



Tecnología de filtros verdes para el manejo, tratamiento y cero descargas de las aguas residuales de la finca cafetera

▪ Nelson Rodríguez V. ▪ Laura Vanessa Quintero Y. ▪ Samuel A. Castañeda





Tecnología de filtros verdes para el manejo, tratamiento y cero descargas de las aguas residuales de la finca cafetera

Nelson Rodríguez V.* Laura Vanessa Quintero Y. ** Samuel A. Castañeda***

* 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>

*** Samuel Castañeda, Auxiliar de Investigación, Poscosecha. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Cenicafé.

Como citar:

Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L., & Castañeda, S. A. (2022).

Tecnología de filtros verdes para el manejo, tratamiento y cero descargas de las aguas residuales de la finca cafetera. Cenicafé.

<https://doi.org/10.38141/cenbook-0029>



Comité Nacional

Ministro de Hacienda y Crédito Público
José Antonio Ocampo Gaviria

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural
Cecilia López Montaña

Ministro de Comercio, Industria y Turismo
Germán Umaña Mendoza

Director del Departamento Nacional de Planeación
Jorge Iván González

Representante del Gobierno en Asuntos Cafeteros
Marcela Urueña Gómez

Período 1° enero/2019 - 31 diciembre/2022
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)
Luis Javier Trujillo Buitrago (Tolima)
Camilo Restrepo Osorio (Valle)

Gerente General
Roberto Vélez Vallejo

Gerente Administrativo y Financiero
Juan Camilo Becerra Botero

Gerente Comercial
Juan Camilo Ramos Mejía

Gerente Técnico
Hernando Duque Orrego

Director Investigación Científica y Tecnológica
Álvaro León Gaitán Bustamante

Créditos

Comité Editorial

Pablo Benavides M.
Ph.D. Ing. Agrónomo. Entomología, Cenicafé

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

José Ricardo Acuña Z.
Ph.D. Biólogo. Fisiología Vegetal, Cenicafé

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

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

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

Diseño
Carmenza Bacca R.

Dibujos
Carmenza Bacca R.
Óscar J. Loaiza E.

Fotografías
Archivo Cenicafé

Impresión
Capital Graphic S.A.S.

ISBN 978-958-8490-63-2
ISBN 978-958-8490-64-9 (En línea)
DOI 10.38141/cenbook-0029

2022 - FNC - Cenicafé - FoNC



Contenido

Presentación	7
Introducción	11
Sistemas de tratamiento natural	15
Filtros verdes	35
Investigaciones en filtros verdes para el tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café	55
Investigaciones en filtros verdes para lograr cero descargas de las aguas residuales del beneficio del café	103
Diseño y construcción de un filtro verde con cero descargas (zld) para las aguas residuales del beneficio del café	181

Contenido

Implementaciones a escala de campo de filtros verdes con cero descargas (zld)	199
Actividades de mantenimiento para filtros verdes con cero descargas (zld)	215
Consideraciones finales	223
Glosario	227
Literatura citada	231

Agradecimientos

Dr. Carlo Conforto Galli, Technical Manager Water Resources Nestlé
Dr. Ángel de Miguel García, Wageningen University and Research, Environmental Research
Ing. Carlos Mario Ospina, Estación Experimental El Rosario (Cenicafé)
Ing. John Félix Trejos, Ing. Melsar Santamaría, Estación Experimental Naranjal (Cenicafé)
Ing. Carlos Roberto Ariza, Estación Experimental San Antonio (Cenicafé)
Ing. Myriam Cañón, Estación Experimental La Trinidad (Cenicafé)
Dr. Luis Fernando Salazar, Ing. Luz Adriana Lince, Disciplina Suelos (Cenicafé)
Ing. Carlos Alfonso Tibaduiza Vianchá, Disciplina Poscosecha (Cenicafé)
Personal de la Cooperativa de Acción Plus
Profesionales Andrés Felipe Osorio Ocampo y Gustavo Adolfo Gómez Zuluaga, técnico
Walter Mauricio Osorio Hernández que formaron parte del Programa Gestión Inteligente
del Agua.

Presentación

Los sistemas de tratamiento natural de aguas residuales son aquellos en los cuales el agua a tratar interactúa con el recurso suelo, con la atmósfera, con la vegetación viva y con microorganismos, por lo que se encuentra expuesta a procesos físicos, químicos, biológicos y microbiológicos que actúan en su depuración. Dentro de estos sistemas naturales se incluyen los sistemas de aplicación al suelo (baja carga, infiltración rápida y flujo superficial) y los sistemas acuáticos (humedales naturales y artificiales y sistemas de plantas acuáticas flotantes).

El uso de los sistemas de tratamiento natural por aplicación al suelo de las aguas residuales, con el propósito de lograr su depuración, fue una práctica utilizada en el siglo pasado en diferentes países. En Estados Unidos data del año 1880 y en Europa la aplicación directa al suelo del agua residual era una práctica común, en un primer intento de control de la contaminación (Metcalf & Eddy, 1995). No obstante, en la primera mitad del siglo XX, el desarrollo de tecnologías de tratamiento convencionales que involucraron diferentes procesos físicos, químicos y biológicos para el tratamiento de las aguas residuales tanto domésticas como agroindustriales dejaron relegados a un segundo plano a estos sistemas de tratamiento natural. Actualmente, la necesidad de implementar sistemas económicos de tratamiento para las aguas residuales y las exigencias de la legislación medioambiental, solicitando un mayor número de parámetros de calidad a monitorear en el agua tratada y estableciendo unos valores de calidad cada vez más bajos para estos parámetros antes de su descarga, asociado a los costos de disposición final de los vertimientos, han propiciado un resurgimiento de los sistemas de tratamiento al suelo.

Los filtros verdes son un sistema de tratamiento natural de agua residual, que trata de maximizar el potencial del suelo y de la vegetación para eliminar los contaminantes presentes en un efluente. Su funcionamiento se basa en la aplicación de aguas residuales a una superficie con vegetación, ya sea de tipo forestal o de tipo herbáceo, para aprovechar la capacidad del sistema suelo-vegetación-microorganismos para degradar los contaminantes. El efluente, una vez entra en contacto con el suelo, se ve sometido a múltiples procesos, entre los que destacan procesos de evapotranspiración, filtración, biodegradación, adsorción y captación de nutrientes por parte de la vegetación. Si el sistema ha sido bien diseñado, el agua debe salir con una calidad que cumpla con la normativa del vertido. Si, adicionalmente, el efluente tratado es recolectado y recirculado sobre el filtro verde puede lograrse que no se genere vertimiento, lo que se conoce como cero descargas.

En la actualidad, el concepto de cero vertidos o cero descargas ha permitido una mayor adopción de los sistemas de tratamiento natural dado que, su capacidad de depuración, permite



obtener un agua tratada con unas características de calidad que la hacen apta para el reúso en actividades agrícolas. De otra parte, cuando la aplicación del reúso de las aguas tratadas no pueda realizarse por aspectos económicos, la recirculación del efluente en los mismos sistemas de tratamiento natural puede permitir su total retención y evapotranspiración, sobre todo en los sistemas de aplicación al suelo de baja carga y flujo superficial (a los que pertenecen los filtros verdes), logrando el cero vertido.

La normativa colombiana para vertimientos a cuerpos de agua superficial condensada en la Resolución 631 del 2015 (MADS, 2015), establece los parámetros y valores de calidad que deben tener tanto las aguas residuales domésticas como las provenientes beneficio del café; para lograr estos valores de calidad es imprescindible la implementación de un sistema de tratamiento. Adicional, como se presenta un vertido a cuerpos de agua, la normativa establece la necesidad de tramitar un permiso de vertimiento y la presentación anual, ante la autoridad ambiental, de las caracterizaciones del mismo realizadas por un laboratorio acreditado, lo cual representa un costo anual cercano a \$ 1 millón COP, por evento, adicional al pago de la tasa retributiva por el impacto sobre el agua superficial de la contaminación aún contenida en el vertido, de acuerdo a lo estipulado en la Resolución 2667 del 2012 (MADS, 2012).

En lo que respecta a vertimientos al suelo, es necesario cumplir con lo estipulado en la Resolución 699 del 2021 (MADS, 2021) para aguas residuales domésticas y en el decreto 50 del 2018 (MADS, 2018) para las no domésticas (aguas residuales del beneficio del café), en ambos casos es necesario implementar un sistema de tratamiento y el costo de la caracterización del vertido aunado al costo de la caracterización del suelo intervenido se estima que superan los \$ 3 millones COP.

Para el caso del reúso de las aguas residuales en actividades agrícolas, debe darse cumplimiento a lo estipulado en la Resolución 1256 del 2021 (MADS, 2021), en la cual se establece la caracterización de 37 parámetros y el cumplimiento de valores de calidad en el agua a reusar siendo necesario, para el caso de las aguas residuales domésticas y de las del beneficio del café, la implementación de sistemas de tratamiento, estimando el costo de la caracterización en cerca de \$ 3 millones COP.

Para el tratamiento de las aguas residuales del café, Cenicafé desarrolló los Sistemas Modulares de Tratamiento Anaerobio (Tecnología SMTA) (Zambrano et al., 2009), consistente en un tratamiento biológico, con la generación de vertimientos que permiten cumplir con lo dispuesto en la normativa ambiental vigente para descargas a cuerpos de agua superficiales y al suelo. Sin embargo, los costos legales ambientales relacionados con la adquisición del permiso de vertimientos, la caracterización del vertido, la visita de la autoridad ambiental y el pago de la tasa retributiva, son significativos, motivo por el cual se ha investigado en los sistemas de tratamiento natural, con énfasis en los filtros verdes, con la finalidad de lograr la cero descarga y de esta forma eliminar los costos legales ambientales de la ecuación de costos de la producción de café en la finca.

En esta publicación se describen los sistemas de tratamiento natural y se presentan los resultados obtenidos en las investigaciones realizadas por Cenicafé utilizando filtros verdes como sistemas de tratamiento para las aguas residuales del beneficio del café y filtros verdes impermeabilizados con geomembrana, tipo invernadero, con recirculación completa de sus efluentes, como estrategia para lograr cero descargas. De igual forma, se presentan los pasos para el diseño, dimensionamiento, construcción, operación y mantenimiento de los filtros verdes utilizados para el manejo y tratamiento de las aguas residuales de la finca cafetera.

Introducción

En los sistemas de tratamiento natural de las aguas residuales, el efecto depurador de las mismas se produce por los componentes del medio natural (atmósfera, suelo, vegetación, microorganismos), sin la necesidad de adicionar productos químicos o inoculantes microbiológicos.

Los avances más recientes en la utilización de sistemas de tratamiento natural para las aguas residuales lo constituyen: el uso de humedales artificiales con plantas emergentes, los sistemas de tratamiento acuáticos con plantas flotantes y los filtros verdes. El interés en el uso de estas tecnologías surgió como consecuencia del rendimiento depurador observado en los humedales naturales.

Los sistemas de tratamiento natural se caracterizan por su bajo consumo energético, menor producción de lodos y fácil mantenimiento, aunque presentan como desventaja una mayor necesidad de área por unidad de volumen de agua tratada, respecto a los tratamientos convencionales. Otro factor limitante es que su implementación involucra a las aguas residuales biodegradables (domésticas y agrícolas, básicamente), dado que si contienen compuestos tóxicos, como es el caso de las de origen industrial, estos podrían quedar retenidos en la matriz del suelo generando su intoxicación, siendo necesaria la previa eliminación de las sustancias peligrosas del agua antes de ser llevadas a los sistemas de tratamiento natural.

Los filtros verdes son un tipo de sistema de tratamiento natural en el cual se realiza la aplicación controlada del agua a tratar sobre un terreno sembrado con vegetación (arbórea o forrajera), con ello se consigue, además de la depuración del agua, el crecimiento de la especie vegetal establecida. La depuración del agua se realiza mediante la acción conjunta del ecosistema atmósfera-vegetación-agua-suelo-microorganismos, por medio de procesos físicos (sedimentación, filtración), químicos (precipitación, óxido-reducción) y biológicos (degradación de la materia orgánica). Con este tipo de sistemas puede lograrse una eliminación de la materia orgánica, medida en términos de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST), mayor al 90% en aguas residuales domésticas y superior al 80% en aguas residuales del café pre-tratadas.

La tecnología de los filtros verdes ha sido utilizada para el tratamiento de múltiples efluentes, desde domésticos (Miguel et al, 2014), industriales (Bustamante, 1990) hasta lixiviados de vertederos (Zupanc & Justin, 2010). Este tipo de sistemas han sido utilizados para tratar efluentes

relativamente similares al de las aguas residuales del beneficio del café, como los procedentes del procesamiento del aceite de oliva (Azbar et al., 2004) y de otras industrias alimentarias (Aryal & Reinhold, 2015), todos ellos caracterizados por una carga orgánica elevada y, en muchos casos, bajos valores de pH.

Por lo general, el vertido de los efluentes procedentes de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café se realiza de forma directa sobre una quebrada o cuerpo receptor o sobre el recurso suelo, ya sea mediante la infiltración del efluente en terrenos con elevada permeabilidad o mediante la aplicación del mismo al terreno o a una zona boscosa (por ejemplo, un guadual). Se conoce que el suelo puede actuar como un reactor, degradando parte de los contaminantes orgánicos aún presentes en las aguas residuales y atenuando en parte el impacto del vertido.

Es por ello, que el uso de los filtros verdes para el tratamiento de las aguas residuales del café tiene un gran potencial de aplicación, al ser una tecnología robusta, de bajo costo de implementación, con bajos requerimientos de operación y mantenimiento, que puede ser fácilmente adaptable al paisaje cafetero. La tecnología de los filtros verdes, puede constituirse en una alternativa para reducir los costos de tratamiento (disminución en infraestructura y mantenimiento) y en el caso de recircular los efluentes de los mismos, se logra su retención y evapotranspiración total. Con lo anterior, se eliminarían completamente los costos legales ambientales relacionados con el manejo de las aguas residuales, contribuyendo a la rentabilidad de la caficultura. Para ello, es necesario impermeabilizar el suelo en el cual se encuentra instalado el filtro verde, implementar un techo tipo invernadero y recircular completamente el agua que percola, con el fin de lograr cero descargas.

Actualmente, la tendencia mundial de muchas empresas en la gestión del recurso hídrico, es la adopción del modelo de ciudades esponja, que consiste en una mejor administración del mismo al realizar la cosecha de la lluvia y promover la filtración del suelo para el tratamiento de las aguas residuales e implementar programas de uso eficiente y ahorro (PUEAA), con el fin de reducir los volúmenes de aguas residuales. Modelos como ZLD, cero descargas líquidas, y ZWD, cero descargas de agua (por sus siglas en inglés), son un apoyo importante para lograr una eficiente gestión y evitar el deterioro de los recursos naturales, a pesar de los requerimientos que se puedan presentar en energía e infraestructura (Ramos et al., 2021).

El reciclaje y la reutilización de las aguas residuales puede minimizar la explotación de nuevas fuentes hídricas y de nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, los cuales están presentes en las mismas y se pueden aprovechar en la producción agrícola. La escasez de los recursos hídricos y de nutrimentos está llevando a la sociedad a implementar la estrategia de la recuperación de los recursos. El modelo ZLD es un sistema compuesto por una variedad de tecnologías avanzadas en el tratamiento de las aguas residuales destinadas a mejorar la eficiencia en el uso del agua y su recuperación. La tecnología ZLD ha ganado más atención en las últimas décadas,

su desarrollo comenzó en Estados Unidos, seguido de China, India y el resto del mundo. Es un proceso a través del cual no se realizan vertidos al medio ambiente, ya que las aguas una vez tratadas y cumpliendo con los estándares de calidad requeridos, se reutilizan con fines agrícolas e industriales (Yaqub & Lee, 2019).

Aunque los diferentes modelos para la gestión integral del agua fueron diseñados para áreas urbanas pueden ser aplicados en las industrias y en la producción agrícola y ganadera, involucrando los requerimientos establecidos en las normativas ambientales de cada país.



Sistemas de tratamiento natural

Los sistemas de tratamiento natural, para manejar las aguas residuales, son aquellos en los cuales interactúa el agua a tratar con el suelo, la vegetación, los microorganismos y la atmósfera. En este tipo de sistemas se presentan procesos físicos, químicos y biológicos que actúan en el agua. Los sistemas de tratamiento natural se diseñan para aprovechar todos estos procesos con el objetivo de manejar las aguas residuales (Metcalf & Eddy, 1995).

Los procesos que intervienen en los sistemas de tratamiento natural incluyen muchos de los utilizados en las plantas de tratamiento (sedimentación, filtración, transferencia de gases, adsorción, intercambio iónico, precipitación química, oxidación, reducción química, y conversión y descomposición biológicas), junto con procesos propios de los sistemas de tratamiento natural tales como la fotosíntesis, la foto-oxidación y la asimilación de nutrientes por parte de la vegetación (Metcalf & Eddy, 1995).

