	N-NH₃ (mg L⁻¹)
1	1.939,96	221	-	8,42
2	1.737,29	190	-	9,78
3	1.925,26	176	-	9,38
Prom Est.	1.867,50	196	-	9,19

Tabla 114. Resultados de la HHg por escorrentía para los parámetros que excedieron las concentraciones límite en la etapa de producción.

Parcela	Estación Experimental		
	Naranjal		
	DQO (mg L⁻¹)	SST (mg L⁻¹)	N-NH₃ (mg L⁻¹)
1	2.171,23	-	1.895,06
2	1.917,34	-	1.807,43
3	2.250,69	341,84	1.819,61

Continúa...

...continuación.

Prom Est.	2.109,58	-	1.841,25
Parcela	Estación Experimental		
	El Tambo		
	DQO (mg L⁻¹)	SST (mg L⁻¹)	N-NH₃ (mg L⁻¹)
1	1.222,62		515,25
2	1.179,41		686,38
3	643,13		543,46
Prom Est.	1.000,31		589,77
Parcela	Estación Experimental		
	El Rosario		
	DQO (mg L⁻¹)	SST (mg L⁻¹)	N-NH₃ (mg L⁻¹)
1	1.905,47		907,47
2	1.467,04		943,93
3	1.505,98		1.003,27
Prom Est.	1.626,80		953,46

A continuación, se presentan los cálculos realizados para encontrar la Huella Hídrica Gris, por

$$\text{HH Gris levante Naranjal} = \frac{2.775,76 \left(\frac{\text{L}}{\text{Parcela}} \right) * 0,171 \text{ (g L}^{-1}\text{)}}{0,025 \text{ (g L}^{-1}\text{)}} = \frac{475,66512}{9 \text{ m}^2} = \mathbf{2.109,58 \text{ L m}^{-2}}$$

$$\text{HH Gris levante El Tambo} = \frac{1.250,39 \left(\frac{\text{L}}{\text{Parcela}} \right) * 0,180 \text{ (g L}^{-1}\text{)}}{0,025 \text{ (g L}^{-1}\text{)}} = \frac{225,0702}{9 \text{ m}^2} = \mathbf{1.000,31 \text{ L m}^{-2}}$$

$$\text{HH Gris levante El Rosario} = \frac{1.867,50 \left(\frac{\text{L}}{\text{Parcela}} \right) * 0,196 \text{ (g L}^{-1}\text{)}}{0,025 \text{ (g L}^{-1}\text{)}} = \frac{366,015}{9 \text{ m}^2} = \mathbf{1.626,80 \text{ L m}^{-2}}$$

escorrentía, en la etapa de producción en las tres estaciones, con base en el parámetro que generó los valores más altos.

En la Tabla 115 se presentan los resultados de la huella hídrica gris por escorrentía para las tres estaciones experimentales.

Tabla 115. Valores de la huella hídrica gris por escorrentía. Parcelas de producción.

Estación	Naranjal	El Tambo	El Rosario	Promedio
HHg (L m ⁻²)	2.109,58	1.000,31	1.626,80	1.578,90

Para el caso del agua infiltrada a más de 45 cm del perfil del suelo, sólo se presentaron drenados para la Estación Experimental El Rosario.

En la Tabla 116 se presentan los valores de los parámetros que excedieron la concentración límite en las caracterizaciones de las aguas de infiltración en la etapa de producción y el valor de la HH gris.

Tabla 116. Valores de la huella hídrica gris por infiltración. Etapa de producción.

Estación Experimental El Rosario						
Parcela	Volumen (L)	DQO (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)	HHg/DQO (L m ⁻²)	HHg/N-NH ₃ (L m ⁻²)	HHg (L m ⁻²)
1	313,34	73	4,90	101,66	85,30	101,66
2	-	51	5,00	-	-	-
3	335,87	73	5,58	108,97	104,12	108,97
Promedio	216,40	66	5,18	63,48	62,28	63,48

En la Tabla 117 se presentan los resultados de la huella hídrica gris total (HHg por escorrentía + HHg por infiltración) para las tres estaciones experimentales.

Tabla 117. Valores de la huella hídrica gris por escorrentía e infiltración. Parcelas de producción.

Estación	Naranjal	El Tambo	El Rosario	Promedio
HHg (L m ⁻²)	2.109,58	1.000,31	1.690,28	1.600,06

En la Tabla 118 se presentan los resultados de la caracterización del agua de lluvia en las tres estaciones experimentales.

Tabla 118. Caracterización del agua de lluvia de ingreso a las parcelas de producción.

Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ (mg L ⁻¹)
Estación Experimental Naranjal							
Promedio	6,14	2,61	17	11	0,47	2,03	0,46
Máximo	7,26	4,52	30	21	0,88	3,50	0,67
Mínimo	5,05	1,18	4	6	0,15	0,50	0,18
Datos	24	24	24	24	24	24	24
DE	0,72	0,91	9,35	3,74	0,23	0,86	0,14
CV	11,79	34,70	56,08	33,38	50,37	42,58	31,15
IC	0,29	0,36	3,74	1,50	0,09	0,35	0,06
Estación Experimental El Tambo							
Promedio	6,34	3,12	16	7	0,52	1,82	0,45
Máximo	7,80	5,09	28	26	0,87	3,30	0,69
Mínimo	4,93	1,25	2	4	0,14	0,50	0,13
Datos	24	24	24	24	24	24	24
DE	1,01	1,09	8,45	4,68	0,25	0,94	0,18
CV	15,96	34,81	53,95	63,45	47,72	51,80	39,48
IC	0,40	0,43	3,38	1,87	0,10	0,38	0,07
Estación Experimental El Rosario							
Promedio	6,32	3,67	18	14	0,53	2,13	0,35
Máximo	7,41	5,19	27	25	0,89	3,50	0,69
Mínimo	5,05	1,50	4	5	0,13	0,50	0,12
Datos	24	24	24	24	24	24	24
DE	0,70	0,95	7,06	4,81	0,23	0,75	0,18
CV	11,08	25,85	39,11	35,17	43,69	35,29	51,31
IC	0,28	0,38	2,82	1,92	0,09	0,30	0,07

En la Tabla 119 se presenta la lluvia efectiva que llegó a las parcelas de Producción. Para su cálculo se tuvo en cuenta las expresiones reportadas por Ramírez y Jaramillo (2007) y Jaramillo y Cháves (1999), relacionadas en las Ecuaciones <28>, <29> y <30>.

$$\text{Si lluvia} > 6,0 \text{ mm}; L_{le} = \frac{69,13}{1 + 12,45 \exp(-0,040 \times LL)} \quad \text{<28>}$$

$$\text{Si lluvia} \leq 6,0 \text{ mm}, L_{le} = 0; \quad \text{<28>}$$

$$\text{Si lluvia} > 44 \text{ mm}, L_{le} = \text{lluvia} \quad \text{<30>}$$

Tabla 119. Volumen y DQO de las entradas de agua en las parcelas de producción.

Variable	Estación Experimental		
	Naranjal	El Tambo	El Rosario
Precipitación (mm)	6.899,60	4.924,95	2.863,03
Precipitación (L)	62.096,40	44.324,55	25.767,27
Lluvia efectiva (%)	59,33	55,53	50,10
Lluvia efectiva (L)	36.841,79	24.613,42	12.909,40
DQO en la lluvia (mg L ⁻¹)	11	7	14
Carga másica de ingreso (g DQO)	405,26	172,29	180,73
HHg de la carga másica de ingreso (L)	16.210,39	6.891,76	7.229,27
HHg de la carga másica de ingreso (L m⁻²)	1.801,15	765,75	803,25

En la Tabla 120 se presentan los resultados de la huella hídrica gris total (HHg por escorrentía + HHg por infiltración – HHg del agua de lluvia de ingreso), para las tres estaciones experimentales.

Tabla 120. Valores de la huella hídrica gris total. Parcelas de producción.

Estación	Naranjal	El Tambo	El Rosario	Promedio
HHg (escorrentía +Infiltración) (L m ⁻²)	2.109,58	1.000,31	1.690,28	1.600,06
HHg (agua de lluvia de ingreso) (L m ⁻²)	1.801,15	765,75	803,25	1.123,39
HHg etapa de producción (L m ⁻²)	308,42	234,56	887,03	476,67

Resultados Huella Hídrica en la etapa de producción

En la Tabla 121 y en las Figuras 42 a 44 se presentan los resultados promedio de la huella hídrica para la etapa de producción, en las tres estaciones experimentales.

Tabla 121. Valores de la HH verde, HH azul y HH gris en la etapa de producción.

Tipo de Huella	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Huella Hídrica Azul	0	0	0	0
Huella Hídrica Verde	3.371,80	1.629,36	1.321,30	2.107,49
Huella Hídrica Gris	308,42	234,56	887,03	476,67
Huella Hídrica Total	3.680,22	1.863,92	2.208,33	2.584,16

De los resultados presentados en las Figuras 42, 43 y 44 puede apreciarse que la HH total en la etapa de producción varió entre 1.863,92 L m⁻² en la Estación Experimental El Tambo y 3.680,22 L m⁻² en la Estación Experimental Naranjal. La HH verde alcanzó valores de 1.321,30 L m⁻² en la Estación Experimental El Rosario, 1.629,36 L m⁻² en la Estación Experimental El Tambo y 3.371,80 L m⁻² en la Estación Experimental Naranjal. La HH gris alcanzó valores de 234,56 L m⁻² en la Estación Experimental El Tambo, 308,42 L m⁻² en la Estación Experimental Naranjal y 887,03 L m⁻² en la Estación Experimental El Rosario.

En la Tabla 122 y en la Figura 45 se presentan los resultados promedio de la Huella Hídrica para la etapa de producción.

La HH total promedio de la etapa de producción, evaluada en las tres estaciones experimentales de Cenicafé, fue de 2.584,16 L m⁻², representando la HH verde un porcentaje del 81,55% (2.107,49 L m⁻²) y la HH gris el 18,45% (476,67 L m⁻²).

Tabla 122. Valores promedio de la Huella Hídrica en la etapa de producción.

HH Azul	HH verde	HH gris	HH total
0,00 L m ⁻²	2.107,49 L m ⁻²	476,67 L m ⁻²	2.584,16 L m ⁻²

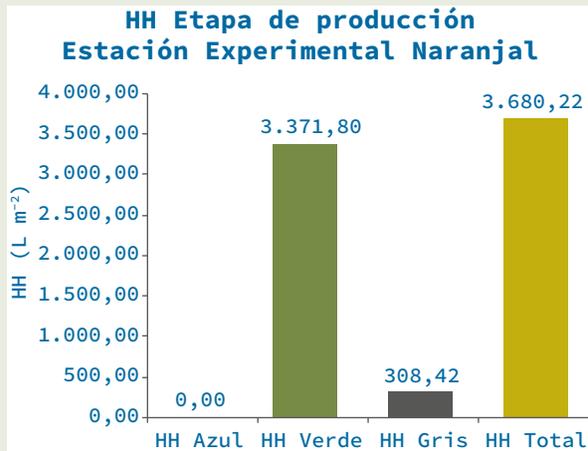


Figura 42. Valores promedio de la Huella Hídrica en la etapa de producción en la Estación Experimental Naranjal.

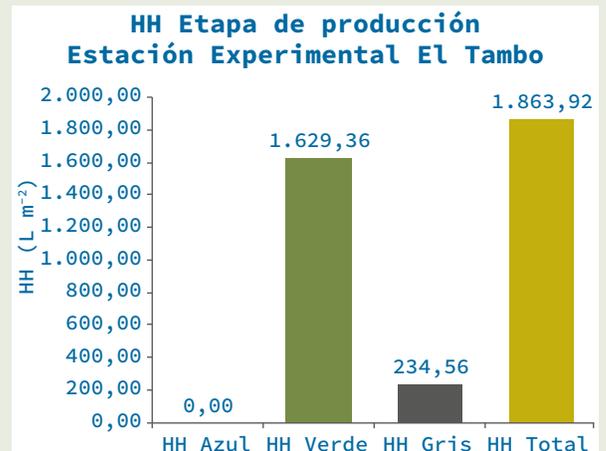


Figura 43. Valores promedio de la Huella Hídrica en la etapa de producción en la Estación Experimental El Tambo.

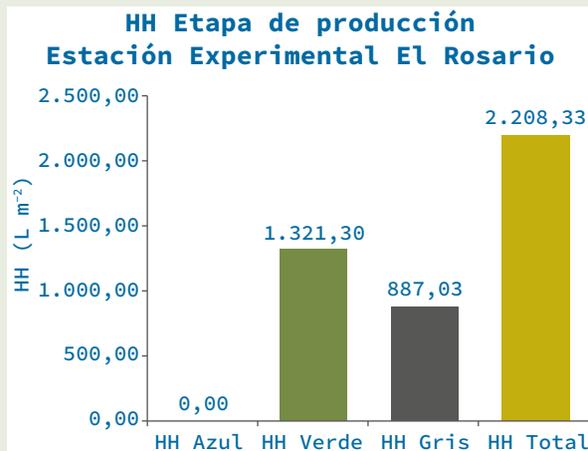


Figura 44. Valores promedio de la Huella Hídrica en la etapa de producción en la Estación Experimental El Rosario.

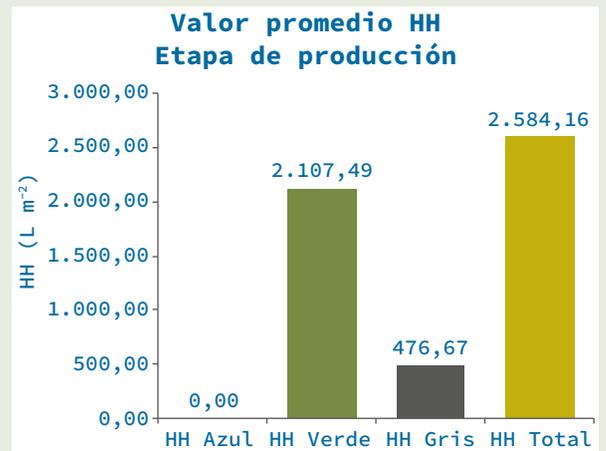


Figura 45. Valores promedio de la Huella Hídrica en la etapa de producción en las tres Estaciones Experimentales.