Los sistemas de tratamiento natural son capaces de eliminar, hasta cierto punto, casi todos los constituyentes del agua residual considerados como contaminantes, entre los que se encuentran los sólidos suspendidos, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, elementos traza, compuestos orgánicos traza y microorganismos (Metcalf & Eddy, 1995).

Los sólidos suspendidos se eliminan a su paso por el suelo, por procesos de sedimentación (considerando las bajas velocidades de circulación del agua) y por filtración a través de la vegetación y de la interfase del suelo; la materia orgánica, particulada y soluble, se degrada y estabiliza en el suelo, fundamentalmente en la capa superior, mediante tratamiento biológico realizado por microorganismos aerobios ya que ésta descomposición aerobia tiende a ser más rápida y completa que la anaerobia (Metcalf & Eddy, 1995).

El nitrógeno mineral se elimina o estabiliza mediante la inmovilización en las células microbianas, la absorción de iones amonio o nitrato por las plantas, la volatilización de amonio a pH alcalino, los procesos de nitrificación - desnitrificación y la lixiviación de nitratos. El fósforo se inmoviliza en las células microbianas, es absorbido por parte de la vegetación, precipitado en compuestos inorgánicos insolubles o adsorbido por las partículas de arcilla del suelo (Martín, 1993). La eliminación de metales en el agua a tratar en el sistema suelo - vegetación, se realiza mediante procesos de insolubilización, adsorción en arcilla e inmovilización en las raíces de las plantas. Finalmente, la eliminación de bacterias, virus, protozoos y helmintos se realiza por procesos de filtración, adsorción, desecación, radiación, predación, competencia por el alimento y exposición a otras condiciones adversas (Martín, 1993).

Dentro de los sistemas de tratamiento natural se incluyen: 1. Los sistemas de aplicación al suelo: sistemas de baja carga, de infiltración rápida y de flujo superficial, y 2. Los sistemas acuáticos: humedales naturales y artificiales, y sistemas de tratamiento mediante plantas acuáticas.

En varios países productores de cafés suaves, ya sea por tener una legislación ambiental menos estricta en lo relacionado al recurso hídrico o por problemas de déficit hídrico o como reciclaje

de nutrimentos, se permite la aplicación al suelo de aguas residuales del café sin tratamiento o con algún tipo de tratamiento físico, químico o biológico, para retirar materia orgánica o carga microbiana, sobre las áreas cultivadas. Varios estudios han reportado las bondades e inconvenientes de esta práctica (Chandrasekhar, 1974; CRF, 1977; Mora, 1978; Lardé, 1984; Batista et al., 2005; Soares et al., 2007).

Sistemas de aplicación al suelo

Los sistemas de aplicación de aguas residuales al suelo consisten en la aplicación controlada del agua a tratar sobre una superficie delimitada del suelo con el objetivo de alcanzar un grado de depuración a partir de los procesos físicos, químicos y biológicos que se producen cuando interactúan sobre el agua residual, la atmósfera, el suelo, la vegetación y los microorganismos presentes tanto en el suelo como en el agua a tratar y asociados a la vegetación establecida en dichos sistemas.

Sistemas de baja carga

Descripción. Constituyen el proceso de tratamiento natural más común hoy en día; consisten en la aplicación controlada del agua residual sobre un terreno con vegetación, para conseguir el grado necesario de tratamiento y el crecimiento de la vegetación existente. El agua aplicada puede evapotranspirarse o percolar vertical y horizontalmente en el terreno. Aquella que pueda fluir en superficie se recoge y se vuelve a aplicar al sistema. En la mayoría de los casos los efluentes alcanzarán las aguas subterráneas, pero en algunos casos, pueden ser interceptados por aguas naturales superficiales o recuperados mediante sistemas de drenaje o pozos. El caudal aplicado por unidad de superficie de terreno (carga hidráulica) y la elección y control del tipo de vegetación dependen de los objetivos del sistema y de las condiciones particulares del sitio (Metcalf & Eddy, 1995).

Éstos sistemas abarcan una gran variedad de sistemas de tratamiento en el suelo, desde la irrigación en laderas hasta la irrigación agrícola y forestal (Crites & Tchobanoglous, 2000). El valor relativamente bajo de las cargas aplicadas, junto con la presencia de vegetación y el ecosistema activo del suelo, contribuyen a que tengan el mayor potencial de tratamiento natural (Metcalf & Eddy, 1995).

Clasificación. Los sistemas de baja carga suelen clasificarse en Tipo 1 y Tipo 2, en función de los objetivos que se pretenden alcanzar. Se considera que un sistema de baja carga pertenece al Tipo 1 si el principal objetivo es el tratamiento del agua residual y, por lo tanto, la carga hidráulica aplicada no está controlada por la demanda de agua de la vegetación, sino por un parámetro de diseño (permeabilidad del terreno o carga de constituyentes). En cambio, el principal objetivo de los sistemas del Tipo 2 es la reutilización del agua residual, mediante producción de cosechas o por riego de espacios verdes, y suelen conocerse como sistemas de irrigación con agua residual o sistemas de irrigación de cultivos (Metcalf & Eddy, 1995).

Características del sitio de implementación. Las principales características que deben tenerse en cuenta en la selección del sitio para la implementación de sistemas de baja carga son: topografía (pendiente y relieve), escorrentía, tipo de suelo, aguas subterráneas, usos del suelo, condiciones climáticas y normativa sobre tratamiento y reúso de aguas residuales tratadas (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Aplicación del agua a tratar. El agua residual puede aplicarse tanto a cultivos como a vegetación (incluidos terrenos forestales). Para aplicar las aguas existen tres métodos fundamentales: aspersión, surcos y encharcamiento. El caudal suele oscilar entre 1 y 11 cm/semana y para asegurar la aerobiosis del suelo es necesario mantener intermitentemente períodos secos; en general, puede considerarse como mínimo la relación 3 - 4 a 1 de los períodos secos a los regados. En algunos casos es necesario disponer de depósitos o lugares de reserva para períodos en los que la aplicación no pueda ser inmediata (Martín, 1993).

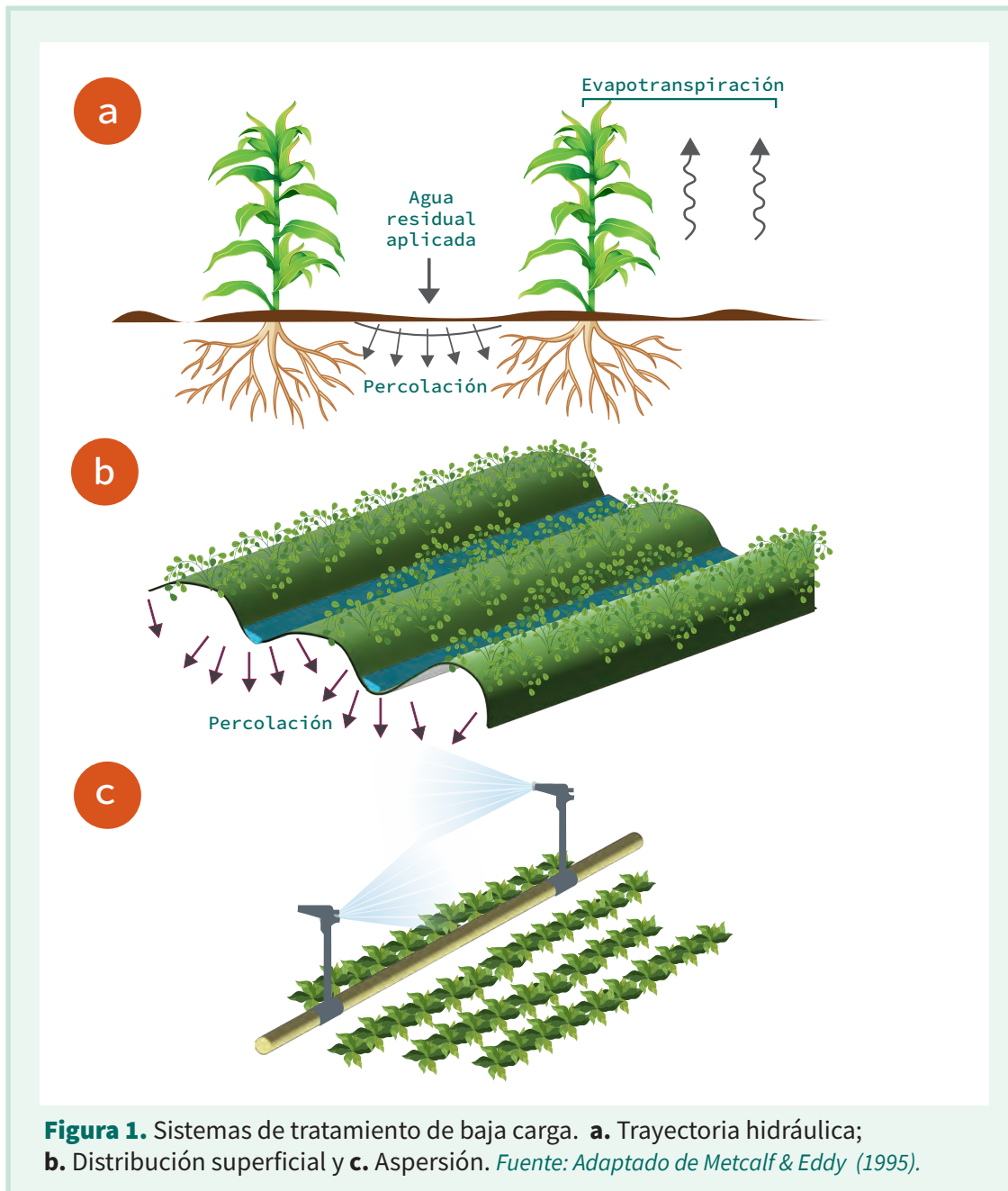
En la Figura 1 se presenta un diagrama de la trayectoria hidráulica para los sistemas de tratamiento de baja carga.

Características del suelo. Los suelos más adecuados son los de buen drenaje, de tipo franco a arenoso y sin excesiva pendiente. La profundidad del suelo es importante para el tratamiento de las aguas residuales, así como para el desarrollo radicular de los cultivos. Para los sistemas de tratamiento de baja carga, el suelo puede ser poco profundo, siendo suficiente con 30 cm para cultivos de pasto; pero se prefiere una profundidad de 1,5 m para tener un tratamiento completo del agua residual (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Las propiedades hidráulicas del suelo son importantes para los sistemas de baja carga Tipo 1, aunque las velocidades de infiltración (velocidad a la cual pasa el agua a través de la superficie del suelo) se deben tener en cuenta para el diseño de todos los sistemas de baja carga. La permeabilidad vertical o velocidad de percolación es la velocidad a la cual el agua se mueve a través del perfil del suelo. En la Tabla 1 se presentan las diferentes clases de permeabilidad para los suelos según Natural Resources Conservation Service (NRCS).

En la Tabla 2 se presentan valores de algunas propiedades químicas del suelo y su interpretación en la evaluación de sitios para la implementación de sistemas de baja carga.

Eficiencias del tratamiento. El grado de depuración que se consigue en estos sistemas suele ser muy elevado, del orden del 99% para los sólidos en suspensión, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y coliformes fecales. La eliminación de fósforo es igualmente muy alta si el suelo favorece la adsorción o precipitación de fosfatos. La eficiencia de depuración en cuanto a nitrógeno es variable, dependiendo sobre todo del tipo de especies vegetales que se empleen (Martín, 1993).



Selección del tipo de cultivo. En la selección del tipo de cultivo, deben considerarse aspectos económicos, temporadas de crecimiento, características del suelo, grado de pendiente y características del agua residual. Cultivos de forrajes o cultivos de árboles usualmente son seleccionados para sistemas de tratamiento de baja carga de Tipo 1, mientras que cultivos de mayor valor o vegetación paisajista son usualmente utilizados en los sistemas de tratamiento de baja carga de Tipo 2 (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Tabla 1. Clases de permeabilidad para suelos saturados según la NCRS. *Fuente: Crites y Tchobanoglous (2000).*

Permeabilidad del suelo (pulgada/h)	Clase de permeabilidad
< 0,06	Muy lenta
0,06 - 0,2	Lenta
0,2 - 0,6	Moderadamente lenta
0,6 - 2,0	Moderada
2,0 - 6,0	Moderadamente rápida
6,0 - 20,0	Rápida
> 20	Muy rápida

Tabla 2. Algunas propiedades químicas del suelo y su interpretación en la evaluación de sitios para la implementación de sistemas de baja carga. *Fuente: Crites y Tchobanoglous (2000).*

Característica del suelo	Descripción
pH (en unidades)	
< 4,2	Muy ácido para la mayoría de los cultivos
4,2 -5,5	Adecuado para cultivos ácido-tolerantes
5,5-8,4	Adecuado para la mayoría de terrenos
> 8,4	Muy alcalino para la mayoría de cultivos
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (meq/100 g suelo seco)	
1 - 10	Suelos arenosos (adsorción limitada)
12 - 20	Suelos limosos (adsorción moderada)
> 20	Suelos arcillosos u orgánicos (adsorción alta)
Cationes intercambiables (% de CIC)	Rango deseado
Sodio	< 5
Calcio	60 - 70
Potasio	5 - 10
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) (% de CIC)	
< 5	Satisfactorio.
> 10	Permeabilidad reducida en suelo de textura fina
> 20	Permeabilidad reducida en suelos de textura gruesa
Conductividad Eléctrica (CE) (mS cm⁻¹)	
< 2	No hay problemas de salinidad
2 - 4	Crecimiento restringido de cultivos sensibles a salinidad
4 - 8	Crecimiento restringido de muchos cultivos
8 - 16	Crecimiento restringido menos cultivos salino tolerantes
> 16	Solo unos pocos cultivos salino tolerantes crecen bien

En sistemas de baja carga del Tipo 1, el cultivo debe ser compatible con las altas tasas de carga hidráulica, tener una alta capacidad para absorber nutrientes, un alto consumo de agua y una alta tolerancia a las condiciones de humedad del suelo; son usuales los cultivos de forrajes (pastos) y árboles maderables. En sistemas de baja carga del Tipo 2, en los cuales se presenta un reúso del agua residual tratada, puede utilizarse una amplia variedad de cultivos y vegetación paisajista, incluyendo árboles, pastos y cultivos alimenticios y de huerto (maíz, algodón, sorgo, cebada, avena y trigo) (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Investigaciones con aguas residuales del café. Varios trabajos se han realizado en Brasil utilizando las aguas residuales, tanto de la etapa de despulpado como de lavado del café, para el fertirriego de los cafetales.

Matos et al. (2001) realizaron una investigación de fertirrigación en cultivos de café, utilizando las aguas residuales del despulpado y lavado del beneficio de frutos de *Coffea arabica*, aplicando dosis entre 210 y 1.260 L de agua residual/planta-año y determinaron que los rendimientos del cultivo de café presentan una reducción con el incremento en las dosis aplicadas, pero que dosis por encima de 600-700 L/planta-año permiten recuperar los rendimientos, posiblemente por el incremento en la concentración de fósforo disponible en el suelo. Igualmente, reportan que las concentraciones de N, P y K, en el suelo, no fueron alteradas significativamente por la aplicación de las diferentes dosis de aguas.

Lo Mónaco (2005) realizó una investigación similar, utilizando las aguas residuales, después de hacerlas pasar por un filtro biológico elaborado con la cascarilla resultante del proceso de trilla. Utilizó aguas residuales con una concentración, en términos de sólidos totales, en el rango entre 2.000 y 17.000 mg L⁻¹. Este autor concluye que es posible la fertirrigación de los cafetales si se utilizan dosis de aguas residuales con contenidos de potasio iguales o menores a tres veces los requerimientos de este elemento por parte del cultivo y que las aguas residuales no sólo suministran nutrientes, sino que además lixivian algunos macronutrientes del perfil del suelo y proporcionan condiciones para una mayor absorción de algunos macro y micronutrientes por parte de la planta.

Lima et al. (2007) estudiaron los efectos de aplicación de las aguas residuales del café sobre algunas características físicas y químicas de los suelos utilizados para el cultivo del café, encontrando que la aplicación, una sola vez, de aguas residuales previamente decantadas por 24 horas y filtradas por tamices de 120 mesh, diluida en agua de irrigación (1:1), equivalente a 25 mm no altera la capacidad de campo, la densidad del suelo ni la composición química del suelo en detrimento del cultivo.

Lo Mónaco et al. (2007) evaluaron las características químicas de suelos de café irrigados con aguas residuales, encontrando que proveen un incremento en la concentración de potasio intercambiable en la capa de suelo entre 0 y 40 cm, causando un aumento en la conductividad

eléctrica del suelo cultivado con plantas de café y un decremento en las concentraciones de Zn, Ca y Mg.

Sistemas de infiltración rápida

Descripción. También conocidos como sistemas de infiltración - percolación, dado que la percolación es el principal mecanismo de evacuación del agua residual aplicada. En este sistema de tratamiento los vertidos se aplican al suelo de forma intermitente, en dosis elevadas y penetran hacia los acuíferos, una parte se pierde por evaporación. El agua tratada puede recuperarse por bombeo. Para evitar la colmatación y obturación de los poros del suelo puede utilizarse una cubierta vegetal o una cubierta inerte con capas de arena y grava que filtren el agua antes de que llegue al suelo (Martín, 1993).