Etapa de beneficio

El café recolectado en las parcelas experimentales durante las etapas de levante y producción fue beneficiado en las estaciones experimentales y se cuantificó el agua utilizada en el proceso de beneficio y se caracterizó el agua residual descargada al suelo o a cuerpos de agua superficial.

En la Tabla 123 se presentan los resultados de rendimiento en la producción de café en las estaciones experimentales durante las etapas de levante y producción.

Tabla 123. Datos de rendimiento de café en las etapas de levante y producción.

Año	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Etapa Levante Año 1 (kg cps/árbol)	0,000	0,000	0,000	0,000
Etapa Levante Año 2 (kg cps/árbol)	0,192	0,045	0,084	0,107
Etapa Producción Año 3 (kg cps/árbol)	0,476	0,687	0,376	0,513
Etapa Producción Año 4 (kg cps/árbol)	0,366	0,441	0,483	0,430
Total producido, ciclo 4 años (kg cps/árbol)	1,034	1,173	0,943	1,050

Determinación de la Huella Hídrica Verde

Durante la etapa de beneficio, en las tres estaciones experimentales, no se utilizó agua de lluvia, por lo que la huella hídrica verde fue cero.

Determinación de la Huella Hídrica Azul

El agua utilizada en la etapa de beneficio del café se usó para el lavado del grano y de la maquinaria, y se encontraba almacenada en tanques de abastecimiento cerrados, por lo que se despreciaron las pérdidas por evaporación. En el proceso de lavado de café no se realiza incorporación al producto del agua utilizada. No obstante, dado que el agua ya usada y tratada se descarga al suelo, no se puede asegurar que toda drene a la misma microcuenca de la cual se realizó su captación. Una parte queda incorporada al suelo, otra parte es utilizada por la vegetación y se pierde por evapotranspiración e incorporación en la biomasa, y la que drene puede llegar a otra microcuenca. Por las razones expuestas se consideró que toda el agua utilizada en el beneficio del café fue agua azul y con base en ella se calculó la huella hídrica azul.

El beneficio de los frutos de café se realizó, en las tres estaciones, por medio de un beneficio ecológico que involucró el uso de tolva seca para el recibo de los frutos de café. El proceso de despulpado y transporte de la pulpa de café se realizó sin el uso de agua.

Para la Estación Experimental El Tambo, el beneficio del café se realizó mediante desmucilaginado mecánico utilizando 1,1 L de agua/kg cps (Rodríguez, 2011c) y en la Estación Experimental Naranjal (Rodríguez, 2011a) y El Rosario (Rodríguez, 2011b), el beneficio del café se realizó mediante fermentación natural, utilizando en promedio 5 y 8 L de agua/kg de cps, respectivamente.

El transporte del café lavado a los secadores solares se realizó por acarreo (sin utilización de agua). El agua utilizada, en el proceso de beneficio, se transformó en agua residual. En la Tabla 124 se presentan los resultados del cálculo de la HH azul para la etapa de beneficio, para el café recolectado en las parcelas en las etapas de levante y producción, en las tres estaciones experimentales.

Tabla 124. Datos utilizados en la determinación de la HH azul y valores de la HH azul en la etapa de beneficio en las tres estaciones experimentales.

Parámetro	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Consumo promedio de agua (L kg ⁻¹ de cps)	5,00	1,10	8,00	4,70
Producción de café promedio (kg cps/árbol)	1,034	1,173	0,943	1,050
Agua utilizada en el proceso (L)	5,17	1,29	7,54	4,94
Área ocupada por árbol (m ²)	1,00	1,00	1,00	1,00
HH azul (L m ⁻²)	5,17	1,29	7,54	4,94
HH azul (L kg ⁻¹ de cps)	5,00	1,10	8,00	4,70

Determinación de la Huella Hídrica Gris

En la Tabla 125 se presentan los volúmenes de agua residual por kilogramo de café pergamino seco generado en las estaciones experimentales, equivalente al volumen de agua utilizado y al mucílago degradado adicionado a las mismas, equivalente a 122 mL kg⁻¹ fruto (DQO de 248.700 mg L⁻¹) (Zambrano e Isaza, 1998), es decir, 0,61 L kg⁻¹ de cps. Para el caso de la Estación Experimental El Tambo, la cantidad generada de lixiviados de la mezcla pulpa – mucílago fue de 0,1225 L kg⁻¹ de café cereza, equivalente a 0,61 L kg⁻¹ de cps.

Para la Estación Experimental El Tambo, el mucílago obtenido del desmucilaginado mecánico fue mezclado con la pulpa en el procesador del beneficiadero, generándose un lixiviado que fue tratado en un Sistema de Tratamiento Primario de Lixiviados (SITAL) seguido de un Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA) (Figura 46).

El SITAL constó de una trampa de pulpa, en polietileno, de 100 L; un tanque en polietileno de 1 m³ de capacidad, al cual se estimó el agua residual con una DQO de 110.000 mg L⁻¹; un

filtro pre-acidificador, en polietileno, de 1 m³ de capacidad, empacado con piedra caliza; dos tanques en polietileno de 250 L como lechos de secado; dos tanques en polietileno, de 2 m³ cada uno, que actuaron como tanques de almacenamiento; una recámara dosificadora de 250 L, que distribuyó el agua a dos reactores metanogénicos, en polietileno, de 2 m³ de capacidad cada uno y los cuales estaban empacados con botellas no retornables y de los cuales se estimó salió el efluente, con una carga orgánica cercana a los 3.000 mg L⁻¹ de DQO (remoción del 97%) (Rodríguez, 2011c).

Tabla 125. Volúmenes promedio de agua residual generada.

Parámetro	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Agua residual generada (L kg ⁻¹ de cps)	5,61	0,61	8,61	4,94
Producción de café promedio (kg cps/árbol)	1,034	1,173	0,943	1,050
Agua residual generada en el proceso (L)	5,80	0,72	8,12	5,19

Para la Estación Experimental Naranjal, las aguas residuales fueron tratadas en un SMTA (Figura 47) que constó de una trampa de pulpa, en polietileno, de 100 L; tres tanques en polietileno, de 2 m³ de capacidad cada uno, en los cuales ocurrió la etapa hidrolítica acidogénica y a los cuales se estimó llegaron las aguas mieles con una concentración en DQO de 25.000 mg L⁻¹; una recámara dosificadora de 250 L, que distribuyó el agua a tres reactores metanogénicos, en polietileno, de 2 m³ de capacidad cada uno y los cuales estaban empacados con botellas no retornables y de los cuales se estimó salió el efluente con 3.750 mg L⁻¹ de DQO (remoción del 85%). Finalmente, las aguas tratadas son llevadas a un postratamiento utilizando humedales artificiales, en los cuales se estimó se logró una remoción adicional de carga orgánica del 30%, para una remoción total de contaminación del 90% (Rodríguez, 2011a).

Para la Estación Experimental El Rosario, las aguas residuales fueron tratadas en un SMTA (Figura 48) que constó de una trampa de pulpa, en polietileno, de 100 L; cuatro tanques en polietileno, de 5 m³ de capacidad, cada uno, para la fase hidrolítica, a los cuales se estimó ingresó el agua residual con una DQO de 20.000 mg L⁻¹; dos recámaras dosificadoras de 250 L, que alimenta ocho reactores metanogénicos, en polietileno, de 2 m³ de capacidad cada uno y los cuales estaban empacados con botellas no retornables, y de los cuales se estimó salió el efluente con 2.000 mg L⁻¹ de DQO (remoción del 90%). Finalmente, las aguas tratadas son llevadas a un postratamiento utilizando humedales artificiales, en los cuales se estima una remoción adicional de carga orgánica del 30%, para una remoción total de de contaminación del 93% (Rodríguez, 2011b).

En la Tabla 126 se presentan los resultados de la caracterización del agua residual tratada de las tres estaciones experimentales.



Figura 46. Canalización de los lixiviados de la mezcla pulpa-mucílago hacia el sistema de tratamiento. Estación Experimental El Tambo.



Figura 47. Sistema de tratamiento de las aguas residuales del café en la Estación Experimental El Rosario. Tratamiento secundario en un SMTA y tratamiento terciario en humedales artificiales.



Figura 48. Sistema de tratamiento de las aguas residuales del café en la Estación Experimental Naranjal. Tratamiento secundario en un SMTA y tratamiento terciario en humedales artificiales.

Tabla 126. Valores promedio de las características de las aguas residuales del beneficio de café tratadas, durante el ciclo productivo.

Parámetro	Estación Experimental		
	Naranja	El Tambo	El Rosario
pH (unidades)	6,76	6,63	6,20
Temperatura (°C)	21,05	20,50	23,25
DQO (mg L ⁻¹)	60	4.620	400
SST (mg L ⁻¹)	< 6	690	72
Sólidos sedimentables (mL L ⁻¹)	< 0,1	<0,1	0,3
Grasas y aceites (mg L ⁻¹)	< 10	< 10	<10

En la Tabla 127 se presentan los resultados promedio de la caracterización del agua utilizada en el proceso de beneficio en las tres estaciones experimentales.

Tabla 127. Valores promedio de las características del agua utilizada en el proceso de beneficio.

Parámetro	Estación Experimental		
	Naranja	El Tambo	El Rosario
pH (unidades)	7,03	6,86	6,80
Turbidez(NTU)	4	4	3
SST (mg L ⁻¹)	13	18	16
DQO (mg L ⁻¹)	18	22	21
P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	0,49	0,39	0,63
N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	1,43	2,11	1,99

La HH gris se estimó en función de los volúmenes de agua residual tratada generados, considerando las características de calidad en los mismos. Se estimó teniendo en cuenta la concentración de cada uno de los parámetros evaluados que superara los valores de calidad condensados en la Tabla 5. La HH gris es aquella equivalente a la del parámetro, de los seleccionados por superar los valores de calidad establecidos, que genere el mayor valor, aplicando la **Ecuación <31>**.

$$HH \text{ gris Beneficio} = \frac{V_e * C_e}{C_{m\acute{a}x}} - \frac{V_a * C_a}{C_{m\acute{a}x}} \text{ <31>}$$

Dónde:

HH gris Beneficio = Huella Hídrica Gris en la Etapa de Beneficio en $L\ kg^{-1}\ cps$.

V_e = Volumen de agua residual del beneficio ya tratada (L).

V_a = Volumen de agua utilizado en el proceso de beneficio (L).

C_e = Concentración del parámetro en el agua residual de beneficio tratada que excede los límites de calidad ($g\ L^{-1}$).

C_a = Concentración del parámetro de interés en el agua utilizada para el lavado del café ($g\ L^{-1}$).

$C_{m\acute{a}x}$ = Concentración del parámetro según los límites de calidad ($g\ L^{-1}$).

En la Tabla 128 se presentan los valores de los parámetros que excedieron la concentración límite en las caracterizaciones de las aguas residuales del beneficio del café ya tratadas y los valores de la HHg de estos parámetros. En la Tabla 129 se presentan los valores de la HHg del agua utilizada en el beneficio del café, utilizando la DQO, que fue el parámetro que arrojó los mayores valores de HHg en las aguas tratadas.

Tabla 128. Valores de los parámetros que excedieron las concentraciones límite en las caracterizaciones de las aguas residuales tratadas. Etapa de beneficio.

Estación Experimental								
Naranjal			El Tambo			El Rosario		
Vol. (L)	DQO ($mg\ L^{-1}$)	SST ($mg\ L^{-1}$)	Vol. (L)	DQO ($mg\ L^{-1}$)	SST ($mg\ L^{-1}$)	Vol. (L)	DQO ($mg\ L^{-1}$)	SST ($mg\ L^{-1}$)
5,80	60	-	0,72	4.620	690	8,12	400	72
Huella Hídrica Gris (L)								
	13,92	-		132,77	4,96		129,91	5,85

Tabla 129. Volumen y DQO del agua utilizada en el beneficio del café.

Variable	Estación Experimental		
	Naranjal	El Tambo	El Rosario
Agua utilizada en el beneficio (L)	5,17	1,29	7,54
DQO en el agua ($mg\ L^{-1}$)	18	22	21
Carga másica de ingreso (g DQO)	0,093	0,028	0,158
HHg de la carga másica de ingreso (L)	3,72	1,14	6,34

En la Tabla 130 se presentan los resultados de la Huella Hídrica gris total (HHg por vertimientos – HHg del agua utilizada en el beneficio) para las tres estaciones experimentales.

Tabla 130. Valores de la Huella Hídrica gris total. Etapa de beneficio.

Estación	Naranjal	El Tambo	El Rosario	Promedio
HHg vertimientos (L)	13,92	132,77	129,91	92,20
HHg agua utilizada en el beneficio (L)	3,72	1,14	6,34	3,73
HHg etapa de beneficio (L)	10,20	131,64	123,57	88,47
HHg etapa Beneficio (L m⁻²)	10,20	131,64	123,57	88,47
Área ocupada por árbol (m ²)	1,00	1,00	10,0	1,00
Producción de café promedio (kg cps/árbol)	1,034	1,173	0,943	1,050
HHg etapa Beneficio (L kg⁻¹ de cps)	9,86	112,22	131,04	84,26

Para el caso de un beneficio tradicional en el cual se utilizan 40 L de agua por kilogramo de cps y no se realiza un tratamiento a las aguas residuales del beneficio, la HH gris sería de 7.152 L kg⁻¹ de cps, es decir, 85 veces mayor al promedio encontrado en este estudio que fue de 84,26 L kg⁻¹ de cps, en el cual se utilizaron, en promedio 4,70 L de agua por kilogramo de café pergamino seco y se realizó el tratamiento a las aguas residuales tratadas. Si se compara la HH gris del beneficio convencional con la HH gris generada en Naranjal, con aguas del beneficio del café postratadas en humedales artificiales (valor de HH gris de 9,86 L kg⁻¹ cps), el beneficio tradicional genera una HH gris 725 veces mayor.

Resultados de la Huella Hídrica en la etapa de beneficio

En la Tabla 131 y en las Figuras 49 a 51 se presentan los resultados promedio de la Huella Hídrica para la etapa de beneficio en las tres estaciones experimentales.

Tabla 131. Valores de la HH verde, HH azul y HH gris en la etapa de beneficio.

Tipo de Huella	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Huella Hídrica Verde (L kg ⁻¹ de cps)	0	0	0	0
Huella Hídrica Azul (L kg ⁻¹ de cps)	5,00	1,10	8,00	4,70
Huella Hídrica Gris (L kg ⁻¹ de cps)	9,86	112,22	131,04	84,26
Huella Hídrica Total (L kg⁻¹ de cps)	14,86	113,32	139,04	88,96

De los resultados presentados en las Figuras 49, 50 y 51 se puede apreciar que la HH total en la etapa de beneficio varió entre 14,86 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental Naranjal y 139,04 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Rosario. La HH azul alcanzó valores de 1,10 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Tambo, 5,00 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental Naranjal y 8,00 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Rosario. La HH gris alcanzó valores de 9,86 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental Naranjal, 112,22 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Tambo y 131,04 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Rosario. En la Tabla 132 y en la Figura 52 se presentan los resultados promedio de la huella hídrica para la etapa de beneficio.

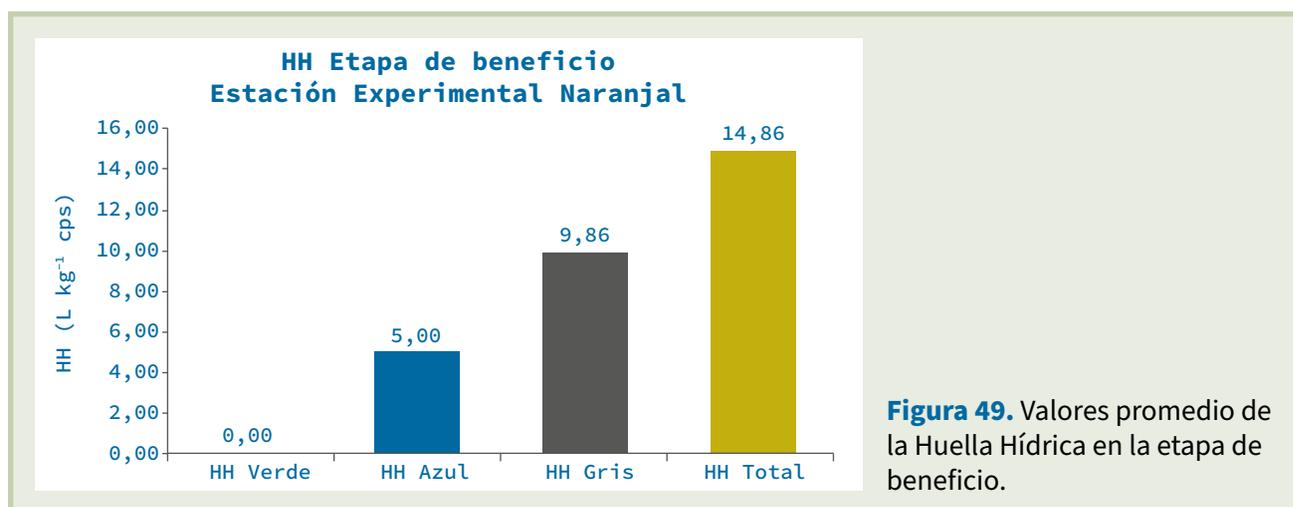
Tabla 132. Valores promedio de la HH en la etapa de beneficio.

HH verde	HH azul	HH gris	HH total
0,00 L kg ⁻¹ cps	4,70 L kg ⁻¹ cps	84,26 L kg ⁻¹ cps	88,96 L kg ⁻¹ cps

La HH total promedio de la etapa de beneficio, evaluada en las tres estaciones experimentales de Cenicafé, fue de 88,96 L kg⁻¹ cps, representando la HH gris un porcentaje del 94,72% (84,26 L kg⁻¹ cps) y la HH azul el 5,28% (4,70 L kg⁻¹ cps).

Huella Hídrica del café de Colombia. Ciclo de cinco años

En las Tablas 133, 134 y 135 y en las Figuras 53, 54 y 55 se presentan los valores de la HH del café en las tres estaciones experimentales, para cada una de las etapas del ciclo cultivo, durante cinco años de proceso, contados desde la instalación del germinador hasta el cuarto año de edad de los cultivos.



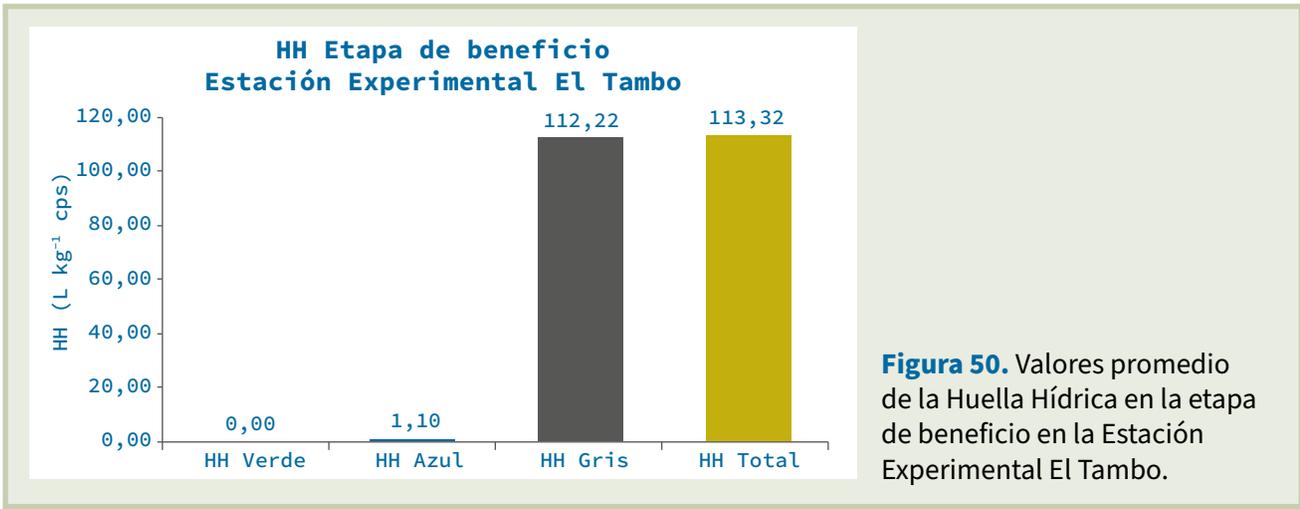


Figura 50. Valores promedio de la Huella Hídrica en la etapa de beneficio en la Estación Experimental El Tambo.

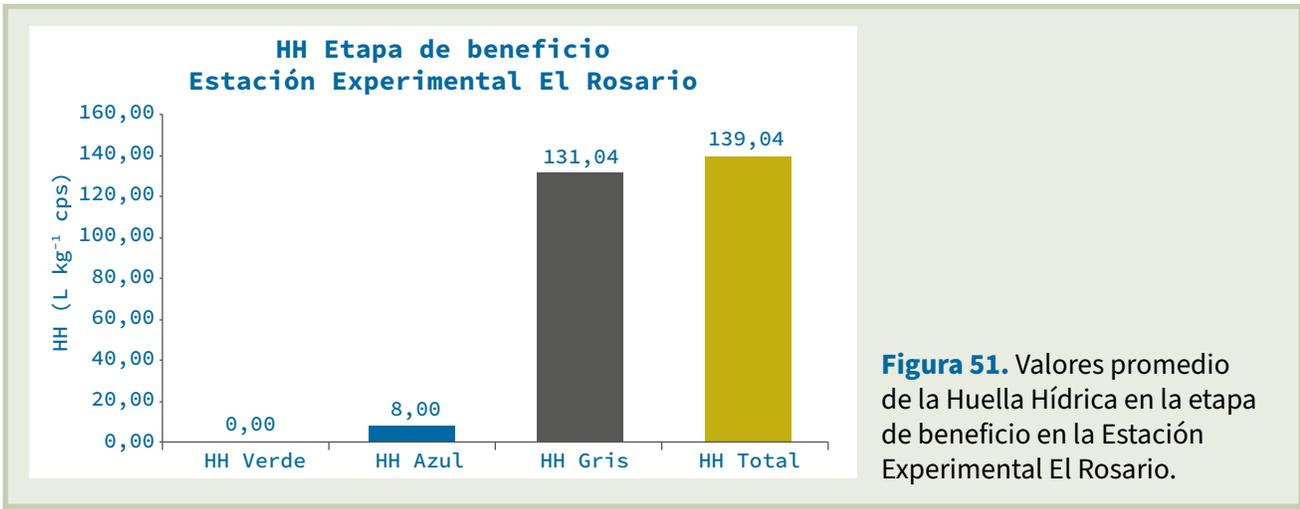


Figura 51. Valores promedio de la Huella Hídrica en la etapa de beneficio en la Estación Experimental El Rosario.

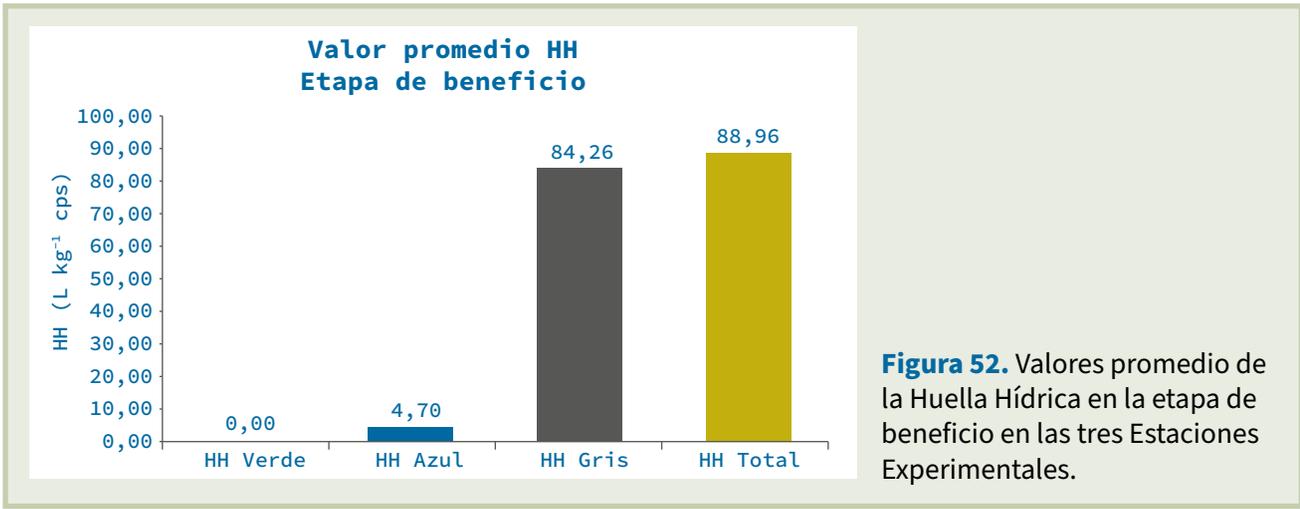


Figura 52. Valores promedio de la Huella Hídrica en la etapa de beneficio en las tres Estaciones Experimentales.

Para su cálculo se tuvo en cuenta que el área ocupada por un árbol en producción fue de 1,0 m². Que a partir de una semilla germinada se obtiene una chapola de la cual se obtiene la plántula (colino) y de la cual se obtiene el árbol.

Tabla 133. Valores promedio de la HH del café en el ciclo de cultivo de cinco años.

Estación Experimental Naranjal				
Etapa	HH azul	HH verde	HH gris	HH total
Germinador	0,068 L/chapola	0,190 L/chapola	0,038 L/chapola	0,296 L/chapola
Cosecha	1,034 kg cps/árbol	1,034 kg cps/árbol	1,034 kg cps/árbol	1,034 kg cps/árbol
Germinador (1)	0,066 L kg ⁻¹ cps	0,184 L kg ⁻¹ cps	0,037 L kg ⁻¹ cps	0,287 L kg ⁻¹ cps
Almácigo	3,83 L/colino	13,60 L/colino	5,14 L/colino	22,57 L/colino
Cosecha	1,034 kg cps/árbol	1,034 kg cps/árbol	1,034 kg cps/árbol	1,034 kg cps/árbol
Almácigo (2)	3,70 L kg ⁻¹ cps	13,15 L kg ⁻¹ cps	4,97 L kg ⁻¹ cps	21,82 L kg ⁻¹ cps
Levante	0,00	1.539,30 L m ⁻²	407,45 L m ⁻²	1.946,75 L m ⁻²
Cosecha	1,034 kg cps/árbol	1,034 kg cps/árbol	1,034 kg cps/árbol	1,034 kg cps/árbol
Levante (3)	0,00	1.488,68 L kg ⁻¹ cps	394,05 L kg ⁻¹ cps	1.882,74 L kg ⁻¹ cps
Producción	0,00	3.371,80 L m ⁻²	308,42 L m ⁻²	3.680,22 L m ⁻²
Cosecha	1,034 kg cps/árbol	1,034 kg cps/árbol	1,034 kg cps/árbol	1,034 kg cps/árbol
Producción (4)	0,00	3.260,93 L kg ⁻¹ cps	298,28 L kg ⁻¹ cps	3.559,21 L kg ⁻¹ cps
Beneficio	5,00 L kg ⁻¹ cps	0,00 L kg ⁻¹ cps	9,86 L kg ⁻¹ cps	14,86 L kg ⁻¹ cps
Total	8,77 L kg⁻¹ cps	4.762,95 L kg⁻¹ cps	707,20 L kg⁻¹ cps	5.478,92 L kg⁻¹ cps

(1) se dividió por 3.723 semillas germinadas por 1,0 kg de semilla para obtener el valor de la HH de una chapola que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (1,034 kg de cps) para obtener la HH en función de 1,0 kg cps.