Los sistemas de infiltración rápida poseen la mayor carga hidráulica posible de cualquier sistema de tratamiento al suelo, siendo su objetivo principal el tratamiento de las aguas residuales y evitar su descarga directa a fuentes de agua superficial (Crites & Tchobanoglous, 2000).

En los sistemas de infiltración rápida, el agua residual, que ya ha recibido alguna forma de pretratamiento, se aplica de forma intermitente, normalmente mediante balsas de infiltración o de distribución de poca profundidad (Figura 2). También se emplea la aplicación de agua residual mediante sistemas de aspersión de alta carga. En las balsas de infiltración no suele disponerse algún tipo de vegetación, pero esta es necesaria si se emplean sistemas de aspersión. Debido a que las cargas aplicadas son relativamente elevadas, las pérdidas por evaporación sólo representan una pequeña parte del agua aplicada, y la mayor parte del agua percola en el terreno, proporcionando el tratamiento deseado (Metcalf & Eddy, 1995).

Clasificación. Los objetivos de diseño de los sistemas de infiltración rápida incluyen: (1) tratamiento del agua seguido de recarga de acuíferos, para aumentar los recursos hídricos o evitar la intrusión de aguas salinas; (2) tratamiento del agua seguido de su recuperación mediante sistemas de drenaje inferior o extracción por bombeo; (3) tratamiento del agua seguido por circulación subterránea y descarga a aguas superficiales. El potencial de tratamiento de los sistemas de infiltración rápida es algo inferior al de los sistemas de baja carga debido a la menor capacidad de retención de los suelos permeables y a las mayores cargas hidráulicas empleadas (Metcalf & Eddy, 1995).

Características del sitio de implementación. La selección del sitio de implementación es muy importante para el éxito de un proyecto de estas características, ya que la falla de estos sistemas se asocia, por lo general, con una evaluación inadecuada o insuficiente del terreno. Los factores más importantes en la evaluación y selección del sitio son: la profundidad del suelo y su permeabilidad, la profundidad y la dirección del flujo de las aguas subterráneas (Crites & Tchobanoglous, 2000).

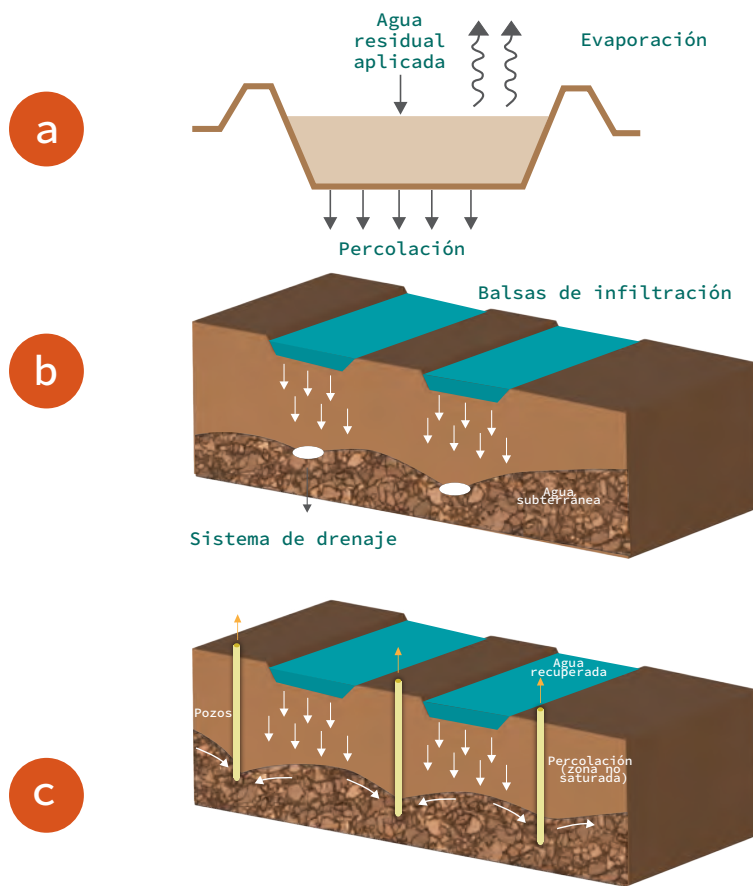


Figura 2. Trayectorias hidráulicas en sistemas de infiltración rápida. (a) trayectoria hidráulica; (b) recuperación mediante drenes, y c) recuperación mediante pozos de extracción.
 Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy (1995).

Aplicación del agua a tratar. Los métodos de distribución de agua más adecuados para los sistemas de infiltración rápida son los de aspersión y las balsas de infiltración. Los factores que hay que tener en cuenta en la selección del método de distribución del agua incluyen las condiciones del suelo, la topografía, el clima y el costo (Metcalf & Eddy, 1995).

En los sistemas de infiltración rápida es necesario que existan períodos secos para permitir la re-aireación del suelo entre períodos de aplicación y para procurar el tiempo necesario para la descomposición de la materia orgánica acumulada y el desarrollo de otras transformaciones biológicas como la nitrificación. La combinación de períodos secos y de aplicación se conoce con el nombre de ciclo operativo o ciclo de riego. Los ciclos operativos se establecen para maximizar la infiltración, la eliminación de nitrógeno o la nitrificación. Los caudales normales de vertido oscilan entre 10 y 50 cm/semana. La aplicación dura entre 8 horas a varios días, con posterior período de descanso de 1 a 20 días (Martín, 1993).

Características del suelo. Para que un sistema de infiltración rápida funcione correctamente es necesario que la permeabilidad del terreno sea superior a 25 mm h^{-1} . Los tipos de suelos aptos para esta clase de sistemas incluyen arenas, margas arenosas, arenas margosas y gravas. Las arenas muy gruesas y las gravas presentan la desventaja de que permiten que el agua residual circule a gran velocidad a través de los primeros metros de suelo, zona en la que tiene lugar la mayor parte de la actividad química y biológica. Los suelos uniformes son deseables ya que la falta de uniformidad aumenta el costo y complejidad de los ensayos de campo que es necesario llevar a cabo. Es preferible que la profundidad del suelo sea superior a 3 m, pero se pueden emplear profundidades menores de hasta 2 m, si se proveen sistemas de drenaje cuidadosamente proyectados (Metcalf & Eddy, 1995).

Eficiencias del tratamiento. El rendimiento de depuración para sólidos en suspensión y coliformes es muy elevado, similar al correspondiente a los sistemas de baja carga, mientras que para DBO es algo menor, entre el 85% y 98%. La eliminación de N no suele ser mayor del 40% y en cuanto al P, los rendimientos de depuración suelen oscilar entre el 50% y 90% (Martín, 1993).

Flujo superficial

Descripción. El flujo superficial es un sistema biológico de tratamiento de película fija, en el cual el pasto y la capa vegetal actúan como matriz para el crecimiento biológico. En estos sistemas el agua residual fluye a lo largo de una estrecha capa de suelo con vegetación hasta unos colectores de recogida. El agua aplicada puede consumirse por evapotranspiración o percolar vertical y horizontalmente en el terreno hasta llegar a zonas impermeables y discurre en favor de la pendiente (Martín, 1993). En la Figura 3 se incluye una representación esquemática.

Clasificación. Los sistemas de flujo superficial pueden utilizarse como unidades de tratamiento preliminar para un sistema de reutilización de agua o para lograr un tratamiento secundario, un tratamiento secundario avanzado o de remoción de nitrógeno, de acuerdo con las restricciones para el vertimiento. Dado que los sistemas de flujo superficial producen una corriente de agua tratada, se requiere contar con un permiso de vertimiento (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Características del sitio de implementación. Para la instalación de sistemas de flujo superficial deben tenerse en cuenta las características del suelo, la topografía y el clima.

Los suelos de la zona superficial de las pendientes en las que se aplica el riego superficial tienden a quedar sellados o a obturarse rápidamente, como consecuencia del desarrollo de películas biológicas y de la deposición de sólidos en los huecos intersticiales. Este fenómeno conduce a que las pérdidas por percolación sean pequeñas e independientes de la permeabilidad inicial del suelo. La distancia hasta el nivel freático debe ser como mínimo de 0,3 a 0,6 m, para permitir la existencia de distancia suficiente para el tratamiento de todo percolado que pueda entrar en

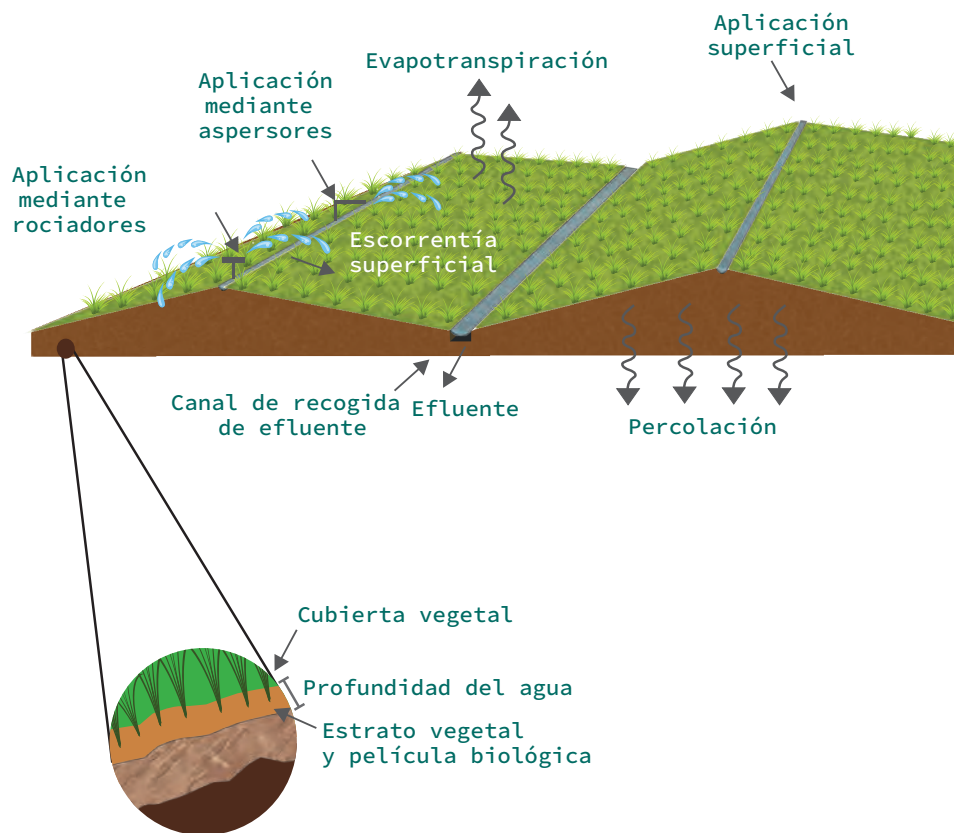


Figura 3. Esquema de un sistema de flujo superficial. *Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy (1995).*

contacto con las aguas subterráneas y para evitar la saturación de la zona radicular (Metcalf & Eddy, 1995).

Aplicación del agua a tratar. Los métodos de distribución empleados en los sistemas de flujo superficial incluyen el uso de tuberías perforadas, rociadores y aspersores. La aplicación superficial mediante tubos abiertos es una gran alternativa desde lo económico, respecto a los aspersores, sobre todo para sistemas pequeños. El ancho de las parcelas suele estar comprendida entre 30 y 60 cm y su longitud entre 50 y 120 m. El caudal de aplicación oscila normalmente entre 6 y 14 cm/semana. Normalmente se utiliza el vertido mediante aspersión en la parte superior de las parcelas de escorrentía con riegos de 6 - 12 horas diarias, durante 5 - 7 días a la semana. Estos sistemas requieren un tratamiento previo que evite la aparición de obstrucciones en los equipos de riego (Martín, 1993).

Características del suelo. El flujo superficial se alcanza de mejor forma en suelos con baja permeabilidad (arcillosos o franco - arcillosos) o aquellos poco profundos con subsuelo

impermeable y en terrenos inclinados. Sitios con suelos superficiales de permeabilidad moderada e impermeable o de baja permeabilidad también pueden utilizarse. La pendiente debe ser pequeña (entre el 2% y el 6%) y la superficie del suelo muy lisa, empleándose normalmente cubiertas vegetales de especies herbáceas de pastizal (Martín, 1993).

Eficiencias del tratamiento. El rendimiento depurador alcanzado por estos sistemas es de un 94% - 99% de eliminación de DBO y sólidos en suspensión, y un 70% - 90% de reducción para el nitrógeno. Si se quiere favorecer la eliminación de este elemento es importante segar y recoger la cubierta vegetal periódicamente. La eficiencia depuradora en cuanto al P es generalmente más baja que en los sistemas de baja carga, debido al menor contacto entre el agua residual y el suelo (Martín, 1993).

Selección del tipo de vegetación. Como vegetación para los sistemas de flujo superficial, se recomienda pasto perenne tolerante al agua. La función del pasto es proveer el medio de soporte para los microorganismos, prevenir el acanalamiento y la erosión, asegurar un flujo laminar delgado y permitir la filtración y sedimentación de los sólidos en la capa vegetal (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Investigaciones con aguas residuales del café. Varios trabajos se han realizado en Brasil utilizando especies forrajeras como cobertura vegetal en rampas, para el tratamiento de aguas residuales de café por escurrimiento superficial. Pinto et al. (2000) reportan el uso de centeno y avena, regados a una tasa de 250 kg DBO₅/ha-d, durante 5 días a la semana, sin encontrar diferencias en productividad respecto al tratamiento testigo (fertilización convencional y riego con agua), concluyendo que el centeno es una especie adecuada para este sistema de tratamiento, dado que presentó menos susceptibilidad a problemas de toxicidad ocasionados por las aguas residuales. En contraste, la avena fue la especie forrajera con menor capacidad para eliminar nutrientes aplicados al suelo por aguas residuales del café, cuando se comparó con el centeno y con el millo (Matos et al., 2005).

Matos et al. (2001) reportan que la legislación de Brasil exige que se elimine el 85% de la DBO₅ del agua residual o que ésta contenga menos de 60 mg L⁻¹ para que pueda ser vertida a un cuerpo de agua y que mediante la siembra de avena en rampas de 10 m² y 5% de pendiente, con aplicaciones de 250 kg DBO₅/ha-d, se encuentran las mayores tasas de remoción de DBO, con coeficientes de decaimiento de $A = 1,0388$ y $B = -0,0954$ en la ecuación $C/Co = A^*e^{(B^*z)}$, siendo z la distancia. En trabajos posteriores utilizando centeno y aplicaciones de 2,7 m³ de agua residual/m²-h (con 1.974 mg L⁻¹ de DBO, 3.020 mg L⁻¹ de DQO y 700 mg L⁻¹ SST) se encontraron valores de A y B de 0,9431 y -0,0363 para la DBO; 0,9662 y -0,0099 para la DQO y 0,9383 y -0,0572 para los SST (Matos et al., 2005).

En la Tabla 3 se presentan las características y calidad esperada del efluente en sistemas de aplicación al suelo.

Tabla 3. Características y calidad esperada del efluente en sistemas de aplicación al suelo. *Fuente: Adaptado de Metcalf y Eddy (1995).*

Característica	Tipo de sistema de aplicación			
	Baja carga (Tipo 1)	Baja carga (Tipo 2)	Infiltración rápida	Flujo superficial
Pendiente	< 20% en suelos cultivados < 40% en suelos no cultivados		< 10% para evitar remociones excesivas del terreno	2% - 8%
Permeabilidad del suelo	Moderada baja a moderada alta		Alta (arena, arena arcillosa)	Baja (arcillas, limos y suelos con capas impermeables)
*Intervalo de permeabilidad	0,06 - 20 pulgadas/h		> 2 pulgadas/h	< 0,2 pulgadas/h
*Profundidad del suelo	> 0,60 m		> 1,50 m	> 0,15 m
*Área de terreno para 1 m ³ d ⁻¹	210 m ²		10 m ²	35 m ²
*Intervalo de área de terreno para 1 m ³ d ⁻¹	56 - 524 m ²		3 - 56 m ²	15 - 105 m ²
Profundidad mínima al acuífero	0,6 a 0,9 m (mínimo)		3,0 m	No crítica
Restricciones climáticas	Almacenamiento en tiempo frío o lluvioso		Ninguna	Almacenamiento en tiempo frío o lluvioso
Técnicas de aplicación	Aspersión o superficial		Superficial	Aspersión o superficial
Carga hidráulica semanal	1 - 10 cm		10 - 300 cm	6 - 40 cm
Carga hidráulica anual	170 - 600 cm	60 - 200 cm	600 - 9000 cm	730 - 56.700 cm
Tratamiento previo	Sedimentación primaria		Sedimentación primaria	Desbaste y desarenado
Destino del agua aplicada	Evapotranspiración y percolación		Percolación	Escorrentía, evapotranspiración y percolación
Vegetación	Requerida		Opcional	Requerida
Calidad media esperada del efluente				
DQO	< 2 mg L ⁻¹		2 mg L ⁻¹	10 mg L ⁻¹
Sólidos suspendidos	< 1 mg L ⁻¹		0,5 mg L ⁻¹	15 mg L ⁻¹
Nitrógeno amoniacal, como N	< 0,5 mg L ⁻¹		0,5 mg L ⁻¹	1 mg L ⁻¹
Nitrógeno total, como N	3 mg L ⁻¹		10 mg L ⁻¹	5 mg L ⁻¹
Fósforo total, como P	< 0,1 mg L ⁻¹		1 mg L ⁻¹	4 mg L ⁻¹

(*) Tomado de Crites y Tchobanoglous (2000).