(2) se dividió por 403 colinos obtenidos/bloque para obtener el valor de la HH de un colino que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (1,034 kg cps) para obtener la HH en función de 1,0 kg cps.

(3) se dividió por la producción del árbol (1,034 kg cps), que ocupaba 1,0 m², para obtener la HH en función de 1,0 kg cps.

(4) se dividió por la producción del árbol (1,034 kg cps), que ocupaba 1,0 m², para obtener la HH en función de 1,0 kg cps.

Tabla 134. Valores promedio de la HH del café en el ciclo de cultivo de cinco años.

Estación Experimental El Tambo				
Etapa	HH azul	HH verde	HH gris	HH total
Germinador	0,045 L/chapola	0,084 L/chapola	0,249 L/chapola	0,378 L/chapola
Cosecha	1,173 kg cps/árbol	1,173 kg cps/árbol	1,173 kg cps/árbol	1,173 kg cps/árbol
Germinador (1)	0,039 L kg ⁻¹ cps	0,071 L kg ⁻¹ cps	0,213 L kg ⁻¹ cps	0,323 L kg ⁻¹ cps
Almácigo	2,25 L/colino	7,63 L/colino	0,25 L/colino	10,13 L/colino
Cosecha	1,173 kg cps/árbol	1,173 kg cps/árbol	1,173 kg cps/árbol	1,173 kg cps/árbol
Almácigo (2)	1,92 L kg ⁻¹ cps	6,50 L kg ⁻¹ cps	0,21 L kg ⁻¹ cps	8,64 L kg ⁻¹ cps
Levante	0,00	1.584,72 L m ⁻²	305,67 L m ⁻²	1.890,39 L m ⁻²
Cosecha	1,173 kg cps/árbol	1,173 kg cps/árbol	1,173 kg cps/árbol	1,173 kg cps/árbol
Levante (3)	0,00	1.351,00 L kg ⁻¹ cps	260,59 L kg ⁻¹ cps	1.611,59 L kg ⁻¹ cps
Producción	0,00	1.629,36 L m ⁻²	234,56 L m ⁻²	1.863,92 L m ⁻²
Cosecha	1,173 kg cps/árbol	1,173 kg cps/árbol	1,173 kg cps/árbol	1,173 kg cps/árbol
Producción (4)	0,00	1.389,05 L kg ⁻¹ cps	199,97 L kg ⁻¹ cps	1.589,02 L kg ⁻¹ cps
Beneficio	1,10 L kg ⁻¹ cps	0,00	112,22 L/kg cps	113,32 L/kg cps
Total	3,06 L kg⁻¹ cps	2.746,62 L kg⁻¹ cps	573,20 L kg⁻¹ cps	3.322,89 L kg⁻¹ cps

(1) se dividió por 3.486 semillas germinadas por 1,0 kg de semilla para obtener el valor de la HH de una chapola que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (1,173 kg de cps) para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

(2) se dividió por 395 colinos obtenidos/bloque para obtener el valor de la HH de un colino que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (1,173 kg de cps) para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

(3) se dividió por la producción del árbol (1,173 kg de cps), que ocupaba 1,0 m², para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

(4) se dividió por la producción del árbol (1,173 kg de cps), que ocupaba 1,0 m², para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

Tabla 135. Valores promedio de la HH del café en el ciclo de cultivo de cinco años.

Estación Experimental El Rosario				
Etapa	HH azul	HH verde	HH gris	HH total
Germinador	0,093 L/chapola	0,131 L/chapola	0,111 L/chapola	0,335 L/chapola
Cosecha	0,943 kg cps/árbol	0,943 kg cps/árbol	0,943 kg cps/árbol	0,943 kg cps/árbol
Germinador (1)	0,099 L kg ⁻¹ cps	0,139 L kg ⁻¹ cps	0,117 L kg ⁻¹ cps	0,355 L kg ⁻¹ cps
Almácigo	10,09 L/colino	9,42 L/colino	5,05 L/colino	24,56 L/colino
Cosecha	0,943 kg cps/árbol	0,943 kg cps/árbol	0,943 kg cps/árbol	0,943 kg cps/árbol
Almácigo (2)	10,70 L kg ⁻¹ cps	9,99 L kg ⁻¹ cps	5,35 L kg ⁻¹ cps	26,05 L kg ⁻¹ cps
Levante	0	1193,16 L m ⁻²	517,48 L m ⁻²	1710,64 L m ⁻²
Cosecha	0,943 kg cps/árbol	0,943 kg cps/árbol	0,943 kg cps/árbol	0,943 kg cps/árbol
Levante (3)	0,00	1.265,28 L kg ⁻¹ cps	548,76 L kg ⁻¹ cps	1.814,04 L kg ⁻¹ cps
Producción	0,00	1.321,30 L m ⁻²	887,03 L m ⁻²	2.208,33 L m ⁻²
Cosecha	0,943 kg cps/árbol	0,943 kg cps/árbol	0,943 kg cps/árbol	0,943 kg cps/árbol
Producción (4)	0,00	1.401,17 L kg ⁻¹ cps	940,64 L kg ⁻¹ cps	2.341,81 L kg ⁻¹ cps
Beneficio	8,00 L kg ⁻¹ cps	0,00	131,04 L kg ⁻¹ cps	139,04 L kg ⁻¹ cps
Total	18,80 L kg⁻¹ cps	2.676,58 L kg⁻¹ cps	1.625,91 L kg⁻¹ cps	4.321,29 L kg⁻¹ cps

(1) se dividió por 4.000 semillas germinadas por 1,0/kg de semilla para obtener el valor de la HH de una chapola que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (0,943 kg de cps) para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

(2) se dividió por 386 colinos obtenidos/bloque para obtener el valor de la HH de un colino que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (0,943 kg de cps) para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

(3) se dividió por la producción del árbol (0,943 kg de cps), que ocupaba 1,0 m², para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

(4) se dividió por la producción del árbol (0,943 kg de cps), que ocupaba 1,0 m², para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

De los resultados presentados en las Figuras 53, 54 y 55 se puede apreciar que la HH total del café de Colombia varió entre 3.322,89 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Tambo y 5.478,92 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental Naranjal. La HH azul alcanzó valores de 3,06 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Tambo, 8,77 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental Naranjal y 18,80 L kg⁻¹ de cps (en la Estación Experimental El Rosario). La HH verde alcanzó valores de

Estación Experimental Naranjal
Ciclo de cultivo (Germinador - Producción): 5 años

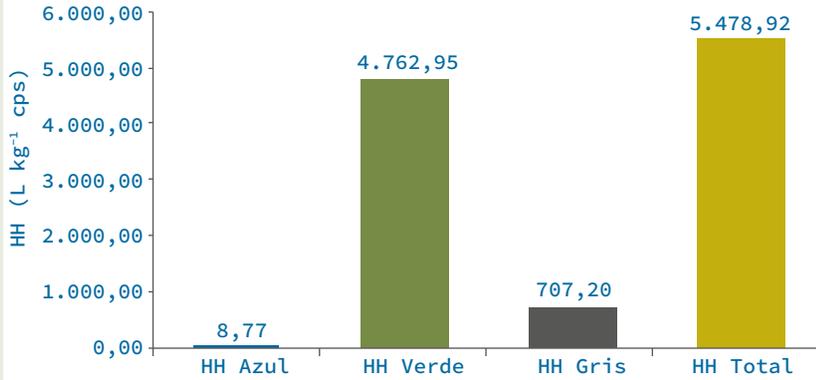


Figura 53. Valores de la Huella Hídrica del café de Colombia.

Estación Experimental El Tambo
Ciclo de cultivo (Germinador - Producción): 5 años

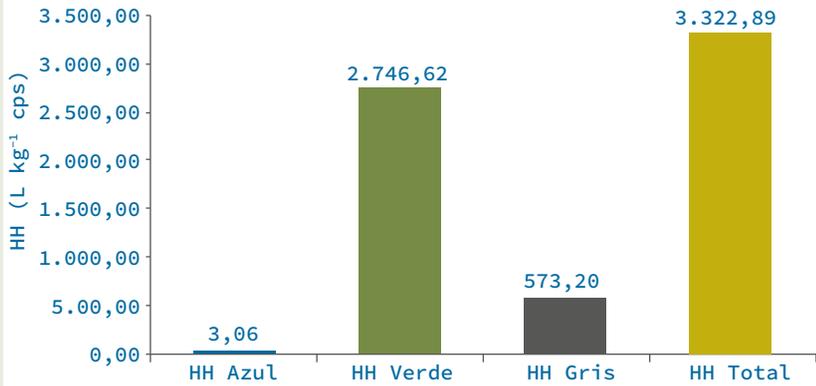


Figura 54. Valores de la Huella Hídrica del café de Colombia.

Estación Experimental El Rosario
Ciclo de cultivo (Germinador - Producción): 5 años

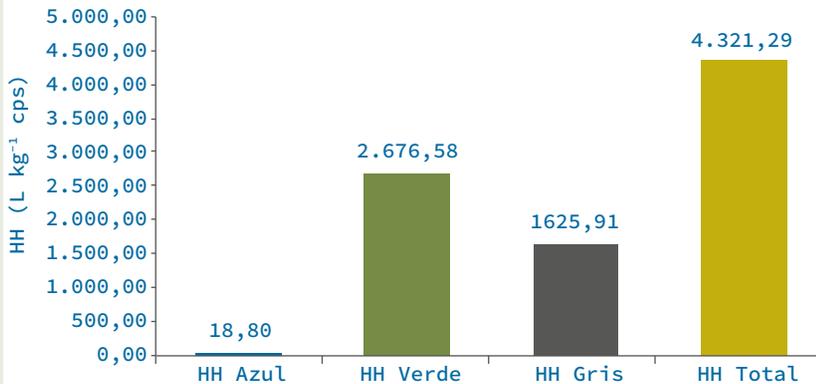


Figura 55. Valores de la Huella Hídrica del café de Colombia.

2.676,58 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Rosario, 2.746,62 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Tambo y 4.762,95 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental Naranjal. La HH gris alcanzó valores de 573,20 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Tambo, 707,20 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental Naranjal) y 1.625,91 L kg⁻¹ de cps (en la Estación Experimental El Rosario).

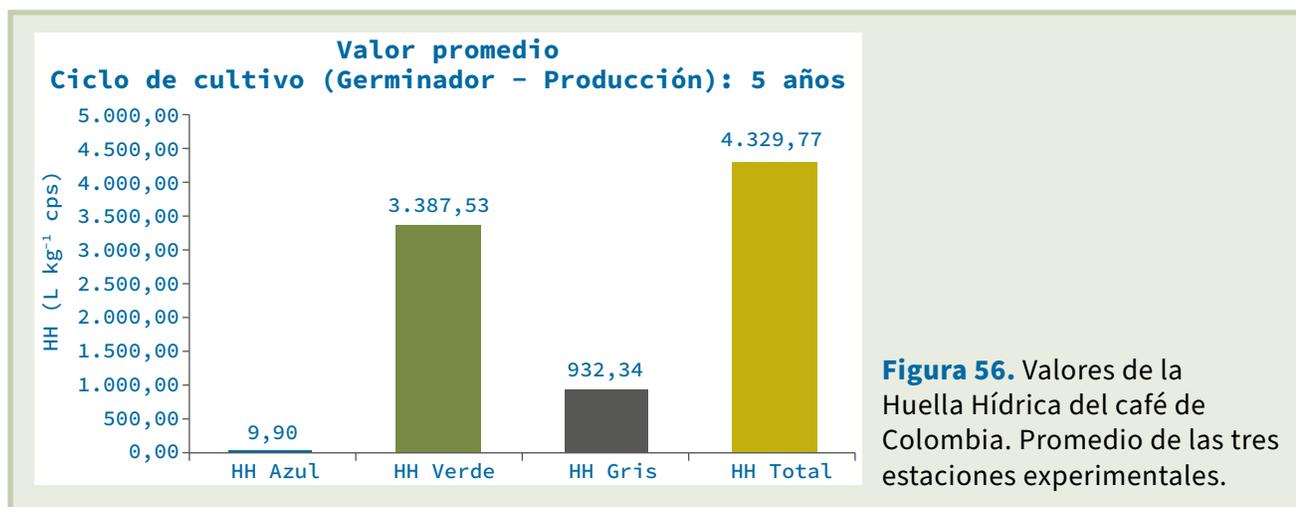
En la Tabla 136 y en la Figura 56 se presentan los resultados promedio de la huella hídrica para el café de Colombia.

Tabla 136. Valores promedio de la HH del café en el ciclo de cultivo de cinco años. Promedio de las tres estaciones experimentales.

Etapa	HH azul	HH verde	HH gris	HH total
Germinador	0,069 L/chapola	0,135 L/chapola	0,133 L/chapola	0,336 L/chapola
Cosecha	1,05 kg cps/árbol	1,05 kg cps/árbol	1,05 kg cps/árbol	1,05 kg cps/árbol
Germinador (1)	0,066 L kg ⁻¹ cps	0,128 L kg ⁻¹ cps	0,127 L kg ⁻¹ cps	0,321 L kg ⁻¹ cps
Almácigo	5,39 L/colino	10,22 L/colino	3,48 L/colino	19,09 L/colino
Cosecha	1,05 kg cps/árbol	1,05 kg cps/árbol	1,05 kg cps/árbol	1,05 kg cps/árbol
Almácigo (2)	5,13 L kg ⁻¹ cps	9,74 L kg ⁻¹ cps	3,31 L kg ⁻¹ cps	18,18 L kg ⁻¹ cps
Levante	0	1.439,06 L m ⁻²	410,20 L m ⁻²	1.849,26 L m ⁻²
Cosecha	1,05 kg cps/árbol	1,05 kg cps/árbol	1,05 kg cps/árbol	1,05 kg cps/árbol
Levante (3)	0,00	1.370,53 L/kg cps	390,67 L/kg cps	1.761,20 L/kg cps
Producción	0,00	2.107,49 L m ⁻²	476,67 L m ⁻²	2.584,16 L m ⁻²
Cosecha	1,05 kg cps/árbol	1,05 kg cps/árbol	1,05 kg cps/árbol	1,05 kg cps/árbol
Producción (4)	0,00	2.007,13 L kg ⁻¹ cps	453,97 L kg ⁻¹ cps	2.461,10 L kg ⁻¹ cps
Beneficio	4,70 L kg ⁻¹ cps	0,00	84,26 L kg ⁻¹ cps	88,96 L kg ⁻¹ cps
Total	9,90 L kg⁻¹ cps	3.387,53 L kg⁻¹ cps	932,34 L kg⁻¹ cps	4.329,77 L kg⁻¹ cps

(1) se dividió por 3.857 semillas germinadas por 1,0 kg de semilla para obtener el valor de la HH de una chapola que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (1,050 kg de cps) para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

(2) se dividió por 395 colinos obtenidos/bloque para obtener el valor de la HH de un colino que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (1,050 kg de cps) para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.



(3) se dividió por la producción del árbol (1,050 kg de cps), que ocupaba 1,0 m², para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

(4) se dividió por la producción del árbol (1,050 kg de cps), que ocupaba 1,0 m², para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

La HH total promedio del café de Colombia, para un ciclo de cultivo de cinco años (desde germinador hasta producción), evaluada en las tres estaciones experimentales de Cenicafé, fue de 4.329,77 L kg⁻¹ cps, representando la HH verde un porcentaje del 78,24% (3.387,53 L kg⁻¹ cps), la HH gris el 21,53% (932,34 L kg⁻¹ cps) y la HH azul el 0,23% (9,90 L kg⁻¹ cps).

Huella Hídrica del café de Colombia. Ciclo completo (siembra nueva - renovación).

Con base en los valores experimentales obtenidos en el ciclo de cultivo, durante cinco años y los rendimientos de cosecha del sexto año, en las tres estaciones experimentales, antes de la primera renovación del cultivo por zoqueo, se determinó la HH para todo el ciclo de cultivo del café, desde siembra nueva hasta la primera renovación por zoqueo, para una densidad de siembra de 10.000 árboles/ha.

En las Tablas 137, 138 y 139 y en las Figuras 57, 58 y 59 se presentan los valores de la HH del café en las tres estaciones experimentales, para cada una de las etapas del ciclo cultivo, durante seis años de proceso, contados desde la instalación del germinador hasta la primera renovación por zoca, al quinto año de sembrado el colino (cuatro cosechas). Para su cálculo se tuvo en cuenta que el área ocupada por un árbol en producción fue de 1,0 m², que a partir de una semilla germinada se obtiene una chapola de la cual se obtiene la plántula (colino) y de la cual se obtiene el árbol.

Tabla 137. Valores promedio de la HH del café de Colombia en el ciclo de cultivo de seis años (siembra nueva – renovación).

Estación Experimental Naranjal				
Etapa	HH azul	HH verde	HH gris	HH total
Germinador	0,068 L/chapola	0,190 L/chapola	0,038 L/chapola	0,296 L/chapola
Cosecha	1,582 kg cps/árbol	1,582 kg cps/árbol	1,582 kg cps/árbol	1,582 kg cps/árbol
Germinador (1)	0,043 L kg ⁻¹ cps	0,120 L kg ⁻¹ cps	0,024 L kg ⁻¹ cps cps	0,187 L kg ⁻¹ cps
Almácigo	3,83 L/colino	13,60 L/colino	5,14 L/colino	22,57 L/colino
Cosecha	1,582 kg cps/árbol	1,582 kg cps/árbol	1,582 kg cps/árbol	1,582 kg cps/árbol
Almácigo (2)	2,42 L kg ⁻¹ cps	8,60 L kg ⁻¹ cps	3,25 L kg ⁻¹ cps	14,26 L kg ⁻¹ cps
Levante	0,00	1539,30 L m ⁻²	407,45 L m ⁻²	1946,75 L m ⁻²
Cosecha	1,582 kg cps/árbol	1,582 kg cps/árbol	1,582 kg cps/árbol	1,582 kg cps/árbol
Levante (3)	0,00	973,01 L kg ⁻¹ cps	257,56 L kg ⁻¹ cps	1.230,56 L kg ⁻¹ cps
Producción	0,00	5057,70 L m ⁻²	462,63 L m ⁻²	5.520,33 L m ⁻²
Cosecha	1,582 kg/árbol cps	1,582 kg cps/árbol	1,582 kg cps/árbol	1,582 kg cps/árbol
Producción (4)	0,00	3.197,03 L kg ⁻¹ cps	292,44 L kg ⁻¹ cps	3.489,47 L kg ⁻¹ cps
Beneficio	5,00 L kg ⁻¹ cps	0,00 L kg ⁻¹ cps	9,86 L kg ⁻¹ cps	14,86 L kg ⁻¹ cps
Total	7,46 L kg⁻¹ cps	4.178,75 L kg⁻¹ cps	563,13 L kg⁻¹ cps	4.749,34 L kg⁻¹ cps

(1) se dividió por 3.723 semillas germinadas por 1,0 kg de semilla para obtener el valor de la HH de una chapola que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (1,582 kg de cps) para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

(2) se dividió por 403 colinos obtenidos/bloque para obtener el valor de la HH de un colino que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (1,582 kg de cps) para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

(3) se dividió por la producción del árbol (1,582 kg de cps), que ocupaba 1,0 m², para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

(4) se dividió por la producción del árbol (1,582 kg de cps), que ocupaba 1,0 m², para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

Tabla 138. Valores promedio de la HH del café de Colombia en el ciclo de cultivo de siete años (siembra nueva – renovación).

Estación Experimental El Tambo				
Etapa	HH azul	HH verde	HH gris	HH total
Germinador	0,045 L/chapola	0,084 L/chapola	0,249 L/chapola	0,378 L/chapola
Cosecha	1,793 kg cps/árbol	1,793 kg cps/árbol	1,793 kg cps/árbol	1,793 kg cps/árbol
Germinador (1)	0,025 L kg ⁻¹ cps	0,047 L kg ⁻¹ cps	0,139 L kg ⁻¹ cps	0,211 L kg ⁻¹ cps
Almácigo	2,25 L/colino	7,63 L/colino	0,25 L/colino	10,13 L/colino
Cosecha	1,793 kg cps/árbol	1,793 kg cps/árbol	1,793 kg cps/árbol	1,793 kg cps/árbol
Almácigo (2)	1,26 L kg ⁻¹ cps	4,25 L kg ⁻¹ cps	0,14 L kg ⁻¹ cps	5,65 L kg ⁻¹ cps
Levante	0,00	1584,72 L m ⁻²	305,67 L m ⁻²	1890,39 L m ⁻²
Cosecha	1,793 kg cps/árbol	1,793 kg cps/árbol	1,793 kg cps/árbol	1,793 kg cps/árbol
Levante (3)	0,00	883,84 L/kg cps	170,48 L/kg cps	1.054,32 L/kg cps
Producción	0,00	2.444,04 L m ⁻²	351,84 L m ⁻²	2.795,88 L m ⁻²
Cosecha	1,793 kg cps/árbol	1,793 kg cps/árbol	1,793 kg cps/árbol	1,793 kg cps/árbol
Producción (4)	0,00	1.363,10 L kg ⁻¹ cps	196,23 L kg ⁻¹ cps	1.559,33 L kg ⁻¹ cps
Beneficio	1,10 L kg ⁻¹ cps	0,00	112,22 L kg ⁻¹ cps	113,32 L kg ⁻¹ cps
Total	2,38 L kg⁻¹ cps	2.251,24 L kg⁻¹ cps	479,21 L kg⁻¹ cps	2.732,83 L kg⁻¹ cps

(1) se dividió por 3.486 semillas germinadas/kg de semilla para obtener el valor de la HH de una chapola que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (1,793 kg cps) para obtener la HH en función de 1 kg cps.

(2) se dividió por 395 colinos obtenidos/bloque para obtener el valor de la HH de un colino que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (1,793 kg cps) para obtener la HH en función de 1 kg cps.

(3) se dividió por la producción del árbol (1,793 kg cps), que ocupaba 1 m², para obtener la HH en función de 1 kg cps.

(4) se dividió por la producción del árbol (1,793 kg cps), que ocupaba 1 m², para obtener la HH en función de 1 kg cps.

Tabla 139. Valores promedio de la HH del café de Colombia en el ciclo de cultivo de seis años (siembra nueva – renovación).

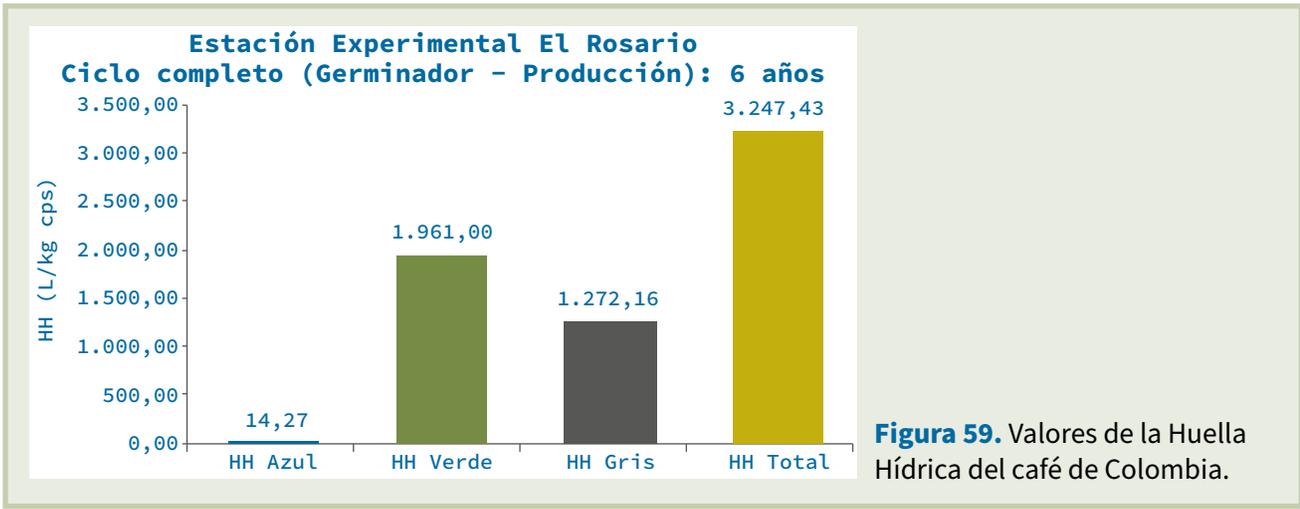
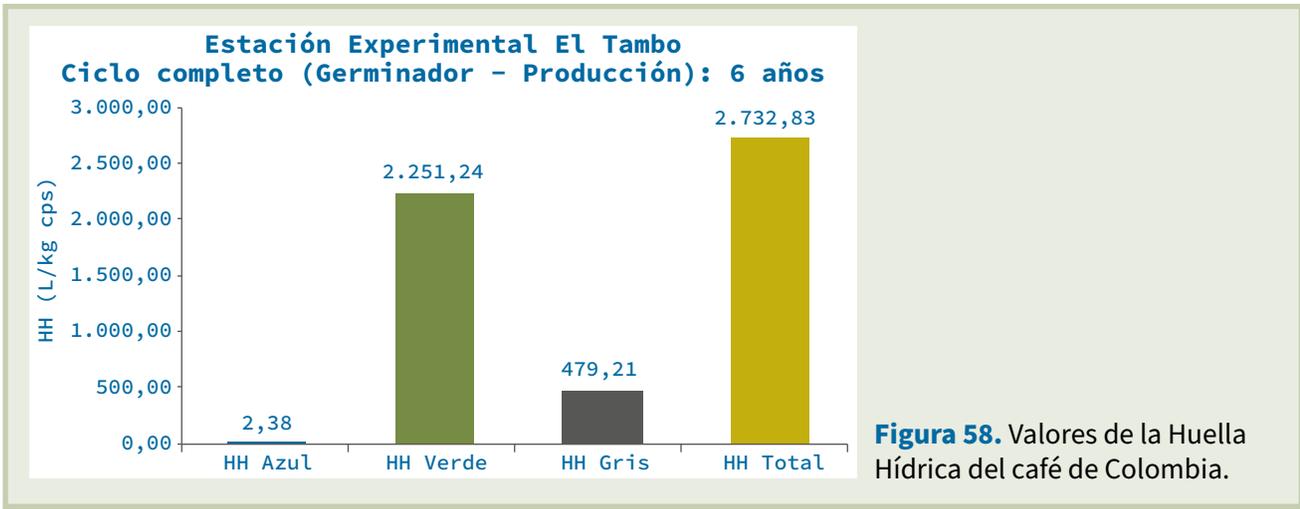
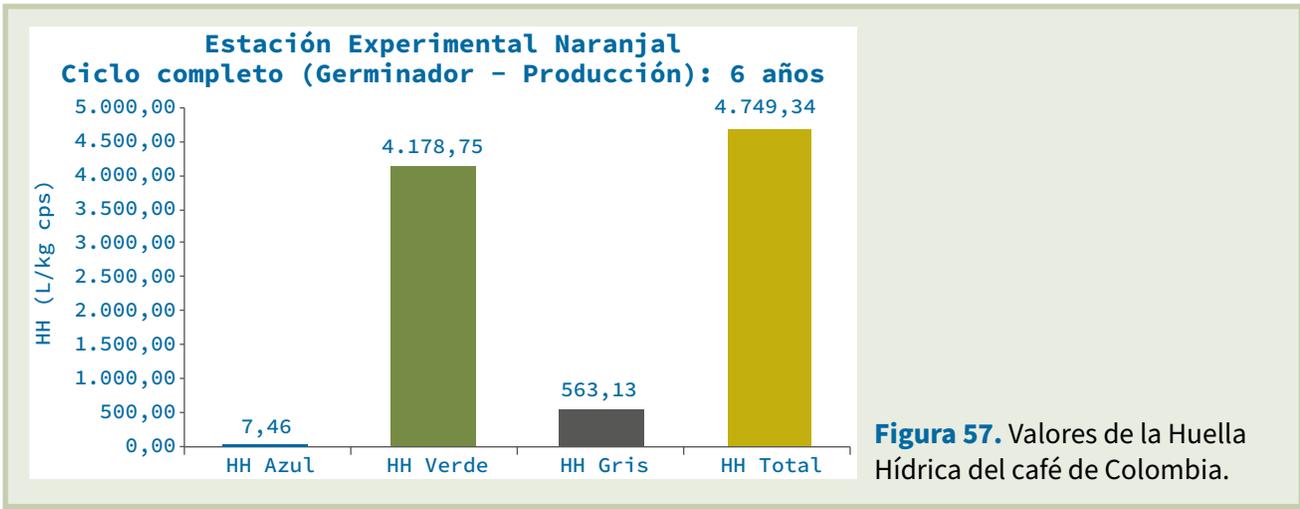
Estación Experimental El Rosario				
Etapa	HH azul	HH verde	HH gris	HH total
Germinador	0,093 L/chapola	0,131 L/chapola	0,111 L/chapola	0,335 L/chapola
Cosecha	1,624 kg cps/árbol	1,624 kg cps/árbol	1,624 kg cps/árbol	1,624 kg cps/árbol
Germinador (1)	0,057 L kg ⁻¹ cps	0,081 L kg ⁻¹ cps	0,068 L kg ⁻¹ cps	0,206 L kg ⁻¹ cps
Almácigo	10,09 L/colino	9,42 L/colino	5,05 L/colino	24,56 L/colino
Cosecha	1,624 kg cps/árbol	1,624 kg cps/árbol	1,624 kg cps/árbol	1,624 kg cps/árbol
Almácigo (2)	6,21 L kg ⁻¹ cps	5,80 L kg ⁻¹ cps	3,11 L kg ⁻¹ cps	15,12 L kg ⁻¹ cps
Levante	0	1.193,16 L m ⁻²	517,48 L m ⁻²	1710,64 L m ⁻²
Cosecha	1,624 kg cps/árbol	1,624 kg cps/árbol	1,624 kg cps/árbol	1,624 kg cps/árbol
Levante (3)	0,00	734,70 L kg ⁻¹ cps	318,65 L kg ⁻¹ cps	1.053,35 L kg ⁻¹ cps
Producción	0,00	1981,95 L m ⁻²	1330,54 L m ⁻²	3312,49 L m ⁻²
Cosecha	1,624 kg cps/árbol	1,624 kg cps/árbol	1,624 kg cps/árbol	1,624 kg cps/árbol
Producción (4)	0,00	1.220,41 L kg ⁻¹ cps	819,30 L kg ⁻¹ cps	2.039,71 L kg ⁻¹ cps
Beneficio	8,00 L kg ⁻¹ cps	0,00	131,04 L kg ⁻¹ cps	139,04 L kg ⁻¹ cps
Total	14,27 L kg⁻¹ cps	1.961,00 L kg⁻¹ cps	1.272,16 L kg⁻¹ cps	3.247,43 L kg⁻¹ cps