Sistemas Acuáticos

Estos sistemas de tratamiento incluyen macrófitas y pueden clasificarse en terrenos pantanosos naturales y artificiales (humedales) y sistemas de tratamiento mediante plantas acuáticas flotantes.

Humedales

Descripción. Son terrenos inundados con profundidades de agua, normalmente inferiores a 0,6 m y con plantas emergentes como espadañas, juncos y enneas. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los contaminantes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de la luz solar (Metcalf & Eddy, 1995). Los humedales pueden ser naturales o artificiales.

Los humedales naturales, desde el punto de vista normativo, se consideran cuerpos de agua receptores y, por lo tanto, los vertidos a ellos están condicionados por la normativa ambiental local. El principal objetivo de los vertidos a los humedales naturales debe ser la mejora del hábitat existente (Metcalf & Eddy, 1995).

Los humedales artificiales son aquellos construidos por el hombre, que simulan todas las características de las tierras húmedas naturales, ofrecen una alternativa para el tratamiento de aguas residuales con respecto a las plantas de tratamiento convencionales, dado que son relativamente económicos para construir y operar, de fácil mantenimiento, proporcionan un tratamiento efectivo y confiable para aguas residuales y son relativamente tolerantes a las fluctuaciones hidrológicas y a las velocidades de carga contaminantes (Hammer, 1989).

Ubicación. Los humedales deben localizarse aguas abajo del tanque séptico o del filtro anaeróbico (FAFA) para el postratamiento de las aguas residuales domésticas, tal como se establece en el Título J del Reglamento Técnico del Sector de Agua potable y Saneamiento Básico [RAS], o aguas abajo de un reactor metanogénico para el postratamiento de las aguas residuales del beneficio del café. Para esto, debe hacerse una evaluación de las características del suelo, localización de cuerpos de agua, topografía, localización geográfica, líneas de propiedad y vegetación existente para ubicar adecuadamente el humedal, de acuerdo al Título J del RAS (Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, [MAVDT], 2010).

Topografía. El terreno idóneo para la instalación de un humedal es de topografía uniforme horizontal o en ligera pendiente; ello se debe a que los sistemas de flujo libre (SHFL) suelen diseñarse con depósitos o canales horizontales, y a que los sistemas de flujo subsuperficial (SHFS) suelen diseñarse y construirse con pendientes del 1,0% o superiores. A pesar de que es posible construir depósitos en terrenos de más pendiente y con topografía más irregular, el

movimiento de tierras necesario afectará al costo constructivo del sistema. En consecuencia, los sistemas de humedales suelen construirse con pendientes inferiores al 5,0% (Metcalf & Eddy, 1995).

Suelo. Dado que el objetivo de los humedales es el tratamiento del agua residual en la lámina de agua situada por encima de la superficie del terreno, los sitios más apropiados para la instalación de estos sistemas son suelos con niveles superficiales o estratos subsuperficiales de permeabilidad lenta ($< 0,5 \text{ cm h}^{-1}$). Consecuentemente, deben minimizarse las pérdidas por percolación a través de la superficie del terreno. Los suelos naturales de permeabilidad rápida pueden ser aptos para la construcción de pequeños sistemas, construyendo depósitos revestidos con arcilla o con láminas impermeabilizantes. La distancia hasta el nivel freático debe de ser como mínimo de 0,3 a 0,6 m, para permitir la existencia de distancia suficiente para el tratamiento de todo el percolado que pueda entrar en contacto con las aguas subterráneas y para evitar la saturación de la zona radical. La profundidad hasta el estrato rocoso puede ser importante si afecta los costos de construcción del sistema (Metcalf & Eddy, 1995).

Uso actual del terreno. El tipo de terreno preferido para la instalación de los humedales son espacios abiertos o de uso agrario. Los humedales artificiales pueden favorecer las condiciones de los sistemas naturales al proporcionar un hábitat suplementario para el mundo animal y, en algunos casos, un abastecimiento de agua más constante (Metcalf & Eddy, 1995).

Clima. Es posible utilizar sistemas de humedales en zonas de climas fríos; sin embargo, la viabilidad del funcionamiento de los sistemas durante el invierno depende de la temperatura del agua en el interior del depósito y de los objetivos del tratamiento. El rendimiento del proceso es muy sensible a la temperatura, ya que los principales mecanismos del proceso son biológicos (Metcalf & Eddy, 1995).

Vegetación a utilizar. El abanico de especies que se utilizan en los humedales se restringe a especies típicamente helófitas (plantas perennes que mantienen el contacto con zonas saturadas de agua), debido a que los sistemas más extendidos son los humedales de flujo superficial y sub-superficial. En estos sistemas, las principales plantas utilizadas son *Typha* spp. (eneas), *Phragmites australis* (carrizo) y *Scirpus* spp. (juncos) (Curt, 2004).

En Estados Unidos, en las últimas décadas, se han creado humedales artificiales con el propósito específico de depurar aguas residuales. Estos sistemas se han empleado casi exclusivamente para el tratamiento terciario de efluentes domésticos o industriales, siendo las principales especies utilizadas *Scirpus* sp., *Typha* sp., *Eleocharis* sp. e *Iris* sp. Otro aspecto que se ha considerado es la posibilidad de utilizar humedales artificiales con *Typha* sp. en la depuración de los vertidos ácidos de las explotaciones mineras, ya que esta planta es capaz de tolerar pH muy bajo y acumular en sus tejidos altas concentraciones de metales pesados (Martín, 1993).

De acuerdo con la Environmental Protection Agency United States [U.S.EPA] (1988), la eficiencia de remoción de humedales naturales tratando aguas residuales es del orden del 70% al 96% para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), entre el 60% y el 90% para los Sólidos Solubles Totales (SSoLT) y entre el 40% y el 90% para el Nitrógeno Total (N_T) y las eficiencias de remoción promedio en humedales artificiales tratando aguas residuales, son del orden del 74% para la DBO_5 (variando entre 64% y el 86%) y del 77% para los SSoLT (variando entre el 28% y el 93%), comprobando la eficiencia de este tipo de sistemas de tratamiento para la remoción de carga orgánica.

Los humedales artificiales pueden ser utilizados por los caficultores para el postratamiento de las aguas residuales de las viviendas y de las aguas residuales del beneficio del café (Rodríguez et al, 2022), con el fin de mejorar la calidad del agua tratada y dar cumplimiento a las exigencias establecidas en la normativa colombiana en la Resolución 1256 del 2021 sobre reúso del agua residual (MADS, 2021), en la Resolución 631 del 2015 sobre vertimientos a cuerpos de agua (MADS, 2015), en el Decreto 50 del 2018 sobre vertimientos al suelo (MADS, 2018) y en la Resolución 699 del 2021 sobre vertimientos al suelo de las aguas residuales domésticas (MADS, 2021).

Investigaciones con aguas residuales del café. Matos et al. (2000) en Brasil, evaluaron dos humedales de flujo subsuperficial de 420 y 7.040 m², sembrados con *Typha* spp, alimentados con aguas residuales del café, el primero cinco veces a la semana con 70 kg DBO_5 /ha-d y el segundo con 276 kg DBO_5 /ha-d, reportando eficiencias de remoción superiores al 80% en los parámetros DQO, DBO, amonio y potasio. La remoción de dureza estuvo entre el 56% y 60% (Fia & Matos, 2001). Para estos mismos humedales y cargas, Brasil et al. (2003) reportan remociones de nitratos superiores al 60% y de P superiores al 80%, así como concentraciones de nutrientes en el tejido vegetal de *Typha* spp, durante el período de monitoreo, con valores promedio de 1,50 dag kg⁻¹ para N-total, 0,07 dag kg⁻¹ para P, 0,82 dag kg⁻¹ para K y 0,33 dag kg⁻¹ para Na.

Fia (2008) en Brasil, evaluó el desempeño de una laguna de 15 m de largo x 1 m de ancho x 0,3 m de altura efectiva, sembrada con *Typha* spp. en un medio con grava y alimentada con aguas residuales del café sin tratar y pH entre 4,1 y 4,6, reportando senescencia y fitotoxicidad de las plantas cuando operaron con cargas orgánicas aplicadas entre 400 y 850 kg DBO_5 /ha-d. Así mismo, reportó la utilización de las especies *Typha* spp y *Alternanthera philoxeroides* en el postratamiento de aguas residuales de café tratadas anaerobiamente, a escala de mesocosmos, utilizando lagunas impermeabilizados de 1,5 m x 0,5 m x 0,4 m y grava como medio de soporte, para cargas orgánicas aplicadas de 1.500 kg DQO/ha-d y TRH de 4,7 días con remociones de DQO del 85%, DBO del 63% y un buen desempeño agronómico de las especies, medido en términos de producción de biomasa vegetal y extracción de nutrimentos de las aguas tratadas.

Sistemas con plantas acuáticas flotantes

Descripción. Estos sistemas consisten en estanques o canales de profundidad variable (0,4 a 1,5 m) alimentados con agua residual sin tratar o tratadas previamente, en los que se desarrolla

una especie flotante. La biomasa producida se recolecta generalmente en cortos intervalos de tiempo, antes de que se produzca su descomposición en el agua (Martin, 1993).

La elevada capacidad de absorber nutrientes por parte de las especies flotantes ha sido reconocida desde hace mucho tiempo. La facilidad de recolección, la alta productividad de algunas de las especies y el alto contenido de N y P de sus tejidos hacen que estas plantas resulten muy adecuadas para reducir el nivel de nutrientes de los efluentes, además que las plantas recolectadas pueden ser aprovechadas para la generación de diferentes productos (Rodríguez et al., 2022).

Los pasos que forman parte del diseño del proyecto de sistemas que utilizan plantas acuáticas flotantes son básicamente los mismos que los aplicables al diseño de humedales artificiales. Las principales diferencias en el diseño son el tipo de vegetación empleada y las necesidades físicas asociadas al tipo de plantas empleadas.

Clasificación. Los principales tipos de sistemas de tratamiento con plantas acuáticas flotantes son aquellos que emplean jacintos y lentejas de agua.

Los sistemas de jacintos de agua representan la mayor parte de los sistemas de plantas acuáticas que se han construido. En función del nivel de oxígeno disuelto y del método de aireación de las lagunas pueden distinguirse tres tipos de sistemas de jacintos de agua: (1) aerobios no aireados, (2) aerobios aireados y (3) anaerobios facultativos. Los sistemas de lentejas de agua se han empleado, principalmente, para mejorar la calidad del efluente de estanques de estabilización facultativos, mediante la reducción de la concentración de algas (Metcalf & Eddy, 1995).

Evaluación y selección del sitio. Las características del sitio que deben considerarse en el diseño de sistemas de plantas acuáticas incluyen la topografía, las características del suelo, el riesgo de inundación y el clima.

Topografía. El terreno idóneo para la instalación de un sistema de plantas acuáticas es un terreno de topografía uniforme horizontal o en ligera pendiente. A pesar de que es posible construir depósitos y canales en terrenos de más pendiente y con topografía más irregular, el movimiento de tierras necesario afectará el costo constructivo del sistema (Metcalf & Eddy, 1995).

Características del suelo. Los sitios más indicados para la instalación de sistemas de plantas acuáticas son terrenos con suelos superficiales o estratos subyacentes de permeabilidad lenta ($< 5 \text{ mm h}^{-1}$), ya que el objetivo de este tipo de sistemas es el tratamiento del agua residual en lagunas o estanques. Por lo tanto, es necesario minimizar las pérdidas de agua por percolación en el terreno (Metcalf & Eddy, 1995).

Clima. Debido a la sensibilidad a las temperaturas frías (menores a 10°C), el uso de jacintos de agua está restringido a regiones con temperaturas por encima de este valor. Las lentejas de agua son menos sensibles a las bajas temperaturas, pueden aplicarse estacionalmente en la mayoría de los sitios y durante todo el año. En lugares con condiciones climáticas más variables puede resultar adecuado emplear sistemas combinados de varios tipos de plantas.

Vegetación a utilizar. En sistemas de tratamiento de aguas, estrictamente acuáticos, se utilizan plantas de flotación libre, como son *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua), *Pistia stratiotes* (lechuga de agua), *Typha angustifolia* (eneas), *Salvinia auricula* (oreja de agua), *Azolla filiculoides* (helecho de agua) y *Lemna spp* (lenteja de agua), entre otras (Rodríguez, 2009).

En la Tabla 4 se presentan las características de los sistemas acuáticos.

Investigaciones con aguas residuales del café. En Guatemala, Robles (1979) utilizó *E. crassipes* (jacintos acuáticos) para tratar aguas residuales de lavado de café neutralizadas, con una DQO entre 600 y 1.500 mg L⁻¹. El ensayo se realizó al aire libre, en acuarios de 118 L, consiguiendo, después de 2 semanas, valores de DQO menores a 100 mg L⁻¹. Robles et al. (1983), en Guatemala, determinaron que los jacintos acuáticos son capaces de soportar aguas residuales de lavado de café con cargas orgánicas aproximadas de 3.000 mg L⁻¹ como DQO, permitiendo una reducción del 95% de la DQO inicial, durante el período de crecimiento de las plantas, concluyendo que para niveles mayores de contaminación se hace necesario un tratamiento previo.

Tabla 4. Características de los sistemas acuáticos. *Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy (1995).*

Característica	Tipo de sistema de aplicación	
	Humedales	Plantas flotantes
Pendiente	< 5%	< 5%
Permeabilidad del suelo	Baja a moderada	Baja a moderada
Profundidad mínima al acuífero	No crítica	No crítica
Restricciones climáticas	En clima frío puede ser necesario almacenar el agua	En clima frío puede ser necesario almacenar el agua
Técnicas de aplicación	Aspersión o superficial	Superficial
Carga hidráulica anual	550 - 1.800 cm	550 - 1.800 cm
Tratamiento previo	Sedimentación primaria	Sedimentación primaria
Destino del agua aplicada	Evapotranspiración, percolación y escorrentía superficial	Evapotranspiración
Vegetación	Requerida	Requerida

Calzada & Porres (1987), en Centroamérica, reportan la utilización de jacintos acuáticos para tratar el agua residual del beneficio del café que salió de un digestor metanogénico, utilizando un tiempo de retención hidráulica de 6 días. El agua ingresó al lecho con jacintos, a una concentración de DQO de 1.726 mg L^{-1} y salió con 1.014 mg L^{-1} .

En Colombia, Cenicafé (1998) evaluó a escala de microcosmos, sistemas acuáticos con el objetivo de tratar las aguas residuales del café obtenidas por digestión anaerobia y minimizar su impacto ambiental, encontrando que las mejores especies acuáticas en la remoción de carga orgánica fueron, en su orden, *Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes*, *Typha angustifolia*, *Salvinia auricula* y *Azolla filiculoides*. El mismo autor, utilizando una combinación de especies acuáticas acopladas en serie a la salida de reactores anaerobios de 53 L, en donde se trataban las aguas - mieles del café, reporta para un sistema acuático con un volumen efectivo de 1.285 L, caudal medio de 81 mL min^{-1} y tiempos de retención hidráulica de 11 días, remociones de carga orgánica, evaluadas como DQO y DBO_5 , superiores al 80%, para afluentes con concentraciones de DQO entre 708 y 2.156 mg L^{-1} .

Olguín et al. (2003) en México, estudiaron la productividad, contenido de proteína y remoción de nitrógeno y fósforo de efluentes anaerobios de aguas residuales de café, utilizando lagunas con *Salvinia minima* operando a diferentes valores de pH y diferentes profundidades de agua. Para ello, evaluaron dos profundidades en las lagunas (0,10 y 0,27 m), encontrando que la productividad de la planta fue afectada por el pH del agua residual (decrementos con el incremento del pH), inhibiéndose el crecimiento a pH de 8,0. En contraste a pH de 6,0 y profundidad en las lagunas de 0,27 m, durante el verano, la producción de la planta fue de $27,92 \text{ t ha-año}^{-1}$. Los porcentajes de remoción de N-NTK se incrementaron con el pH ($51,0\% \pm 2,28\%$ a pH 5,0; $78\% \pm 1,47\%$ a pH 6,0 y $97\% \pm 0,80\%$ a pH 8,0). Algo similar ocurrió con el N-NH₃ removido ($55\% \pm 0,44\%$, $80\% \pm 1,1\%$, $99\% \pm 0,02\%$, a los pH ya referenciados), siendo el valor de 6,0 el pH óptimo de operación para este tipo de tratamiento. Los efluentes anaerobios de las aguas residuales del café evaluados presentaron un pH entre 8,1 y 8,8, un contenido de sólidos totales entre 1.060 y 1.697 mg L^{-1} , un contenido de sólidos suspendidos totales entre 60 y 380 mg L^{-1} , una DBO entre 122 y 252 mg L^{-1} , un contenido de N-NTK entre 84,3 y $99,2 \text{ mg L}^{-1}$, un contenido de N-NH₃ entre 58,8 y $64,3 \text{ mg L}^{-1}$ y un contenido de fosfatos entre 38,3 y $81,6 \text{ mg L}^{-1}$.