(1) se dividió por 4000 semillas germinadas/kg de semilla para obtener el valor de la HH de una chapola que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (1,624 kg cps) para obtener la HH en función de 1 kg cps.

(2) se dividió por 386 colinos obtenidos/bloque para obtener el valor de la HH de un colino que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (1,624 kg cps) para obtener la HH en función de 1 kg cps.

(3) se dividió por la producción del árbol (1,624 kg cps), que ocupaba 1 m², para obtener la HH en función de 1 kg cps.

(4) se dividió por la producción del árbol (1,624 kg cps), que ocupaba 1 m², para obtener la HH en función de 1 kg cps.



De los resultados presentados en las Figuras 57, 58 y 59 se puede apreciar que la HH total del café de Colombia, para un ciclo completo de cultivo siembra nueva - primera renovación por zoca y una densidad de siembra de 10.000 árboles/ha, varió entre 2.732,83 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Tambo y 4.749,34 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental Naranjal. La HH azul alcanzó valores de 2,38 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Tambo, 7,46 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental Naranjal y 14,27 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Rosario. La HH verde alcanzó valores de 1.961,00 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Rosario, 2.251,24 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Tambo y 4.178,75 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental Naranjal. La HH gris alcanzó valores de 479,21 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Tambo, 563,13 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental Naranjal y 1.272,16 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Rosario.

Resultados Huella Hídrica del café de Colombia

En la Tabla 140 y en la Figura 60 se presentan los resultados promedio de la Huella Hídrica para el café de Colombia.

La HH total promedio del café de Colombia, para un ciclo completo de cultivo (siembra nueva - primera renovación por zoca) y una densidad de siembra de 10.000 árboles/ha, evaluada en las tres estaciones experimentales de Cenicafé, fue de 3.537,30 L kg⁻¹ de cps, representando la HH verde un porcentaje del 78,24% (2.767,49 L kg⁻¹ de cps), la HH gris el 21,54% (761,82 L kg⁻¹ de cps) y la HH azul el 0,23% (7,98 L kg⁻¹ de cps).

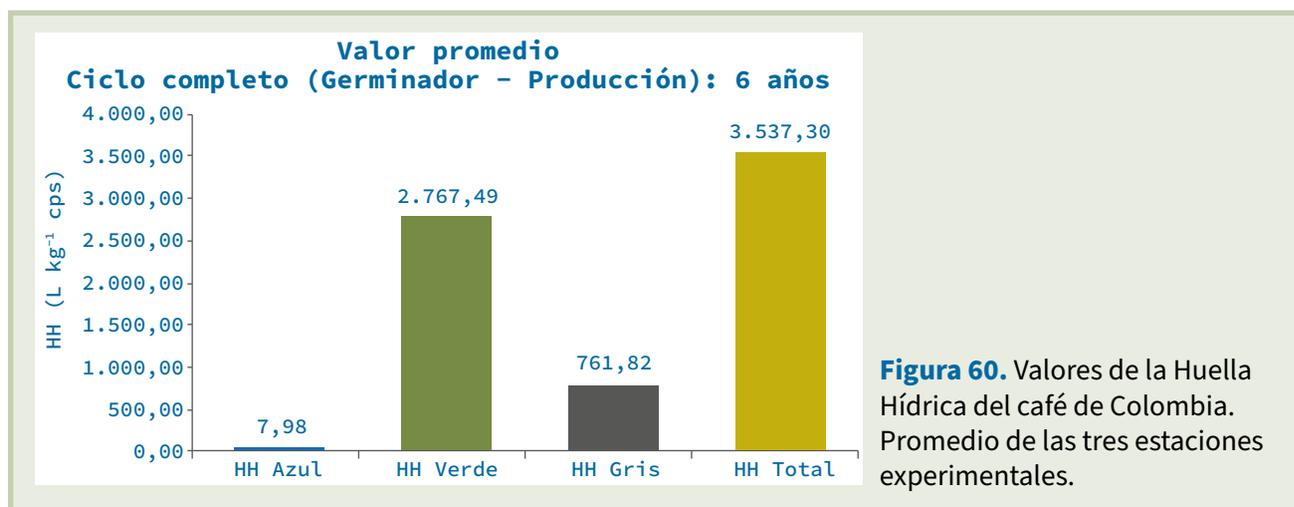


Tabla 140. Valores promedio de la HH del café de Colombia en el ciclo de cultivo de seis años (siembra nueva – primera renovación por zoca). Promedio para las tres estaciones experimentales.

Etapa	HH Azul	HH verde	HH gris	HH total
Germinador	0,069 L/chapola	0,135 L/chapola	0,133 L/chapola	0,336 L/chapola
Cosecha	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol
Germinador (1)	0,042 L kg ⁻¹ cps	0,081 L kg ⁻¹ cps	0,080 L kg ⁻¹ cps	0,202 L kg ⁻¹ cps
Almácigo	5,39 L/colino	10,22 L/colino	3,48 L/colino	19,09 L/colino
Cosecha	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol
Almácigo (2)	3,24 L kg ⁻¹ cps	6,13 L kg ⁻¹ cps	2,09 L kg ⁻¹ cps	11,46 L kg ⁻¹ cps
Levante	0	1.439,06 L m ²	410,20 L m ²	1.849,26 L m ²
Cosecha	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol
Levante (3)	0,00	863,78 L kg ⁻¹ cps	246,22 L kg ⁻¹ cps	1.110,00 L kg ⁻¹ cps
Producción	0,00	3161,24 L m ²	715,00 L m ²	3876,24 L m ²
Cosecha	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol
Producción (4)	0,00	1897,50 L kg ⁻¹ cps	429,17 L kg ⁻¹ cps	2326,67 L kg ⁻¹ cps
Beneficio	4,70 L kg ⁻¹ cps	0,00	84,26 L kg ⁻¹ cps	88,96 L kg ⁻¹ cps
Total	7,98 L kg⁻¹ cps	2.767,49 L kg⁻¹ cps	761,82 L kg⁻¹ cps	3.537,30 L kg⁻¹ cps

(1) se dividió por 3.857 semillas germinadas por 1,0 kg de semilla para obtener el valor de la HH de una chapola que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (1,666 kg de cps) para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

(2) se dividió por 395 colinos obtenidos/bloque para obtener el valor de la HH de un colino que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (1,666 kg de cps) para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

(3) se dividió por la producción del árbol (1,666 kg de cps), que ocupaba 1,0 m², para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

(4) se dividió por la producción del árbol (1,666 kg de cps), que ocupaba 1,0 m², para obtener la HH en función de 1,0 kg de cps.

Expresando la HH en términos de café almendra, para permitir realizar comparaciones con los resultados reportados por otros investigadores, se tiene que la HH total promedio del café de Colombia, para un ciclo completo de cultivo (siembra nueva-renovación) y una densidad de siembra de 10.000 árboles/ha, evaluada en las tres Estaciones Experimentales de Cenicafé, fue de 4.456,72 L kg⁻¹ para el café verde, representando la HH verde un porcentaje del 78,24% (3.486,82 L kg⁻¹), la HH gris el 21,54% (959,84 L kg⁻¹) y la HH azul el 0,23% (10,06 L kg⁻¹).



Consideraciones finales

A continuación, se realiza un resumen y análisis de los resultados obtenidos en la determinación de la huella hídrica del café de Colombia en sus diferentes etapas de cultivo y producción.

Etapa de germinador

La huella hídrica promedio para la producción de una chapola de café fue de 0,336 L/chapola (HH verde del 40,07%, HH azul del 20,49% y HH gris del 39,44%). La menor huella hídrica por chapola de café producida fue para la Estación Experimental Naranjal, con un valor de 0,296 L/chapola (la HH verde representó el 64,11% del total de la HH, la HH azul representó el 23,07% y la HH gris representó el 12,82%). Para la Estación Experimental El Rosario, la HH fue de 0,335 L/chapola (HH verde del 39,12%, HH azul del 27,82% y HH gris del 33,05%). Para la Estación Experimental El Tambo, la HH fue de 0,378 L/chapola (HH verde del 22,08%, HH azul del 12,00% y HH gris del 65,92%).

Para esta etapa el mayor ingreso de agua por precipitación se tuvo en la Estación Experimental Naranjal con un valor de 923,7 L/germinador, seguido de la Estación Experimental El Rosario con un valor de 730,5 L/germinador y de la Estación Experimental El Tambo con un valor de 664,4 L/germinador. A través de la oferta ambiental de las Estaciones Experimentales, durante la etapa de germinación se determinaron los valores de evapotranspiración de referencia, presentando la mayor demanda de agua la Estación Experimental El Tambo (ETo de 3,57 mm), seguido de la Estación Experimental El Rosario (ETo de 3,40 mm) y de la Estación Experimental Naranjal (ETo de 3,24 mm).

Las diferencias en los valores de la huella hídrica para la producción de las chapolas, entre Estaciones Experimentales, estuvieron influenciadas por la oferta ambiental, con mayor ingreso de agua de la lluvia en la Estación Experimental Naranjal, la evapotranspiración de referencia con el valor más alto en la Estación Experimental El Tambo, la producción de biomasa que fue mayor en la Estación Experimental Naranjal, las propiedades físicas de la arena utilizada como sustrato que tuvo mayor retención de agua en la Estación Experimental El Tambo y en las condiciones de manejo de los germinadores donde la mayor cantidad de agua de riego se registró en la Estación Experimental El Rosario.

Una estrategia para disminuir el valor de la huella hídrica azul en la etapa de germinador consiste en la recolección y almacenamiento del agua de la lluvia para realizar el riego de los germinadores en los días que se requiera. Para el caso de la disminución de la huella hídrica gris, una estrategia sería la recolección de los drenados que salen del germinador para reincorporarlos de nuevo cuando se requiera de riego. En este caso es necesario realizar la experimentación para evaluar si los drenados recolectados deben ser tratados o no, antes de ser incorporados a los germinadores, dado que se podría presentar algún potencial efecto adverso de los drenados sobre el desarrollo de las chapolas.

Etapa de almácigo

La huella hídrica promedio para la producción de un colino de café fue de 19,09 L/colino (HH verde del 53,53%, HH azul del 28,24% y HH gris del 18,23%). La menor huella hídrica por colino de café producido fue para la Estación Experimental El Tambo, con un valor de 10,13 L/colino (la HH verde representó el 75,29% del total de la HH, la HH azul representó el 22,25% y la HH gris representó el 2,46%). Para la Estación Experimental Naranjal, la HH fue de 22,57 L/colino (HH verde del 60,27%, HH azul del 16,95% y HH gris del 22,78%). Para la Estación Experimental El Rosario, la HH fue de 24,56 L/colino (HH verde del 38,36%, HH azul del 41,09 y HH gris del 20,55%).

Las diferencias en los valores de la huella hídrica para la producción de los colinos entre Estaciones Experimentales estuvieron influenciadas por la oferta ambiental, al igual que sucedió en la etapa de germinación, con mayor ingreso de agua de la lluvia en los almácigos en la Estación Experimental Naranjal, la evapotranspiración de referencia tuvo mayor valor en la Estación Experimental El Rosario, la producción de biomasa tuvo mayor valor en la Estación Experimental Naranjal, para las propiedades físicas del suelo utilizado como sustrato la mayor retención de agua se registró en la Estación Experimental El Tambo y para las condiciones de manejo de los almácigos la mayor cantidad de agua de riego se registró en la Estación Experimental El Rosario.

Al igual que se recomendó para la etapa de germinador, una estrategia para disminuir el valor de la huella hídrica azul y gris y, por lo tanto, de la huella hídrica total, que puede contribuir a la estandarización de un valor de huella hídrica en la etapa de almácigo, sería la recolección y almacenamiento de agua de la lluvia para realizar posteriormente el riego de los almácigos, en los días que se requiera, así como la recolección de los drenados para reincorporarlos de nuevo al almácigo. En este último caso, es necesario realizar la experimentación para evaluar si los drenados recolectados deben ser tratados o no, antes de ser incorporados a los almácigos, por algún potencial efecto adverso que puedan tener los drenados sobre el desarrollo de los colinos.

Etapa de levante

La HH total promedio de la etapa de levante, evaluada en las tres Estaciones Experimentales de Cenicafé, fue de 1.849,26 L m⁻², representando la HH verde un porcentaje del 77,82% (1.439,06 L m⁻²) y la HH gris el 22,18% (410,20 L m⁻²). La HH total en la etapa de levante varió entre 1.710,64 L m⁻² en la Estación Experimental El Rosario y 1.946,75 L m⁻² en la Estación Experimental Naranjal. La HH verde alcanzó valores de 1.193,16 L m⁻² en la Estación Experimental El Rosario, 1.539,30 L m⁻² en la Estación Experimental Naranjal y 1.584,72 L m⁻² en la Estación Experimental El Tambo. La HH gris alcanzó valores de 305,67 L m⁻² en la Estación Experimental El Tambo, 407,45 L m⁻² en la Estación Experimental Naranjal y 517,48 L m⁻² en la Estación Experimental El Rosario.

Al igual que en las etapas previas de germinador y almácigo, las diferencias en los valores de la huella hídrica en la etapa de levante, entre Estaciones Experimentales, estuvieron influenciadas por la oferta ambiental, con mayor ingreso de agua de la lluvia en los cafetales y mayores valores de la evapotranspiración de referencia, así como las propiedades físicas y químicas del suelo que tuvieron mayor retención de agua, en la Estación Experimental Naranjal.

Etapa de producción

La HH total promedio de la etapa de producción, evaluada en las tres Estaciones Experimentales de Cenicafé, fue de 2.584,16 L m⁻², representando la HH verde un porcentaje del 81,55% (2.107,49 L m⁻²) y la HH gris el 18,45% (476,67 L m⁻²). La HH total en la etapa de producción varió entre 1.863,92 L m⁻² en la Estación Experimental El Tambo y 3.680,22 L m⁻² en la Estación Experimental Naranjal. La HH verde alcanzó valores de 1.321,30 L m⁻² en la Estación Experimental El Rosario, 1.629,36 L m⁻² en la Estación Experimental El Tambo y 3.371,80 L m⁻² en la Estación Experimental Naranjal. La HH gris alcanzó valores de 234,56 L m⁻² en la Estación Experimental El Tambo, 308,42 L m⁻² en la Estación Experimental Naranjal y 887,03 L m⁻² en la Estación Experimental El Rosario.

Las diferencias en los valores de la huella hídrica en la etapa de producción, entre estaciones experimentales, estuvieron influenciadas, al igual que en las etapas anteriores del cultivo, por la oferta ambiental con mayor ingreso de agua de la lluvia en los cafetales de la Estación Experimental Naranjal; la evapotranspiración de referencia fue mayor en la Estación Experimental El Rosario; las propiedades físicas y químicas del suelo tuvieron mayor retención de agua en la Estación Experimental El Tambo.

Etapa de beneficio

La HH total promedio de la etapa de beneficio, evaluada en las tres Estaciones Experimentales de Cenicafé, fue de 88,96 L kg⁻¹ de cps, representando la HH gris un porcentaje del 94,72% (84,26 L kg⁻¹ de cps) y la HH azul el 5,28% (4,70 L kg⁻¹ de cps). La HH total en la etapa de beneficio varió entre 14,86 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental Naranjal y 139,04 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Rosario. La HH azul alcanzó valores de 1,10 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Tambo, 5,00 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental Naranjal y 8,00 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Rosario. La HH gris alcanzó valores de 9,86 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental Naranjal, 112,22 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Tambo y 131,04 L kg⁻¹ de cps en la Estación Experimental El Rosario.

Las diferencias en los valores de la huella hídrica en la etapa de beneficio del fruto, entre estaciones experimentales, estuvieron influenciadas por la tecnología utilizada en el proceso de transformación del fruto de café a café pergamino seco y por el tipo de tecnología empleada para el tratamiento de las aguas residuales generadas. Los menores consumos de agua se

registraron en la Estación Experimental El Tambo, donde se utiliza la tecnología Becolsub, con consumos de agua de $1,1 \text{ L kg}^{-1}$ de cps. La menor huella hídrica gris se registró en la Estación Experimental Naranjal, la cual estuvo influenciada por el tipo de tratamiento que se realiza a las aguas residuales del beneficio, pues en esta Estación Experimental se tiene implementado un sistema de postratamiento, de las aguas residuales del café tratadas anaerobiamente, mediante la utilización de humedales artificiales.

Ciclo completo de producción

La HH total promedio del café de Colombia, para un ciclo de cultivo de cinco años, desde germinador hasta producción, evaluada en las tres Estaciones Experimentales de Cenicafé, fue de $4.329,77 \text{ L kg}^{-1}$ de cps, representando la HH verde un porcentaje del 78,24% ($3.387,53 \text{ L kg}^{-1}$ de cps), la HH gris el 21,53% ($932,34 \text{ L kg}^{-1}$ de cps) y la HH azul el 0,23% ($9,90 \text{ L kg}^{-1}$ de cps). La HH total del café de Colombia varió entre $3.322,89 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental El Tambo y $5.478,92 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental Naranjal. La HH azul alcanzó valores de $3,06 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental El Tambo, $8,77 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental Naranjal y $18,80 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental El Rosario. La HH verde alcanzó valores de $2.676,58 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental El Rosario, $2.746,62 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental El Tambo y $4.762,95 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental Naranjal. La HH gris alcanzó valores de $573,20 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental El Tambo, $707,20 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental Naranjal y $1.625,91 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental El Rosario.

La HH total promedio del café de Colombia, para un ciclo completo de cultivo (siembra nueva - primera renovación por zoca) y una densidad de siembra de 10.000 árboles/ha, evaluada en las tres Estaciones Experimentales de Cenicafé, fue de $3.537,30 \text{ L kg}^{-1}$ de cps, representando la HH verde un porcentaje del 78,24% ($2.767,49 \text{ L kg}^{-1}$ de cps), la HH gris el 21,54% ($761,82 \text{ L kg}^{-1}$ de cps) y la HH azul el 0,23% ($7,98 \text{ L kg}^{-1}$ de cps). Esta HH total varió entre $2.732,83 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental El Tambo y $4.749,34 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental Naranjal. La HH azul alcanzó valores de $2,38 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental El Tambo, $7,46 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental Naranjal y $14,27 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental El Rosario. La HH verde alcanzó valores de $1.961,00 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental El Rosario, $2.251,24 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental El Tambo y $4.178,75 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental Naranjal. La HH gris alcanzó valores de $479,21 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental El Tambo, $563,13 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental Naranjal y $1.272,16 \text{ L kg}^{-1}$ de cps en la Estación Experimental El Rosario.

Expresando la HH en términos de café almendra (cv), para permitir realizar comparaciones con los resultados reportados por otros investigadores, se tiene que la HH total promedio del café

de Colombia, para un ciclo completo de cultivo (siembra nueva - primera renovación por zoca) y una densidad de siembra de 10.000 árboles/ha, evaluada en las tres Estaciones Experimentales de Cenicafé, fue de 4.456,72 L kg⁻¹ cv, representando la HH verde un porcentaje del 78,24% (3.486,82 L kg⁻¹ cv), la HH gris el 21,54% (959,84 L kg⁻¹ de cv) y la HH azul el 0,23% (10,06 L kg⁻¹ cv).

De acuerdo con los resultados obtenidos, expresando la HH del café en litros por unidad de producto, se concluye que el valor que mejor refleja la HH de producción es el que se obtiene considerando todo el ciclo de cultivo, desde la elaboración del germinador hasta la cuarta cosecha, justo antes de realizar la primera renovación del cultivo por zoqueo. **Una determinación de la HH realizada antes de este tiempo sobredimensiona el valor de la HH dado que considera la huella hídrica consumida y contaminada en las etapas anteriores, sin que se haya obtenido la totalidad del producto.**

De igual manera, la HH obtenida para un año específico considerando el consumo de agua y su contaminación apoyados en el área sembrada y la producción (como ocurre en los reportes de los Estudios Nacionales del Agua 2014 y 2018), sobredimensiona el valor obtenido de HH, pues se estarían considerando cafetales de diferentes edades y con diferentes densidades de siembra, sin considerar el ciclo completo de producción (germinador-producción-renovación).

De otra parte, si se tiene en cuenta sólo la producción de un año y las huellas hídricas generadas por esta etapa de producción, se estaría subdimensionando el valor de la HH al no considerar los consumos y contaminaciones de las etapas previas (germinador, almácigo y levante).

De la presente investigación queda claro que, a mayores rendimientos por unidad de área la HH es menor, y que una forma de realizar una gestión integral del recurso hídrico durante el cultivo es tener altas densidades de siembra, y para el caso de la etapa de beneficio, es adoptar el beneficio ecológico con consumo de agua menor a 10 L kg⁻¹ de cps y realizar un tratamiento a las aguas residuales del café procurando cero descargas al suelo y a cuerpos de agua superficiales, lo que permite disminuir en forma significativa las HH azul y HH gris de esta etapa. Para el caso de la HH azul se puede disminuir su valor hasta en más de 100 veces respecto al beneficio convencional, y para el caso de la HH gris se puede disminuir su valor hasta en más de 725 veces respecto al beneficio convencional. Cenicafé a partir de los resultados de sus investigaciones recomienda a los caficultores la siembra de un alto número de plantas por hectárea (hasta 10.000 plantas) y la adopción del beneficio ecológico para mejorar su rentabilidad (Cenicafé, Avance Técnico 255, 1998).

Las variaciones en los valores de la HH reportados en estudios existentes no siempre se deben a la localización o manejo del cultivo, sino que en muchas ocasiones se deben a cuestiones metodológicas y al uso de distintas fuentes de información o incluso por asumir distintas hipótesis de partida.

El uso de información local como el clima, el rendimiento, el manejo del cultivo, la tipología del sistema de beneficio o el tratamiento de efluentes, es esencial para obtener un valor representativo de la HH. De igual forma, una clara definición de los elementos incluidos en el análisis, especialmente en el caso de la HH gris, es imprescindible para obtener valores comparables con otros trabajos.

Los valores de HH verde encontrados en el presente estudio de 3.486,82 L kg⁻¹ cv, son los menores de los reportados en estudios anteriores, tanto a nivel nacional como internacional, que han variado desde valores de 4.378,48 L kg⁻¹ cv (Barragán & Siachoque, 2017) y 25.444 L kg⁻¹ cv (Ideam, 2015) (Tabla 4).

Los valores de HH azul encontrados en el presente estudio de 10,06 L kg⁻¹ cv, están dentro del rango reportado en estudios anteriores que han variado desde 0,7 L kg⁻¹ cv (Ideam, 2019) y 20,28 L kg⁻¹ cv (Ariza & Arévalo, 2018) (Tabla 4).

Los valores de HH gris encontrados en el presente estudio de 959,84 L kg⁻¹ cv, están dentro del rango reportado en estudios anteriores que han variado desde 13,87 L kg⁻¹ cv (Barragán & Siachoque, 2017) y 133.661 L kg⁻¹ cv (Mild Coffee Company Huila et al., 2018) (Tabla 4).

La importancia de los resultados obtenidos en la presente investigación, radica en que se logra determinar, de manera experimental, el valor de la HH total del café de Colombia y los resultados muestran que su valor de 4.456,72 L kg⁻¹ cv es inferior al reportado por otros autores, cuyos valores han variado entre 7.607 L kg⁻¹ cv (Builes, 2013) y 14.566 L kg⁻¹ cv (Mekonnen & Hoekstra, 2010).

Chapagain y Hoekstra (2007) estimaron que se necesitan 140 L de agua para producir una taza de café estándar de 125 mL (conteniendo 7 g de café tostado y molido). Con los resultados obtenidos en la presente investigación, se puede estimar que el valor promedio de agua para producir una taza de café estándar colombiano de 125 mL, es decir, un 73,6% menos del valor que se tenía reportado en la literatura.

A través de la determinación experimental de la huella hídrica del café de Colombia se estima que el valor promedio de agua para producir una taza de café estándar colombiano es de 37 L.



Anexo 1. Preservación de las aguas residuales

Las muestras de agua residual se conservaron, antes de su análisis, de acuerdo con lo condensado en la Tabla 141.

Tabla 141. Preservación de muestras.

Análisis	Material del recipiente	Volumen (mL)	Preservación	Almacenamiento máximo
DQO	Plástico o vidrio	100	Agregar (H ₂ SO ₄) hasta pH ≤ 2	Hasta 28 días
Sólidos totales	Plástico o vidrio	200	Refrigerar	Hasta 7 días
Fosfatos	Vidrio	100	Agregar (H ₂ SO ₄) hasta pH ≤ 2	Hasta 28 días
Nitratos	Plástico o vidrio	200	Agregar (H ₂ SO ₄) hasta pH ≤ 2	Hasta 28 días
Turbiedad	Plástico o vidrio	100	Refrigerar y guardar en oscuridad	Hasta 48 horas

Anexo 2. Métodos de análisis de las aguas residuales

Se utilizaron las metodologías consignadas en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

pH. Se utilizó el método potenciométrico, empleando como sensor un electrodo combinado Referencia InLab 413SG, acoplado a un instrumento de medición portátil (Modelo Seven Go Referencia SG2-FK, Mettler Toledo)

Demanda Química de Oxígeno (DQO). Se determinó por el método de reflujo cerrado, método colorimétrico desarrollado por la HACH y aprobado por la U.S.EPA (HACH, 1988), utilizando un espectrofotómetro HACH referencia DR-6000 y una longitud de onda de 420 nm, para los viales de rango bajo (0 a 150 mg L⁻¹) y de 620 nm para los viales de rango alto (0 a 1.500 mg L⁻¹).