Filtros verdes

Descripción

Los filtros verdes son un sistema de tratamiento natural del agua, de baja carga, que se basa en la aplicación controlada del agua residual pre-tratada a un cultivo forestal o herbáceo, aprovechando la capacidad autodepuradora de la zona no saturada del suelo y de la captación de nutrimentos por parte de la vegetación. El uso de especies arbóreas o pastos de rápido crecimiento, con gran requerimiento hídrico y cuyas raíces son tolerantes a condiciones parcialmente saturadas y anaerobias permiten la aplicación de altos volúmenes de agua residual (Herschbach et al., 2005). Los períodos cortos de poda (dos a tres años) en caso de especies forestales, o cortes continuos del pasto, así como el uso de elevadas densidades de siembra de la vegetación que ocasionen un aumento en la demanda de agua, resultará en un aumento en la capacidad de asimilación de nutrientes por parte del cultivo (Dimitriou & Aronsson, 2011; Holm & Heinsoo, 2013).

Existen numerosos ejemplos de utilización de filtros verdes para el tratamiento de aguas residuales procedentes de múltiples efluentes, como aguas residuales domésticas (Miguel et al. 2014; Barton et al. 2005, Dawson & Wilson, 2003), industriales (Bustamante 1990; Trapp et al. 2004), lixiviados de vertederos (Zupanc & Justin, 2010; Simonete et al. 2013) o procedentes de industrias alimentarias (Aryal & Reinhold, 2015; López et al, 1992). En casi todos los estudios evaluados se observa una elevada capacidad del suelo en la degradación de compuestos orgánicos, siendo el principal riesgo la lixiviación de compuestos nitrogenados (Miguel et al., 2014). En un estudio realizado por la Universidad de Michigan (Mokma, 2006) se reportan numerosos ejemplos de uso de filtros verdes en Estados Unidos para el tratamiento de aguas procedentes de la industria de alimentos procesados, cuyos efluentes se caracterizan principalmente por una elevada carga orgánica.

En investigaciones realizadas con efluentes similares a los del café, como el caso de los provenientes del sector olivarero, en el que el efluente obtenido del prensado de la aceituna es aplicado al terreno para su tratamiento, se reportan cargas aplicadas en el rango de 140 a 500 toneladas de DQO/año, con la recomendación de no utilizar cargas hidráulicas muy elevadas (<10 mm) para evitar el lixiviado de sales, nitratos y metales pesados (Azbar et al., 2010).

Mecanismos de depuración en los sistemas de filtros verdes

La depuración de las aguas residuales aplicadas al suelo tiene lugar en los horizontes superiores de éste, en una capa biológicamente activa cuya profundidad no debe superar 1,20 m. En este suelo vivo, las aguas residuales que lo atraviesan lentamente, al percolar, están expuestas a dos procesos simultáneos: un filtrado mecánico que retiene los sólidos en suspensión no

degradables y una oxidación bioquímica bacteriana que mineraliza la materia orgánica. El oxígeno necesario para esta mineralización de la materia orgánica proviene del aire contenido en esta capa activa del suelo, en la que ocupa del orden del 50% de su volumen, lo que equivale a un contenido de unos 600 kg ha⁻¹ de oxígeno, que se renueva naturalmente por difusión en aproximadamente 75 minutos (Iglesia, 2016).

Los principales procesos de depuración que ocurren en los filtros verdes y que contribuyen a la regeneración del agua aplicada son: 1) Eliminación de sólidos en suspensión, los cuales se separan por decantación y sobre todo por procesos de filtración, a través del conjunto que forma el suelo con los rizomas y raíces. La filtración depende de la granulometría y textura del suelo; 2) Eliminación de materia orgánica, la cual es realizada por microorganismos, que en un sistema con vegetación tienen un desarrollo y una actividad muy elevados; 3) Eliminación del nitrógeno. Las reacciones bioquímicas primarias relacionadas con el ciclo del nitrógeno en el suelo, comprenden la nitrificación, desnitrificación y la mineralización; 4) Eliminación del fósforo, la cual se realiza por absorción por parte de la vegetación, por procesos de adsorción sobre partículas de arcilla, partículas orgánicas y compuestos de hierro y aluminio, y por fenómenos de precipitación de fosfatos insolubles; 5) Eliminación de azufre. Bajo condiciones aeróbicas las reacciones microbianas pueden llevar a la mineralización de los sulfatos orgánicos y a la oxidación de los sulfuros metálicos y del SH₂ a SO₄²⁻; 6) Eliminación de otros iones inorgánicos. La comunidad microbiana del suelo proporciona diversos mecanismos para la eliminación de compuestos inorgánicos, siendo el más importante aquel que promueve la movilidad de los iones y los hace asimilables por la vegetación; 7) Eliminación de microorganismos patógenos. La cual se hace por filtración y adsorción en partículas de arcilla, toxicidad por antibióticos producidos por las raíces de la vegetación y la acción depredadora de otros organismos bacteriófagos y protozoos (Bustamante et al., 2009).

Estudios sobre eficiencias de los filtros verdes en el tratamiento de aguas residuales

Durante tres años, Miguel et al. (2014) evaluaron el desempeño de un filtro verde sembrado con álamos en el tratamiento de aguas residuales domésticas, las cuales fueron pretratadas en un tanque Imhoff antes de ser aplicadas al filtro con vegetación, reportando eficiencias de remoción de DQO del 85,1%, de nitrógeno total del 73,0% y de fósforo total del 90,7%, con un incremento en el contenido de materia orgánica del suelo del 1,0% al 2,8% y un incremento en el contenido de P disponible en el suelo de 14,1 mg kg⁻¹ a 43,8 mg kg⁻¹.

Aryal y Reinhold (2014) evaluaron durante cuatro meses el crecimiento, la evapotranspiración y la eliminación de contaminantes (DQO, nitrato, hierro y manganeso) por parte de un cultivo de árboles de álamo, durante la aplicación al suelo de aguas residuales provenientes del procesamiento de alimentos. Los autores reportan que el crecimiento de los álamos, medido

por el número, altura y masa de los brotes, el número y la masa de las hojas, y la longitud de la raíz no se vieron afectados por la aplicación de aguas residuales provenientes del procesamiento de frutas y hortalizas, cuando se aplicó entre una y dos veces la cantidad más alta reportada en la zona. Sin embargo, observaron menos masa de raíces en los árboles que recibieron aguas residuales. De igual forma, reportaron que los álamos resistieron la saturación continua de los suelos y evaporaron significativamente más agua que los controles sin plantas, con un coeficiente de evapotranspiración promedio de 3,25 (indicando que los álamos pueden reducir la humedad del suelo). La eliminación de la DQO del agua residual fue significativamente mayor en los tratamientos con álamos que en las parcelas de solo suelo. Adicionalmente, la lixiviación de hierro y nitrato fue menor en las parcelas con álamos que en suelo sólo. Estos árboles acumularon hierro, arsénico y manganeso, y translocaron estos metales a los tejidos superiores, demostrando su capacidad para disminuir la saturación, modificar potencialmente las condiciones redox y la capacidad de absorción de metales, lo que resulta en una disminución de la lixiviación de nitrato, hierro y manganeso, y eliminación de DQO durante la aplicación al suelo de las aguas residuales del procesamiento de alimentos.

Azbar et al. (2004) reportan que varios investigadores han demostrado que la aplicación controlada de aguas residuales sin tratar, provenientes de la industria del aceite de olivas, en suelos agrícolas, puede tener un efecto positivo en las plantaciones de olivos, así como sobre otros cultivos como la uva, el maíz y el girasol; sin embargo, esta práctica debe considerarse solo después de una evaluación integral de todos los posibles impactos ambientales. Por ejemplo, investigaciones en las que se aplicaron $1.000 \text{ m}^3 \text{ ha-año}^{-1}$ de aguas residuales sin tratar, sobre suelos que contenían caliza, permitieron un aumento en los contenidos de materia orgánica, nitrógeno total, fósforo asimilable y sales en el suelo; sin embargo, también aumentaron la movilidad de los metales pesados y causaron la lixiviación de los iones sodio y nitrato. Por otro lado, cuando se aplicaron bajos volúmenes de aguas residuales, del orden de $100 \text{ m}^3 \text{ ha-año}^{-1}$, se encontró que el suelo podría actuar como un biofiltro para el tratamiento de las aguas residuales del aceite de oliva.

Rosenqvist y Ness (2004) realizaron el análisis económico de la depuración de los lixiviados de una planta de tratamiento integrado de residuos sólidos a través de un filtro verde utilizando sauces. Los cálculos se basaron para una plantación de sauce de 36 ha, para purificar un promedio anual de 195.000 m^3 de lixiviado. Los resultados mostraron que los lixiviados de las instalaciones podrían purificarse a USD $0,34/\text{m}^3$ en comparación con USD $0,62/\text{m}^3$ para el tratamiento convencional, en una planta de tratamiento de aguas residuales.

Yang et al. (2015) realizaron un experimento de campo para evaluar las eficiencias de remoción de diferentes plantas autóctonas, en surcos sembrados con la vegetación, sobre los contaminantes presentes en fuentes difusas de agua. Los autores reportan que las eficiencias de remoción en sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) del surco del filtro con vegetación herbácea fueron significativamente más altas que las del surco del filtro con vegetación arbustiva.

Estudios sobre cargas orgánicas aplicadas a los sistemas de filtros verdes

No existe un criterio único sobre la tasa máxima de carga orgánica que es capaz de asimilar un suelo. La carga orgánica aplicada a los sistemas de filtros verdes, medida como kg DQO/ha-d o kg DBO/ha-d, está influenciada por el tipo de suelo que soporta a la vegetación. En las aguas residuales biodegradables la relación entre DQO/DBO es de aproximadamente 2,0. En las diferentes investigaciones realizadas con filtros verdes, cuando se les aplica aguas residuales provenientes del procesamiento de alimentos, se tienen los siguientes datos de aplicación de carga orgánica:

- Jewell et al. (1978) reportan que la capacidad máxima de asimilación orgánica de un suelo arenoso fue de 1.800 lb de DQO/acre-d a 16°C (2.017 kg DQO/ha-d) y 18.000 lb/acre-d a 20°C (20.175 kg DQO/ha-d).
- Loehr et al. (1979) citados por Mokma (2006), reportan que algunos suelos tienen la capacidad de oxidar hasta 8.000 lb DQO/acre-d (8.966 kg DQO/ha-d).
- Spyridakis y Welch (1976), citados por Mokma (2006), reportan una carga de DBO para dos instalaciones de filtros verdes tratando aguas residuales provenientes del procesamiento de alimentos de 460 y 750 lb/acre-d (516 y 841 kg ha-d⁻¹).
- Carawan et al. (1979) reportan que cargas de DBO entre 40 y 100 lb/acre-d (45 y 112 kg ha-d⁻¹) habían sido utilizadas con éxito en filtros verdes y sugirieron una tasa máxima de carga de DBO de 200 lb/acre-d (224 kg ha-d⁻¹), como una tasa de carga segura para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria del papel en filtros verdes.
- Fuller y Warrick (1985), citados por Mokma (2006), reportan que el 99% de la DBO aplicada fue asimilada por un suelo arenoso que recibió una carga de DBO de 138 lb/acre-d (155 kg ha-d⁻¹); sin embargo, cuando la carga hidráulica fue de 81.500 gal/acre-d (3,0 pulgadas/d) el suelo se saturó. Por lo tanto, la carga hidráulica y la carga de DBO son importantes en el diseño de un sistema natural de filtros verdes para el tratamiento de aguas residuales.
- Mannapperuma (2005) citado por Mokma (2006), recomendó que la tasa de carga de DBO sea de 30 a 100 lb/acre-d (34 - 112 kg ha-d⁻¹), dado que las cargas excesivas de DBO producirán condiciones anaeróbicas en los suelos.
- Aryal y Reinhold (2015) utilizaron cargas orgánicas de hasta 1.600 kg DBO/ha-d con una carga hidráulica entre 2,5 y 15,4 mm, obteniendo muy buenos rendimientos. Aunque en la mayor parte de los estudios realizados, los valores recomendables se establecen entre 150 - 250 kg DBO/ha-d (Crites et al., 2000).

Estudios sobre cargas hidráulicas aplicadas a los sistemas de filtros verdes

Existe gran cantidad de información respecto a las cargas hidráulicas de agua limpia que utilizan los agricultores cuando riegan sus cultivos como complemento a las deficiencias de la lluvia. Por lo general, estas cargas hidráulicas oscilan entre 2.700 y 16.000 gal/acre-d (0,1 - 0,6 pulgadas/d). El valor de las cargas hidráulicas varía según la distribución de las precipitaciones, la textura del suelo y las necesidades de agua de los cultivos. Cuando el riego se realiza como un complemento a las precipitaciones, los agricultores aplican la menor cantidad de agua limpia posible para obtener un buen rendimiento de los cultivos. Cuando para el riego se dispone de aguas residuales provenientes de las industrias del procesamiento de alimentos, se aplica la máxima cantidad de agua posible, minimizando la escorrentía, el encharcamiento y la contaminación de aguas subterráneas. En estos casos, el rendimiento de los cultivos no es la prioridad, como sí lo es el manejo de las aguas residuales (Mokma, 2006).

Day et al. (1972) citados por Mokma (2006), determinaron que la tasa de infiltración de un suelo franco limoso regado con aguas residuales provenientes de plantas de tratamiento fue un 20% menor a la del suelo regado con agua de pozo. Carawan et al. (1979) expresan que el rango de cargas hidráulicas aplicadas a suelos por las aguas residuales generadas en 21 instalaciones de procesamiento de alimentos, fue de 2.100 a 150.000 gal/acre-d (0,08 a 5,5 pulgadas/d). Crites et al. (2002) citados por Mokma (2006), recomiendan que las tasas de carga hidráulica para sistemas de aplicación al suelo sean similares a las tasas de carga hidráulica para riego con agua limpia.

Los dos factores que limitan las tasas de carga hidráulica son el encharcamiento y las altas concentraciones en DBO de las aguas residuales. Ambos factores pueden crear déficits de oxígeno en la zona radicular de los cultivos. La eliminación de DBO se logra mediante microorganismos que convierten los materiales orgánicos en CO_2 , H_2O y minerales; este es un proceso oxidativo que es el resultado más de los microorganismos presentes en el suelo que de aquellos presentes en el agua residual (Vela & Eubanks (1973) citados por Mokma (2006).

Selección de la vegetación de los sistemas de filtros verdes

La elección de la vegetación suele ser el primer paso en el proceso de diseño preliminar del filtro verde, ya que la mayoría de las restantes decisiones asociadas al proyecto están en función del tipo de vegetación seleccionada.

Los cultivos más adecuados para los filtros verdes son aquellos que presentan una elevada capacidad de asimilación de nutrientes, alto consumo del agua, elevada tolerancia a la humedad del suelo, baja sensibilidad a los constituyentes del agua residual y mínimas necesidades de control. Los cultivos que reúnen todas o la mayoría de estas características incluyen algunos forrajes perennes y turbas, ciertas especies arbóreas y algunos cultivos agrícolas. Los forrajes que se han empleado con resultados satisfactorios incluyen al género *Phalaris* spp. (entre los que se encuentra el alpiste) y a las especies *Festuca arundinacia* (cañuela), *Lolium multiflorum* (raigrás anual) y *Cynodon dactylon* (grama común). Los cultivos arbóreos más comunes empleados son combinaciones de pinos y coníferas; las posibles especies a utilizar incluyen a los géneros *Cercis* spp., *Catalpa* spp. *Populus* spp. (álamos o chopos), *Ulmus parvifolia* (olmo chino), *Pinus strobus* (pino blanco), *Eucalyptus* spp. (eucaliptos) y *Salix* spp. (sauces) (Metcalf & Eddy, 1995).

Para el caso de las aguas residuales del beneficio del café, que poseen un pH ácido, se han identificado y evaluado para su tratamiento, vegetación herbácea como el pasto elefante morado y el pasto vetiver.

***Pennisetum purpureum* Schumach - Pasto elefante morado**

Descripción. El pasto elefante (Figura 4) se encuentra formando parte de la tribu Paniceae, una de las más ricas en géneros y especies dentro de la familia Graminae, es una especie que crece a través de los trópicos húmedos de todo el mundo, conocida con diversos nombres, como: falsa caña de azúcar, napier grass, hierba elefante, capín elefante, bajra. La hierba elefante es del tipo alto perenne, con alturas entre 1,0 a 3,0 m en suelos fértiles, sus tallos son erectos y con nudosidades, en las cuales se encuentran las yemas y los primordios radiculares. Debido a este

hábito de crecimiento es preferido como un pasto para corte. Las hojas, envainadoras, son grandes, de 60 a 100 cm de largo y ancho de 2 a 4 cm, dependiendo de la variedad y de la fase de desarrollo vegetativo o sexual, siendo más anchas en la primera. Las vainas inferiores son más largas que el entrenudo en las dos, cuatro y seis primeras hojas. La sierra de las hojas es más o menos fina. El número de estomas puede variar ligeramente, así como los nervios de la hoja. Los pelos de la vaina, en el cogollo pueden ser cortos o largos y los pelos del limbo pueden estar en la base o en



Figura 4. *Pennisetum purpureum* (Pasto elefante morado).

todo el limbo, en el haz o en el envés. La inflorescencia es una panícula espiciforme, densa y cilíndrica, donde las espiguillas se disponen en grupos subsentados, rodeados de cerdas, con una principal más larga. El sistema radical es profundo, llegando a alcanzar los 4,50 m de profundidad; no obstante, cuando esta hierba es sometida a corte, muchas de las raíces ocupan los primeros 10 cm de la capa superior del suelo y su extensión, en esta profundidad, depende del espaciamiento entre surcos y la profundidad de siembra (Machado et al., 2014).

Distribución y ambiente. Su distribución está regulada principalmente por el requerimiento de altas temperaturas y precipitación no menor a los 1.000 mm año⁻¹. En algunas zonas su cultivo es restringido a pequeñas extensiones, debido a los altos requerimientos de agua para producir altos volúmenes de forraje (Machado et al., 2014). Es una especie que se adapta bien a las condiciones tropicales y sub-tropicales, desde el nivel del mar hasta los 1.800 m, obteniendo su mejor desarrollo por debajo de los 1.500 m de altitud, con temperaturas entre 17 a 27°C, con una humedad relativa entre el 60% y el 80%, con una precipitación de 1.200 a 2.200 mm año⁻¹ (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [CORPOICA], 2014).

Suelos. Se adapta a una amplia gama de suelos, prefiriendo suelos fértiles y profundos, en las zonas de alta pluviosidad del trópico. Aunque es recomendado en suelos salinos, preferentemente de origen arcilloso, sus rendimientos se ven afectados con el incremento de la salinidad, así como por las condiciones de alcalinidad. Por lo regular se mantiene en suelos húmedos, sueltos y permeables, aunque prospera bien en suelos arcillosos y arenosos. No requiere de topografía llana, ya que se ha establecido bien en suelos desnudos barrancosos y en tierras con pendientes deslizantes (Machado et al., 2014).

Siembra y establecimiento. Presenta dos tipos de reproducción: sexual (por semillas) y asexual (por esquejes vegetativos). La primera, por una parte, presenta problemas de baja fertilidad y por la otra, se obtienen plantas pequeñas, de crecimiento y desarrollo lento; de aquí que esta forma de reproducción se haya utilizado únicamente con fines selectivos, por lo que la mejor forma de multiplicación es el uso de esquejes vegetativos. La semilla vegetativa es de buena germinación cuando los tallos tienen alrededor de seis meses de edad y cada esqueje presenta de tres a cinco nudos (Machado et al., 2014).

La distancia de siembra ha sido objeto de investigaciones en el establecimiento de esta especie, sin diferencias significativas en rendimientos de forraje para las diferentes densidades de plantación evaluadas (50, 75, 100 y 150 cm entre surcos). Se recomienda la distancia de 1 m, ya que es la más adecuada para el regadío por zanja y el cultivo mecanizado; sin embargo, en surcos espaciados a 60 cm y con 30, 45 o 60 cm de separación a lo largo del surco, se han encontrado ventajas a favor de la distancia de 60 x 30 cm, lo que presupone ventajas cuando la semilla es distribuida con las distancias más cortas a lo largo del surco. Puede sembrarse en cualquier época del año si se cuenta con posibilidades de irrigación (Machado et al., 2014).

Usos de la biomasa. El pasto elefante resulta muy importante dentro de la ganadería, debido a su alto potencial como forraje, motivado a su cantidad y calidad. Debido a su composición y morfología puede ser suministrado a distintos tipos de ganado, para incentivar la producción de leche y carne. Su contenido de proteína, varía entre 8% a 12%, en sus hojas presenta un contenido aproximado de 9%, en sus tallos 8% y presenta una digestibilidad de 65% a 75% (Flores, 2020).

Utilización en depuración de aguas. Ramírez (2015) reporta eficiencias de remoción del orden del 77,92% para la DQO, del 74,12% para la DBO₅, del 94,76% para los SST, del 42,01% para el N-NTK y del 24,01% para el P_T, para el pasto elefante morado en humedales artificiales de flujo subsuperficial, tratando aguas residuales domésticas.

Chrysopogon zizanioides L. Roberty - Pasto vetiver

Descripción. El pasto vetiver (Figura 5) es una planta perenne de la familia de las gramíneas, originaria de India, de tupidos penachos, con inflorescencia y semilla estériles, que se reproducen con dificultad. La planta crece en grandes macollos a partir de una masa radical muy ramificada y esponjosa. Tallos erguidos, en forma recta, alcanzan una altura de 0,5 a 1,5 m, hojas relativamente rígidas, largas y angostas, de 75,0 cm de largo y no más de 8,0 mm de ancho. La panícula (en donde se desarrolla la inflorescencia) tiene entre 15,0 a 40,0 cm de largo. A diferencia de la mayoría de las gramíneas, las raíces del vetiver crecen masivamente de manera vertical y alcanzan una profundidad de hasta 4,0 m (Figura 6). Este profundo sistema de raíces hace que la planta de vetiver sea extremadamente tolerante a las sequías y difícil de arrancar por fuertes corrientes de aire (Alegre, 2007).

El pasto vetiver ha demostrado ser ideal para la conservación del suelo y del agua, teniendo usos adicionales en biorremediación, bioingeniería, forraje, agroforestería, medicina, artesanía y energía, entre otros (Alegre, 2007).



Figura 5. *Chrysopogon zizanioides* (Pasto vetiver).

Características fisiológicas. La planta puede soportar sequías extremas debido a su alto contenido de sales en la savia de sus hojas, así como inundaciones por largos períodos, con reportes de hasta 45 días de inundación en el terreno (Alegre, 2007). Presenta tolerancia a variaciones climáticas extremas y temperaturas extremas de -15°C a +55°C. Otras características fisiológicas del pasto, según Truong et al. (2008), son:



Figura 6. Raíces de vetiver de una planta establecida en un contenedor con agua lluvia.

- Habilidad para rebrotar rápidamente después de haber sido afectado por sequías, heladas, salinidad y otras condiciones adversas, al mejorar las condiciones del tiempo o añadir correctivos al suelo.
- Tolerancia a un amplio rango de pH, desde 3,30 a 12,50 sin enmiendas del suelo.
- Alto nivel de tolerancia a herbicidas y plaguicidas.
- Muy tolerante a medios de crecimiento altos en acidez, alcalinidad, salinidad, sodicidad y Mg.

Otro aspecto particular del pasto vetiver es su alto régimen de transpiración, que juega un papel clave en la fitorremediación de aguas residuales, debido al hecho que la planta transpira suficiente agua del medio de cultivo que puede remover efectivamente los contaminantes. Se ha establecido una correlación de 1,0 kg de biomasa seca en forma de brotes de pasto vetiver, con un uso de 6,86 L de agua/d. El pasto vetiver de 12 semanas, con una cosecha de materia seca estimada en 40,7 t ha⁻¹, al máximo de su ciclo de producción, usa aproximadamente 279 m³ de agua/ha-d, equivalente a 28 L de agua/m²-d (Truong & Danh, 2015).

Comparada con otras plantas de humedal como *Iris pseudacorus*, *Typha* spp., *Schoenoplectus validus* y *Phragmites australis*, el pasto vetiver tiene el mayor régimen de uso de agua. Por ejemplo, a un régimen promedio de consumo de 600 mL d⁻¹ en un período de 60 días, el pasto vetiver usó 7,5 veces más agua que *Typha* spp. (Truong & Danh, 2015).

Rodríguez (2009) determinó las tasas de evapotranspiración de cuatro especies de macrófitas flotantes de uso común en sistemas de tratamiento con plantas acuáticas, encontrando para

Eichhornia crassipes (jacinto de agua) valores promedio de 3,03 mm d⁻¹, para *Pistia stratiotes* (lechuga de agua) valores promedio de 1,64 mm d⁻¹ y para *Salvinia auricula* (oreja de agua) valores promedio de 1,50 mm d⁻¹. El mismo autor reporta tasas promedio de evapotranspiración de 11,18 mm d⁻¹ (con un valor mínimo de 8,00 mm d⁻¹ y máximo de 14,15 mm d⁻¹) para *Typha angustifolia* (enea), especie emergente, utilizada en humedales artificiales.

McIntyre and Riha (1991), citados por Rodríguez (2009), reportan para humedales bajo invernadero sembrados con las especies *Typha* y *Scirpus*, pérdidas medias por evapotranspiración en los sistemas con vegetación de 32 mm d⁻¹.

Características ecológicas. Aunque el vetiver es muy tolerante a ciertas condiciones extremas de suelo y clima, como pasto tropical es muy intolerante a la sombra. La sombra reduce su crecimiento y en casos extremos, puede incluso eliminar el vetiver en el largo plazo; por lo tanto, el vetiver crece mejor en espacios abiertos y libres de arvenses, siendo necesario el control de arvenses en la etapa de establecimiento. En terrenos erosionables e inestables el vetiver reduce la erosión, estabiliza el terreno, permite la conservación de humedad y nutrientes, mejora el microambiente y permite el establecimiento de otras especies espontáneas o cultivadas. Debido a esto se considera al vetiver una planta nodriza en tierras degradadas (Truong et al., 2008).

Distribución y ambiente. Es una especie que se adapta bien a las condiciones tropicales y sub-tropicales, desde el nivel del mar hasta los 2.500 m de altitud. Estudios revelan que las mejores condiciones para su establecimiento, son aquellas que presentan una temperatura promedio de 25°C y precipitación superior a los 700 mm anuales. En cuanto a la distribución de las precipitaciones, se requieren por lo menos 3 meses de época lluviosa, sobre todo en sus primeros meses de adaptación. Aunque el vetiver es una planta tropical, puede sobrevivir y desarrollarse en condiciones de frío extremo. Bajo condiciones de escarcha o helada su parte aérea muere o entra en latencia y se torna púrpura, pero sus puntos de crecimiento subterráneos sobreviven. Estudios demuestran que el crecimiento óptimo de raíces se presenta a temperaturas del suelo de 25°C, pero las raíces continúan creciendo hasta 13°C (Truong et al., 2008).

Suelos. Crece en un rango amplio de suelos y con diferentes niveles de fertilidad. Es muy resistente a la sequía y a la falta de fertilidad una vez establecido, gracias a su fuerte y profundo sistema radicular, y a su asociación con microorganismos del suelo (principalmente micorrizas que ayudan con la extracción de nutrientes), obtiene elementos nutritivos en suelos poco fértiles. Posee una alta eficiencia en absorber nutrientes tales como N y P y metales pesados en aguas contaminadas. Tiene una alta tolerancia al Al, Mn y metales pesados tales como As, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, Hg, Se y Zn en los suelos. Un resumen del rango de adaptabilidad de la planta de vetiver se muestra en Tabla 5 (Truong et al., 2008).

Tabla 5. Rango de adaptabilidad de la planta vetiver a condiciones adversas. *Fuente: Adaptado de Truong et al. (2008).*

Condición	Valor
Condición adversa del suelo	
pH	Entre 3,3 a 12,5
Salinidad	17,5 mS cm ⁻¹ (50% reducción rendimiento) 47,5 mS cm ⁻¹ (sobrevivencia)
Nivel de saturación con Al (Sat Al%)	68% - 87%
Nivel de Manganeseo	> 578 mg kg ⁻¹
Sodicidad (Na intercambiable)	48%
Magnesianidad (Mg)	2.400 mg kg ⁻¹
Fertilizante	
El vetiver se puede establecer en suelos de baja fertilidad debido a su asociación con micorrizas	N y P (300 kg ha ⁻¹)
Metales pesados	
Arsénico (As)	100 - 250 mg kg ⁻¹
Cadmio (Cd)	22 mg kg ⁻¹
Cobre (Cu)	174 mg kg ⁻¹
Cromo (Cr)	200 - 600 mg kg ⁻¹
Níquel (Ni)	50 - 100 mg kg ⁻¹
Mercurio (Hg)	> 6 mg kg ⁻¹
Plomo (Pb)	3.123 mg kg ⁻¹
Selenio (Se)	> 74 mg kg ⁻¹
Zinc (Zn)	3.418 mg kg ⁻¹
Clima	
Precipitación anual	250 - 5.000 mm
Temperatura del suelo (heladas)	-11 a -22°C
Olas de calor	45 - 60°C
Sequía (precipitación no efectiva)	15 meses

Propagación, siembra y establecimiento. El proceso de propagación es una etapa muy importante para el buen establecimiento de la planta.

De acuerdo con Truong et al. (2008) las cuatro maneras de propagar el vetiver son: 1. Separando brotes maduros de la macolla de vetiver o plantas madre, obteniendo hijos (“esquejes”) a raíz desnuda, para ser plantados de forma inmediata en el campo o en contenedores; 2. Usando varias partes de las plantas madre de vetiver; 3. Multiplicación de yemas o micropropagación *in vitro* para propagación a gran escala; 4. Cultivo de tejidos usando una pequeña parte de la planta para propagación a gran escala.

La mejor forma de propagarlo es por esquejes, los cuales aseguran plantas con las mismas características genéticas. Se define un esqueje como un material de propagación asexual, compuesta de pedazos de tallos y hojas (10 a 20 cm de alto), con una pequeña cantidad de raíces (no más de 5 cm). Cuando no se dispone de esquejes y se van a propagar por primera vez, es necesario adquirir este material del campo de los agricultores que ya tiene experiencia en su manejo (Alegre, 2007).

La separación de brotes de una macolla madre requiere cuidado, de manera que cada hijo incluya al menos dos a tres brotes y una parte de la corona (cormo, la parte dura de la planta entre las raíces y los brotes o vástago). Después de la separación, los esquejes deben ser de 10 a 20 cm de largo y se cortan las raíces hasta unos 5 cm de la base. Se lavan los esquejes con agua limpia y que no queden residuos de suelo. Los esquejes pueden ser sumergidos en varios tratamientos, incluyendo hormonas de enraizamiento, estiércol líquido, lodo de arcilla o simplemente en recipientes con agua. Para acelerar el crecimiento es necesario mantener los esquejes húmedos y a la luz, hasta plantarlos (Truong et al., 2008).

Fernández & Morillo (2006) en sus trabajos de investigación con pasto vetiver, concluyeron que:

- Para una alta sobrevivencia del material sembrado son determinantes la preparación previa del material de siembra, la utilización de tres esquejes por punto de siembra, la siembra oportuna y el suministro de agua durante los cinco primeros meses de la siembra.
- La densidad de siembra entre plantas influye notablemente en el diámetro de la corona, número de hijos y fibra producidos por macolla, encontrándose incrementos sustanciales en esos indicadores, en la medida que aumenta la densidad de siembra.
- Si se dispone de suficiente material vegetativo y limitaciones de tierra, la decisión más acertada es implementar una alta densidad de siembra.
- El avance del cierre de las macollas depende principalmente de la sobrevivencia y el distanciamiento de siembra. Para un distanciamiento de siembra de 20 x 20 cm, se encontró un alto grado de cierre, recomendándose distancias más estrechas cuando se tenga como propósito la formación eficiente de barreras, al año de edad del cultivo.

Juliard (1999) citado por Fernández & Morillo (2006), señala que una técnica básica para aumentar la cantidad de plantas a nivel de vivero es la siembra en tierra de tres hijos por punto en una distancia de 30 x 30 cm en suelo fértil y suelto. Dependiendo de las condiciones del sitio pueden obtenerse entre 30 y 60 hijos por macolla en 6 meses.

Uso de la biomasa. Desde hace muchos años el pasto vetiver y sus raíces son reconocidos por su fragancia, propiedades medicinales y propiedades de control de la erosión, por lo que es utilizado en programas de conservación del suelo. El aceite aromático presente en las raíces del vetiver es utilizado en perfumería con un valor comercial muy alto. Varios estudios de investigación han demostrado que el pasto vetiver podría usarse en la biorremediación

de desechos tóxicos, cercos de granjas, control de termitas, artesanías y medicina natural (Gnansounou et al., 2017).