Fosfatos. Se utilizó el método absortométrico del ácido ascórbico de la HACH (aprobado por la U.S.EPA y adaptado del Standard Methods) y el espectrofotómetro DR6000. Rango de medida (0,0 a 2,5 mg L⁻¹ PO₄³⁻) (HACH, 1988). Se determinó como fósforo total. Los resultados del ensayo se midieron a 890 nm.

Nitratos. Se utilizó el método absortométrico de reducción con cadmio, Rango medio, de la HACH y el espectrofotómetro DR6000. Rango de medida (0,0 a 4,5 mg L⁻¹ N_{NO₃⁻}) (HACH, 1988). Los resultados del ensayo se midieron a 400 nm.

Sólidos Totales y Sólidos en Suspensión. Se determinaron por el método gravimétrico (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

Potencial de óxido-reducción. Se determinaron por el método potenciométrico. Equipo multiparámetro HACH HQ-40d. Sondas Intellical.

Conductividad eléctrica. Se determinaron por el método potenciométrico. Equipo multiparámetro HACH HQ-40d. Sondas Intellical.

Anexo 3. Métodos de análisis del suelo

Método de análisis características físicas. Se utilizaron las metodologías consignadas en métodos analíticos del laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2006).

Método de análisis características químicas. pH (potenciométrico-suelo:agua 1:1); N: Calculado; MO: (Walkley-Black – colorimetría); K, Ca, Mg (acetato de amonio 1N pH 7,0-EAA); Al: (KCl 1M-titulación); Fe, Mn, Zn, Cu (EDTA 0,01 M-acetato de amonio 1N pH 7,0- EAA); CIC: (acetato de amonio 1N pH 7,0 titulación); P: (Bray II-colorimetría Bray Kurtz); textura: (Bouyoucos con pirofosfato de sodio-clasificación diagrama triangular de USDA- F (franco), Ar (arcilloso), L (limoso), A (arenoso)).

Anexo 4. Balance hídrico

Balance hídrico en las parcelas experimentales

La precipitación (P), fue la entrada del recurso hídrico a la parcela experimental, que proporcionó agua a la zona radical de las plantas de café, la cual se determinó a través de un pluviómetro.

La evapotranspiración del cultivo (ET_c), la escorrentía superficial (ES) y la percolación profunda (D) fueron procesos que removieron agua del suelo de la parcela.

La escorrentía superficial (ES) correspondió a la fracción de la precipitación que no se infiltró ni se evapotranspiró. En las parcelas experimentales se cuantificó a través de parcelas de escorrentía, las cuales permitieron recolectar el agua que se desplazó superficialmente.

La evapotranspiración de referencia (ET_o) se estimó basado en el modelo CROPWAT de FAO. Involucró información climática, de suelos, así como los parámetros básicos del cultivo de café (fecha de siembra, duración de las etapas de crecimiento y coeficientes de cultivo).

El método de evaluación de la ET_o utilizó información diaria sobre número de horas sol (radiación), temperatura, humedad atmosférica y velocidad de viento y se calculó a través de la ecuación de FAO Penman-Monteith:

$$ET_o = \frac{0,408 \times \Delta \times (R_n - G) + \left(\gamma \times \frac{900}{T + 273} \times u_2 \right) \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 \times u_2)}$$

Donde:

ET_o = evapotranspiración de referencia (mm d^{-1})

R_n = radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

G = flujo del calor de suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

T = temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$)

u_2 = velocidad del viento a 2m de altura (m s^{-1})

e_s = presión de vapor de saturación (kPa)

e_a = presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$ = déficit de presión de vapor (kPa)

Δ = pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

γ = constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

El contenido de humedad del suelo (ΔHS), se calculó con sondas de humedad que se insertaron en el suelo y permitieron monitorear de forma continua la humedad volumétrica del suelo. Es un método no destructivo cuyos registros se almacenaron en un *datalogger*.

La Percolación profunda (D). Las pérdidas por exceso de humedad se obtuvieron con base a la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (capacidad de campo), de tal forma que cuando la precipitación excedió el déficit de agua, el exceso de lámina se asumió como agua perdida por percolación profunda (PP), debido a que la matriz del suelo no es capaz de retenerla.

La ecuación del balance hídrico fue, por lo tanto:

$$(P) - (ET_c + ES + D) = \pm \Delta\text{HS}$$

P = precipitación (lluvia efectiva)

ET = evapotranspiración del cultivo

ES = escorrentía superficial

D = percolación profunda

ΔHS = cambio en el contenido de agua en el suelo

Literatura citada

Allan, J. A. (1992, July). Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible. In Natural Resources Institute (Ed.), Proceedings of the Conference on Priorities for Water Resources Allocation and Management: Natural Resources and Engineering Advisers Conference, Southampton, Hampshire, England.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>.

American Public Health Association [APHA], American Water Works Association [AWWA], & Water Pollution Control Facility [WPCF]. (1992). Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Ediciones Díaz de Santos.

Arévalo, D., Sabogal, J., Lozano, J. G., & Martínez, J. S. (2012). Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica. WWF. <https://www.wwf.org.co/?249918/Una-mirada->.

Ariza, W., & Arévalo, D. (2018). 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, 9(2), 337-353. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2284>.

Barragán Machado, M. A., & Siachoque García, R. S. (2017). Evaluación de la huella hídrica de los sistemas de producción agrícola y pecuaria predominantes en la microcuenca la plata [Tesis de pregrado]. Universidad del Tolima. <http://repository.ut.edu.co/handle/001/2373>.

Builes, E. D. (2013). Cuantificación y análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca del río Porce [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de Colombia.

Castaño, A. M., & García, J. C. (2018). Desarrollar e inter-comparar modelos de predicción de crecimiento y producción de cultivos como herramienta para determinar la vulnerabilidad del sector agrícola frente a la variabilidad y el cambio climático – WP5. Informe final. Red Interinstitucional de Cambio Climático y Seguridad Alimentaria de Colombia (Ricclisa).

Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable [CADIS]., Embajada de Suiza en Colombia., Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo [COSUDE]., Martínez, A., Chargoy, J., Puerto, M., Suppen, N., Rojas, D., Alfaro, S., Ayes, D., Barrantes, L., Carrasco, L., Castro, J., Charlón, V., Civit, B., Conza, A., Díaz, C., Díaz, L., Farell C., . . . Villarraga, J. (2016). Huella de Agua (ISO 14046) en América Latina, análisis y recomendaciones para una coherencia regional. <https://www.shareweb.ch/site/Suiz-Agua-Colombia/Documents/Huella%20Agua%20ISO%2014046%20America%20Latina.pdf>.

Centro Nacional de Investigaciones de Café [Cenicafé]. (1998). Doce maneras de mejorar los ingresos en las fincas cafeteras. *Avances Técnicos Cenicafé*, 255, 1–8.

Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2003). Value of Water Research Report Series No. 15: The water needed to have the Dutch drink coffee. Unesco-IHE. <https://www.waterfootprint.org/media/downloads/Report15.pdf>.

Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2007). The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. *Ecological economics* 64(1), 109-118.

Cobos, D., & Chambers, C. (2009). Calibrating ECH2O soil moisture sensors: Application Note. Meter Group Inc.

Corporación Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia [CTA]., Good Stuff International [GSI-LAC]., Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación [COSUDE]., Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2015). Evaluación multisectorial de la huella hídrica en Colombia: Resultados por subzonas hidrográficas en el marco del Estudio Nacional del Agua 2014. Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023272/HH_ENA2014.pdf.

Decagon Devices. (2014): 5TE: Water Content, EC and Temperature Sensor: Operator's Manual. 13509 Decagon Devices Inc.

Falkenmark, M. (2003). Tec Background Papers No. 9: Water management and ecosystems: Living with change. Global Water Partnership. <http://hdl.handle.net/10535/4993>.

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2004). Cartilla Cafetera 4: Germinadores y Almácigos de café. Cenicafé.

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2020, agosto 14). Estadísticas cafeteras. <https://federaciondefcafeteros.org/wp/estadisticas-cafeteras/>.

Franke, N. A., Boyacioglu, H., & Hoekstra, A. Y. (2013). Value of Water Research Report Series No. 65: Grey water footprint accounting Tier 1 supporting guidelines. Unesco-IHE. https://waterfootprint.org/media/downloads/Report65-GreyWaterFootprint-Guidelines_1.pdf.

Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental. (2015). Agua y medio ambiente: un prontuario para la toma de decisiones. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2015/03/PRONTUARIO-AGUA-Interactive.pdf>.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assesment manual: Setting the global standard. Earthscan. <https://waterfootprint.org/en/resources/publications/water-footprint-assessment-manual/>.

Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2002). Value of Water Research Report Series No. 11 Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. IHE Delft. <https://www.waterfootprint.org/media/downloads/Report11.pdf>.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2019). Estudio Nacional del Agua 2018. Ideam. <https://cta.org.co/descargables-biblionet/agua-y-medio-ambiente/Estudio-Nacional-del-Agua-2018.pdf>.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. Ideam.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2013)- Ideam. Hoja metodológica del indicador índice de calidad del agua: Sistema de indicadores ambientales de Colombia, indicadores de calidad del agua superficial. Bogotá. http://www.ideam.gov.co/documents/24155/125494/36-3.21_HM_Indice_calidad_agua_3_FI.pdf/9d28de9c-8b53-470e-82ab-daca2d0b0031.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2006). Métodos analíticos del laboratorio de suelos (6ta ed.). IGAC.

International Organization for Standardization [ISO]. (2014). Gestión ambiental —

Huella de agua — Principios, requisitos y directrices (ISO Standard No.14046:2014). <https://www.iso.org/standard/43263.html>.

Jaramillo-Robledo, A., & Cháves-Córdoba, B. (1999). Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) al sol y bajo sombra. *Revistas Cenicafé*, 50(2), 97-105. <http://hdl.handle.net/10778/4216>.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2010). Value of Water Research Report Series No. 47: The green, blue and grey water footprint of crops and derived crops products. Volume 2: Appendices. Unesco-IHE. <https://www.waterfootprint.org/media/downloads/Report47-WaterFootprintCrops-Vol2.pdf>.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577-1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>.

Mild Coffee Company Huila., Gobernación del Huila., Universidad Sur Colombiana., Universidad Cooperativa de Colombia., Servicio Nacional de Aprendizaje Sena., The Mild Coffee Company N.V., & Welly, B.V. (2018). La huella hídrica como indicador que contribuye a la sostenibilidad de la caficultura: Recomendaciones de manejo. Mild Coffee Company Huila.

Ministerio de Agricultura de Colombia. (1984). Decreto 1594 de 1984 por la cual se reglamenta parcialmente el título I de la ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto-Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegralDelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_1594_de_1984.pdf.

Ramírez, V. H., & Jaramillo-Robledo, A. (2007). Distribución de la lluvia en cuatro coberturas vegetales de la zona andina colombiana. *Investigaciones de Unisarc*, 5(1), 19-33. http://registro.unisarc.edu.co/public/a-publicaciones/vol5_1.pdf.

Rees, W., & Wackernagel, M. (1996). Urban ecological footprints: Why cities cannot be sustainable—And why they are a key to sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 16(4), 223-248. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(96\)00022-4](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(96)00022-4).

Rodríguez-Valencia, N. (2011). Memorias técnicas, diseño y planos de los sistemas de tratamiento para las aguas residuales (STAR) de la Estación Experimental Naranjal. *Disciplina Calidad y Manejo Ambiental. Cenicafé*.

Rodríguez-Valencia, N. (2011). Memorias técnicas, diseño y planos de los sistemas de

tratamiento para las aguas residuales (STAR) de la Estación Estación Experimental El Rosario. *Disciplina Calidad y Manejo Ambiental*. Cenicafé.

Rodríguez-Valencia, N. (2011). *Memorias técnicas, diseño y planos de los sistemas de tratamiento para las aguas residuales (STAR) de la Estación Estación Experimental El Tambo*. *Disciplina Calidad y Manejo Ambiental*. Cenicafé.

Rojas, J. M., Rodríguez, N., Romero, M. A., García, A., Montes, M. A., & Quintero, L. V. (2018). *Guía para la evaluación de la huella hídrica del café en Colombia*. Proyecto GIA. Cenicafé.

Rosenbaum, U., Huisman, J. A., Weuthen, A., Vereecken, H., & Bogaen, H. R. (2010). Sensor-to-Sensor Variability of the ECHO EC-5, TE, and 5TE Sensors in Dielectric Liquids. *Vadose Zone Journal*, 9(1), 181-186. <https://doi.org/10.2136/vzj2009.0036>.

Ruelle, P., & Laurent, J. P. (2008). CS616 (CS615) water content reflectometers. In S. R. Evett, L. K. Heng, P. Moutonnet, M.L. Nguyen, (Eds.), *Field Estimation of Soil Water Content: A Practical Guide to Methods, Instrumentation, and Sensor Technology* (pp. 101-111). International Atomic Energy Agency IAEA. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-30_web.pdf.

Starr, J. L., & Paltineanu, I. C. (2002). *Methods for measurement of soil water content: capacitance devices*. *Methods of soil analysis: Part 4 Physical Methods*. Soil Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc. USDA ARS. <https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=114621>.

Zambrano, D. A., Isaza, J. D. (1998). *Demanda química de oxígeno y nitrógeno total, de los subproductos del proceso tradicional de beneficio húmedo del café*. *Revista Cenicafé*, 49(4), 279-289.

Zárate Torres, E., Fernández Poulussen, A., & Kuiper, D. (2017). *Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica*. IICA. <http://repositorio.iica.int/handle/11324/2996>.



**Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia**

www.cenicafe.org



ISBN: 978-958-8490-73-1



9 789588 490731