Las hojas del vetiver son un forraje apetecible y fácilmente consumido por vacas, chivos y ovejas. Es palatable para vacas lecheras, ganado, ovejas, caballos, conejos, cerdos, búfalos y carpas. El pasto vetiver joven es bastante nutritivo y es comparable con los pastos rhodes y kikuyo maduros; sin embargo, el valor nutritivo del pasto vetiver maduro es bajo y con escasas proteínas crudas. Las hojas del vetiver son nutritivas cuando son cortadas (podadas) en intervalos de entre uno y tres meses, dependiendo de las condiciones climáticas. Su contenido nutritivo, como muchos pastos tropicales, varía de acuerdo a la temporada, estado de crecimiento y fertilidad del suelo (Truong et al., 2008).

Utilización en depuración de aguas. El pasto vetiver fue reconocido por primera vez en 1995 por tener características súper absorbentes, adecuadas para la eliminación de lixiviados y efluentes generados en vertederos y plantas de tratamiento de aguas residuales, presenta tallos rígidos y erectos que pueden soportar flujos de alta velocidad, un crecimiento abundante y grueso que forma una barrera porosa viva que actúa como un filtro, atrapando sedimentos gruesos y finos, y un sistema radical profundo, extenso y penetrante, que puede reducir y hasta eliminar los vertidos (Truong & Hart, 2001). Ramírez (2015) reporta eficiencias de remoción promedio del orden del 65,61% para la DQO, del 57,41% para la DBO₅, del 91,65% para los SST, del 38,07% para el N-NTK y del 22,00% para el P_T, para el pasto vetiver utilizado en humedales artificiales de flujo subsuperficial, tratando aguas residuales domésticas.

Consumo de agua en los sistemas de filtros verdes

El consumo de agua por parte de plantas también recibe el nombre de evapotranspiración (ET), la cual es un parámetro importante en la ecuación de balance hídrico que se emplea para realizar los cálculos hidráulicos. El uso consuntivo del agua varía con las características físicas y la etapa de crecimiento del cultivo, el nivel de humedad y el clima local.

Consumo total de agua en los sistemas de filtros verdes con cero descargas

La evapotranspiración (ET) se ha constituido en un método de tratamiento y eliminación de aguas residuales en el sitio y se constituye en una alternativa a los sistemas convencionales de aplicación al suelo, particularmente para sitios donde la protección de las aguas superficiales y subterráneas es esencial o donde la infiltración del suelo no es posible. La ET combina dos procesos separados que eliminan el agua de la superficie del suelo por evaporación y por transpiración, por parte de las plantas. Un sistema de ET es único en su capacidad de evaporar aguas residuales a la atmósfera, sin descargarlas en el depósito de agua superficial o subterránea. Sin embargo, en algunos casos el concepto de la ET también puede combinar la filtración con la evaporación como alternativa. Uno de los aspectos más importantes de los

sistemas de ET es su capacidad para evaporar todas las aguas residuales descargadas en los sistemas, además de la lluvia que cae sobre los mismos. Parte de los nutrientes presentes en las aguas residuales pueden reciclarse a través del crecimiento de la biomasa vegetal y de la biomasa cosechada, la cual podría utilizarse como fuente de bioenergía. En Dinamarca están en funcionamiento más de 500 sistemas de ET plantados con sauces. Los sistemas generalmente consisten en una cuenca revestida de polietileno de alta densidad, de 1,5 m de profundidad, llena de tierra y plantada con clones de *Salix viminalis* L. (sauce). La superficie de los sistemas depende de la cantidad y calidad de las aguas residuales a tratar y de la precipitación anual local. Un solo hogar en Dinamarca normalmente requiere entre 120 y 300 m². La precipitación anual en el sitio de construcción es un parámetro de dimensionamiento importante. Las aguas residuales sedimentadas se dispersan bajo tierra en el lecho bajo presión. Los tallos de los sauces se cosechan regularmente para estimular el crecimiento y eliminar algunos nutrientes y metales pesados (Brix & Arias, 2011).

Investigaciones sobre tasas de evapotranspiración de la vegetación en los sistemas de filtros verdes

Guidi et al. (2008) evaluaron la evapotranspiración decadal (ET_c) y el coeficiente de cultivo (kc) de sauces y álamos utilizados como vegetación en filtros verdes y cultivados en condiciones fertilizadas (F) y sin fertilizar (NF). En la primera temporada de crecimiento, la ET_c total observada fue, respectivamente, 620 mm (NF) y 1.190 mm (F) en sauce y 590 mm (NF) y 725 mm (F) en álamo. Durante la segunda temporada de crecimiento, la ET_c mostró un aumento general, principalmente en cultivos fertilizados donde osciló entre 890 mm (NF) y 1.790 mm (F) en sauce y 710 mm (NF) y 1.100 mm (F) en álamo. El kc alcanzó en ambos años su valor máximo entre finales de agosto y principios de septiembre. En 2004, el kc máximo osciló entre 1,25 y 2,84 en sauce y entre 1,06 y 1,90 en álamo, mientras que en 2005 osciló entre 1,97 y 5,30 en sauce y 1,71 y 4,28 en álamo.

Pistocchi et al. (2009) estimaron la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y el coeficiente del cultivo (kc) de álamos y sauces en filtros verdes cultivados en condiciones de alta fertilización (HF) y baja fertilización (LF). Durante la temporada de crecimiento de 2006 (alrededor de 132 días), la ET_c fue de 319 mm (LF) y 719 mm (HF) en álamos y 607 mm (LF) y 919 mm (HF) en sauce, con valores máximos diarios de 11,55 mm en álamo (HF) y de 15,09 mm en sauce (HF).

Frédette et al. (2019) realizaron una revisión exhaustiva de las tasas de ET proporcionadas en la literatura para el género *Salix* spp. Después de analizar 57 estudios, en 16 países, 19 especies de sauces y docenas de cultivares, encontraron una ET media de $4,6 \pm 4,2$ mm d⁻¹, con valores mínimos de 0,7 mm d⁻¹ y máximos de 22,7 mm d⁻¹.

Istenic et al. (2017), evaluaron un sistema evapotranspirativo (EWS) de sauces para tener cero descargas de aguas residuales. En dicho sistema, toda el agua afluyente es utilizada para el

crecimiento de los árboles y llevada a la atmósfera por procesos de evaporación y transpiración. Los autores reportan que los clones de sauce utilizados para lograr cero descargas del agua deben tener una alta producción de biomasa y una alta resiliencia a inundaciones permanentes. En el estudio presentado, instalaron un EWS piloto de 27 m² en noviembre de 2015, lo que permitió la evaluación de tres diferentes clones de sauce. La altura y diámetro del tallo y el número de brotes se midieron semanalmente en el primer año de crecimiento, junto con los parámetros de calidad del agua. Los autores reportan que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas en la altura y el diámetro del tallo entre los tres clones evaluados en el sistema EWS y que todos ellos superaron a los tratamientos control, en crecimiento, evidenciando los efectos positivos de la alta disponibilidad de aguas residuales en el crecimiento de los sauces.

Principales aspectos a tener en cuenta en el diseño de los filtros verdes

El proyecto de diseño de un filtro verde consta, básicamente de dos etapas: 1) diseño preliminar y 2) proyecto constructivo.

Entre los aspectos a tener en cuenta en el diseño están: la evaluación y selección del sitio, la selección de la vegetación, las necesidades de pretratamiento para el agua residual y el método de aplicación y distribución del agua al suelo con vegetación.

Evaluación y características del sitio (Metcalf & Eddy, 1995).

Las principales características del sitio y los criterios generales empleados para su elección se indican en la Tabla 6. La permeabilidad y altura de la columna de suelo hasta alcanzar las

Tabla 6. Características del sitio y criterio de selección para instalación de filtros verdes. *Fuente: Adaptado de Metcalf y Eddy (1995).*

Característica	Aptitud		
	Óptima	Conveniente	Pobre
Suelo			
pH (Unidades)	5,50 - 8,40	5,20 - 5,50	< 5,20 - > 8,40
Porcentaje de sodio intercambiable (%)	< 5	5 - 10	> 10
Conductividad eléctrica (mS cm ⁻¹)	< 4	4 - 8	> 8
Permeabilidad (mm h ⁻¹)	5 - 50	1,5 - 5,0; 50 - 150	< 1,5; > 150
Nivel freático (m)	> 1,5	0,6 - 1,5	< 0,6
Pendiente (%)	0 - 2	2 - 15	> 15
Uso del suelo	Agrícola	Baja intensidad	Urbano/industrial
Hidrología	Sin riesgo de inundación	Bajo riesgo de inundación	Elevado riesgo de inundación

aguas subterráneas, y la presencia de un estrato o superficie impermeable, normalmente son las características más importantes para determinar la aptitud de un terreno para la instalación de un filtro verde. La permeabilidad vertical o conductividad hidráulica, bajo condiciones de saturación del estrato u horizonte más restrictivo del terreno, determinan las cargas hidráulicas admisibles y afectan a la vegetación que pueda disponerse y la elección y diseño de los sistemas de distribución del agua. Los suelos con permeabilidades medias, de 5 a 50 mm h⁻¹, son los más adecuados para la instalación de los filtros verdes, ya que proporcionan el mejor equilibrio entre la retención de los constituyentes del agua residual y la facilidad de drenaje.

Para la retención de los componentes del agua residual, la acción microbiana y el desarrollo de las raíces, es importante que la altura de la columna de suelo antes de alcanzar los estratos rocosos inferiores sea la adecuada. Para el tratamiento del agua residual es necesario disponer de una profundidad mínima de 0,9 a 1,2 m, pero para cultivos de raíces profundas se necesitan profundidades mayores. Para profundidades menores, será necesario disponer un sistema de drenaje inferior.

Selección de la vegetación

Las características más importantes de la vegetación utilizada en los filtros verdes incluyen la capacidad de asimilación de nutrientes, el consumo de agua y la tolerancia a la salinidad.

La capacidad de asimilación de los nutrientes por parte de la vegetación presente en el filtro verde no es un valor fijo, depende de la productividad de la especie sembrada y del contenido de nutrientes en el suelo. El consumo de agua varía con las propiedades físicas del suelo, la etapa de crecimiento del cultivo y el clima local. La salinidad debe controlarse por medio de un drenaje y lixiviado adecuados o por la selección de vegetación que toleren elevados niveles de salinidad (Metcalf & Eddy, 1995).

Tratamiento previo a la aplicación del agua en filtros verdes

El tratamiento de aguas residuales en sistemas de filtros verdes debe considerarse como un proceso unitario a combinar con otros procesos para conseguir un sistema de tratamiento completo del agua residual. El tratamiento previo a la aplicación es necesario por una serie de razones que incluyen la protección de la salud pública, el control de condiciones desagradables, las limitaciones de los sistemas de aplicación, la reducción de la presencia de constituyentes limitantes del agua residual y aspectos relacionados con el terreno y los cultivos. El grado de tratamiento previo puede variar desde el tratamiento primario al avanzado. Para los sistemas de filtros verdes, el tratamiento previo debería ser el mínimo necesario para asegurar que no se presenten riesgos para la salud pública ni se produzcan condiciones desagradables. Para este tipo de sistemas, el pretratamiento mínimo recomendado es el tamizado y la sedimentación primaria (Metcalf & Eddy, 1995).

Métodos de aplicación y distribución del agua residual (Metcalf & Eddy, 1995)

El método de aplicación y distribución del agua residual se selecciona en las primeras etapas del diseño preliminar, ya que la eficiencia de aplicación del sistema de distribución constituye un parámetro importante en las necesidades totales de agua de riego. Los métodos de aplicación pueden ser: por aspersión, riego superficial y por goteo.

Los sistemas de aspersión constituyen el método de distribución de uso más común, debido a que los aspersores pueden adaptarse a una amplia gama de suelos y condiciones topográficas, y pueden emplearse para diversos tipos de cultivos. Los sistemas de aspersión fijos, también llamados sistemas rígidos, pueden instalarse sobre la superficie del terreno o enterrados bajo el mismo.

Los dos principales tipos de sistemas de aplicación superficial son el riego por surcos y el riego por amelgas. En el riego por surcos, el efluente fluye por gravedad a través de los surcos, desde los cuales se infiltra en el terreno; generalmente, el agua se aplica a los surcos utilizando una tubería de aluminio provista de una serie de orificios o mediante sifones conectados a una acequia. En el riego por amelgas se preparan en el suelo unas ondulaciones paralelas a la dirección de la pendiente.

El riego por goteo consiste en una red de tuberías de distribución en las que el agua se suministra por unos pequeños emisores situados cerca de la base de la vegetación que se pretende regar.

Carga hidráulica de diseño para los sistemas de filtros verdes (Metcalf & Eddy, 1995)

La carga hidráulica o dotación de riego es el volumen de agua aplicado por unidad de superficie del terreno en un determinado período de tiempo (normalmente semanal, mensual o anual) y se expresa como mm semana^{-1} , mm mes^{-1} y mm año^{-1} . Para los sistemas de filtros verdes, la carga hidráulica de diseño se basa en la permeabilidad del suelo, siendo necesario considerar otros factores tales como la carga orgánica y la carga de sales.

Para determinar la carga hidráulica basándose en la permeabilidad del suelo, se utiliza la ecuación general de balance del agua (**Ecuación <1>**), empleando valores mensuales y considerando que se recoge y se vuelve a aplicar la totalidad del agua drenada.

$$L_w = ET - P + W_p \quad <1>$$

Donde:

L_w = carga hidráulica de agua residual calculada a partir de la permeabilidad del terreno, mm/mes.

ET = evapotranspiración del sistema, mm mes⁻¹.

P = precipitación, mm mes⁻¹.

W_p = velocidad de percolación del agua, mm mes⁻¹.

Superficie necesaria para los sistemas de filtros verdes (Metcalf & Eddy, 1995)

La superficie total necesaria para un sistema de filtro verde incluye la superficie cultivada o superficie de campo, así como la requerida para las instalaciones de tratamiento previo a la aplicación, zonas de amortiguación, accesos y depósitos de almacenamiento. La superficie necesaria se calcula a partir de la carga hidráulica del proyecto utilizando la Ecuación <2>:

$$A_w = (Q * 365 + \Delta V_s) / (10 * L_w) \quad <2>$$

Donde:

A_w = superficie necesaria, ha.

Q = caudal medio diario de agua residual, m³ d⁻¹.

ΔV_s = ganancias o pérdidas netas de agua almacenada debidas a las precipitaciones, evaporación y fugas en el depósito de almacenamiento, m³año⁻¹.

L_w = carga hidráulica del sistema, mm año⁻¹.

La superficie necesaria para los sistemas de filtros verdes operando con un caudal de 40.000 m³ d⁻¹, varían entre 24 y 80 ha.

Necesidades de almacenamiento del agua residual en sistemas de filtros verdes

En los casos en los que la cantidad de agua residual disponible exceda la carga hidráulica del sistema de filtros verdes, es necesario disponer de instalaciones para el almacenamiento del agua residual. Para estimar el volumen de almacenamiento necesario puede emplearse un procedimiento de cálculo de balance mensual de agua. El volumen de almacenamiento, estimado inicialmente, debe corregirse teniendo en cuenta cualquier ganancia o pérdida neta debida a precipitaciones, evaporación y fugas en el depósito de almacenamiento (Metcalf & Eddy, 1995).



Investigaciones en filtros verdes para el tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café

Evaluación a escala piloto

Se evaluó, a escala piloto, la idoneidad y eficiencia de la tecnología de filtros verdes para el tratamiento de efluentes procedentes del beneficio del café (aguas - mieles), en el Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé, Sede La Granja (Manizales, Caldas).

Para la implementación de los filtros verdes se seleccionaron seis parcelas de 2 m x 2 m (4 m²), equipadas con lisímetros, que permitieron recoger el agua infiltrada a 40 cm de profundidad del suelo, para posteriormente evaluar su calidad (Figura 7).

Vegetación utilizada en los sistemas de filtros verdes

En tres de los filtros verdes, la vegetación fue la que creció de forma espontánea, compuesta principalmente por *Paspalum conjugatum* (pasto horqueta) y *Panicum máximum* (arrocillo),

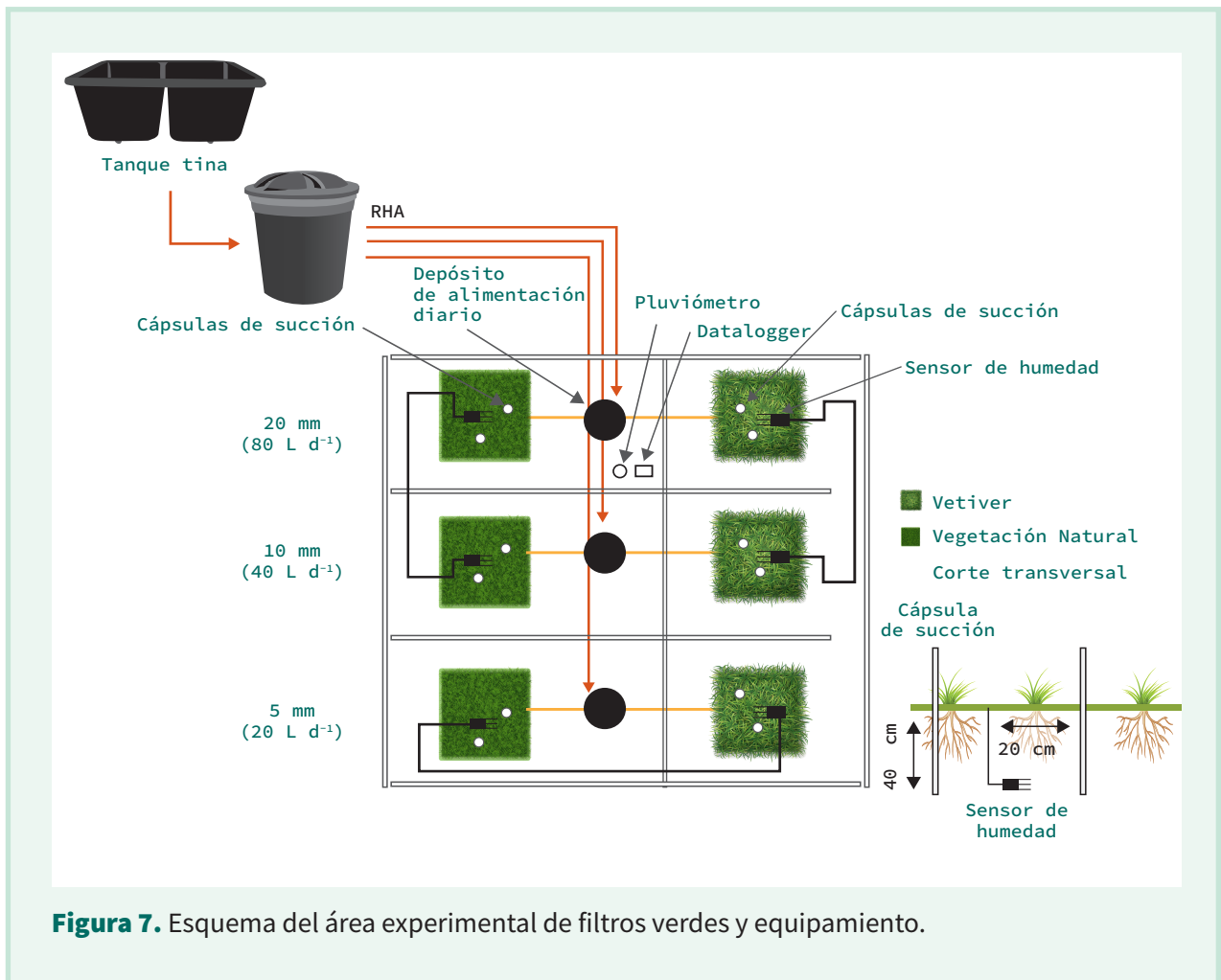


Figura 7. Esquema del área experimental de filtros verdes y equipamiento.

identificados con base en el manual de arvenses de Gómez & Rivera (1987). En los otros tres filtros verdes se sembró *Chrysopogon zizanioides* (pasto vetiver) en alta densidad (tres esquejes por sitio, en cuadro, cada 30 cm), los esquejes sembrados tenían 10 cm de tallo y 5 cm de raíz. El crecimiento de la vegetación se controló periódicamente con cortes regulares a 35 cm de altura, para maximizar su capacidad de crecimiento y, por lo tanto, su capacidad de captación de nutrimentos.

Tipo de suelo

La vegetación del filtro verde se sembró sobre un suelo de pendiente menor al 1%, una textura franco-arcillo-arenosa, con un valor de pH de 3,80, un contenido en materia orgánica de 3,9%, una permeabilidad de 200 mm h⁻¹ y una conductividad eléctrica de 0,038 mS cm⁻¹.

Tipo de agua residual utilizada y pretratamiento

El agua - miel de café aplicada a los filtros verdes procedía de un sistema de beneficio ecológico (consumo de agua menor a 5 L kg⁻¹ café pergamino seco), con una elevada carga orgánica y fue pre-tratada en un reactor hidrolítico - acidogénico (RHA) al cual se le incorporaron dispositivos para optimizar su desempeño (Rodríguez et al., 2019), lo que permitió una reducción de la carga orgánica de casi el 50%. Dicho pretratamiento es indispensable para eliminar parte de los sólidos en suspensión, reducir la carga orgánica y evitar problemas de colmatación en el sistema de riego.

Cargas orgánicas e hidráulicas aplicadas

Las cargas hidráulicas diarias aplicadas en los filtros verdes, fueron de 5, 10 y 20 mm (1 mm = 1 L m⁻²), con el fin de determinar la máxima carga asimilable por el suelo. En la Tabla 7 se relacionan las cargas orgánicas e hidráulicas aplicadas a los filtros verdes y el tipo de vegetación sembrada.

Tipo de distribución del agua residual

El agua residual pre-tratada del café fue aplicada a los filtros verdes mediante un sistema de riego por goteo, utilizando una tubería nivelada, para garantizar una distribución homogénea

Tabla 7. Cargas orgánicas e hidráulicas aplicadas en los filtros verdes.

Identificación filtro verde	Carga hidráulica	Carga DQO*	Carga DBO*	Tipo de vegetación
P5 PN	5 mm d ⁻¹	200 g DQO/d	250 kg DBO/ha-d	Vegetación Natural (PN)
P5 PV	5 mm d ⁻¹	200 g DQO/d	250 kg DBO/ha-d	Pasto Vetiver (PV)
P10 PN	10 mm d ⁻¹	400 g DQO/d	500 kg DBO/ha-d	Vegetación Natural (PN)
P10 PV	10 mm d ⁻¹	400 g DQO/d	500 kg DBO/ha-d	Pasto Vetiver (PV)
P20 PN	20 mm d ⁻¹	800 g DQO/d	1.000 kg DBO/ha-d	Vegetación Natural (PN)
P20 PV	20 mm d ⁻¹	800 g DQO/d	1.000 kg DBO/ha-d	Pasto Vetiver (PV)

*La carga aplicada se ha calculado en función de la concentración del efluente pre-tratado.

de la misma (Figura 8). Gracias al uso de un dispositivo de regulación de caudal diseñado en Cenicafé, se consiguió un caudal constante de $0,39 \text{ L min}^{-1}$.

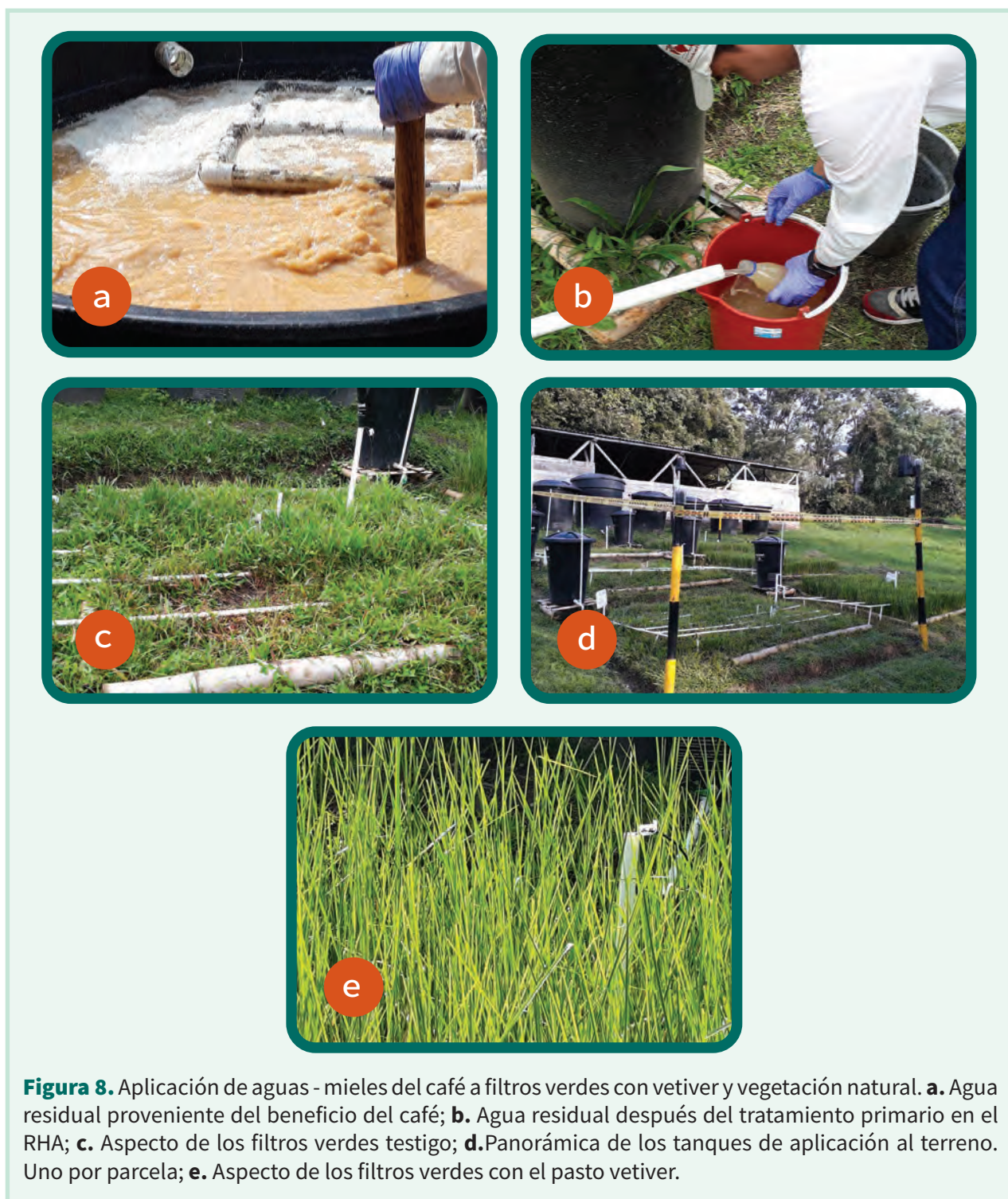


Figura 8. Aplicación de aguas - mieles del café a filtros verdes con vetiver y vegetación natural. **a.** Agua residual proveniente del beneficio del café; **b.** Agua residual después del tratamiento primario en el RHA; **c.** Aspecto de los filtros verdes testigo; **d.** Panorámica de los tanques de aplicación al terreno. Uno por parcela; **e.** Aspecto de los filtros verdes con el pasto vetiver.

Tiempo de aplicación del agua residual

Para simular las condiciones de producción de aguas - mieles en una finca cafetera, la aplicación del agua residual se realizó durante 10 semanas (período de cosecha), aunque el monitoreo de la calidad del efluente se prolongó durante otras 10 semanas (20 semanas en total), con el objetivo de evaluar el posible lavado de contaminantes por la lluvia. Durante los períodos de aplicación, el agua residual fue suministrada de lunes a viernes. Durante los períodos de reposo no se aplicó agua residual, pero se continuó con el monitoreo del sistema para evaluar posibles drenados.

A diferencia de la mayor parte de sistemas de tratamiento, un filtro verde diseñado para el tratamiento de las aguas residuales no tiene una salida puntual de agua tratada, por lo que su monitoreo debe realizarse mediante la recolección del agua drenada (percolada) a cierta profundidad. Para ello, cada parcela experimental fue dotada de dos cápsulas de succión, que permitieron extraer el agua percolada en el suelo para su posterior caracterización en el laboratorio. Dichas cápsulas fueron colocadas a 40 cm de profundidad, separadas 50 cm entre sí. En el centro de cada parcela también se colocó una sonda de humedad tipo Decagon 5TE (para determinar humedad, temperatura y conductividad eléctrica del suelo), a una profundidad de 40 cm, así como un pluviómetro para registrar la precipitación (Figura 9). Las sondas se conectaron a un datalogger tipo Decagon EM50 (de cinco canales) para el registro continuo de la información.

Evaluación del sistema de tratamiento de los filtros verdes

La evaluación se realizó en las siguientes etapas:

- Montaje del experimento (febrero del 2017).
- Período de aplicación (julio hasta mediados de septiembre del 2017). Diariamente se realizó la aplicación con agua residual del café pretratada y se tomaron muestras del agua percolada dos veces por semana (Figura 10).
- Período de reposo (desde mediados de septiembre hasta noviembre del 2017).

VARIABLES Y FRECUENCIA DE MUESTREO EN EL SUELO

En los filtros verdes, antes del inicio de la investigación, al final del período de aplicación con las aguas - mieles del café (10 semanas, 50 días hábiles) y al final del período de reposo (10 semanas), se realizó un muestreo compuesto del suelo para determinar sus características hidráulicas (punto de marchitez, capacidad de campo), características físicas (densidad aparente, textura, conductividad eléctrica) y características químicas (bases de cambio, minerales, materia orgánica, N, P).

Método de análisis características físicas. Se utilizaron las metodologías consignadas en métodos analíticos del laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2006).



Figura 9. Detalles de los filtros verdes evaluados. **a.** Estado de las parcelas antes del comienzo del experimento; **b.** Cápsula de succión horizontal; **c.** Recipiente de recolección de muestras y sistema de riego; **d.** Nivelación de la tubería de riego; **e.** Estado de las parcelas a la conclusión del experimento; **f.** Sistema de distribución de flujo.



Figura 10. Muestreo del agua de salida del filtro verde. **a.** Aspecto del agua de salida de los filtros verdes; **b.** Toma de muestra de la cápsula de succión en los filtros verdes con pasto vetiver; **c.** Aspecto del agua de la cápsula de succión.

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)).

Variables y frecuencia de muestreo en el agua residual afluyente y en el agua percolada

Para el caso de los afluentes al sistema de tratamiento con filtros verdes: se tomaron 2 veces por semana, para la etapa de aplicación, muestras del agua residual de ingreso y de salida del reactor hidrolítico - acidogénico (unidad en la cual ocurrió el tratamiento primario).

Para el caso de los efluentes del sistema de tratamiento con filtros verdes: se generaron muestras compuestas del agua percolada extraída en las cápsulas de succión (2 veces por semana).

Se determinaron las siguientes variables: pH, conductividad eléctrica, potencial redox, DQO, nitrógeno total y amoniacal, nitratos y fosfatos, sólidos totales y sólidos suspendidos totales.

Método 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 (PO₄³⁻). 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) (HACH, 1988). Se determinó como fósforo total. Los resultados del ensayo se midieron a 890 nm.

Nitratos (N-NO₃⁻). 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) (HACH, 1988). Los resultados del ensayo se midieron a 400 nm.

Nitrógeno Kjeldahl y nitrógeno amoniacal (N-NTK y N-NH₃). Se determinaron por el método titulométrico semi-micro-Kjeldahl (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

Sólidos Totales y Sólidos en Suspensión (SST). Se determinaron por el método gravimétrico (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

Potencial de óxido-reducción. Se determinó por el método potenciométrico. Equipo multiparámetro HACH HQ-40d. Sondas Intellical.

Conductividad eléctrica. Se determinó por el método potenciométrico. Equipo multiparámetro HACH HQ-40d. Sondas Intellical.

Resultados de la evaluación de los filtros verdes

A continuación, se presenta un resumen de los principales resultados obtenidos durante las 20 semanas de experimentación, tanto en lo referente a la capacidad de eliminación de contaminantes por parte del filtro verde, como a la evolución de las propiedades del suelo del área con vegetación y a la producción de biomasa de las especies sembradas.

Período de aplicación (julio - septiembre del 2017)

Eliminación de contaminantes en el agua. El agua proveniente del beneficio de café se caracterizó por tener una elevada carga orgánica (DQO promedio de 20.261 mg L⁻¹), un pH ácido de 3,23 y un elevado contenido de sólidos en suspensión (5.800 mg L⁻¹) (Tablas 8 y 9).

Tabla 8. Caracterización del agua residual aplicada a los filtros verdes y de los drenados recolectados durante el período de aplicación.

Tipo de muestra	Parámetro									
	pH*	DQO* (mg L ⁻¹)	Remoción DQO** (%)	Remoción DQO*** (%)	Conductividad eléctrica* (μS cm ⁻¹)	P-PO* (mg L ⁻¹)	Remoción P-PO** (%)	N _T * (mg L ⁻¹)	Remoción N _T ** (%)	
Agua - miel	3,23	20.261	-	-	2.916	12,20	-	597,8	-	
Salida RHA	4,31	10.163	-	-	1.550	11,90	-	228,1	-	
Salida P20 PN	6,69	126	98,76	99,38	92	0,41	96,55	174,2	23,63	
Salida P20 PV	5,93	1.123	88,89	94,34	1.448	0,56	95,29	440,2	-	
Salida P10 PN	6,54	140	98,61	99,30	97	0,19	98,40	255,6	-	
Salida P10 PV	6,71	151	98,52	99,26	330	0,19	98,40	147,8	35,20	
Salida P5 PN	5,88	132	98,68	99,35	55	0,25	97,90	159,8	29,94	
Salida P5 PV	6,45	78	99,22	99,61	43	0,29	97,56	146,1	35,95	

*Valor promedio del agua residual y de los drenados durante las 10 semanas de aplicación (20 muestras). **% de eliminación calculado con respecto al agua - miel que ingresó al suelo. ***% de eliminación calculado con respecto al agua - miel que ingresó al RHA.

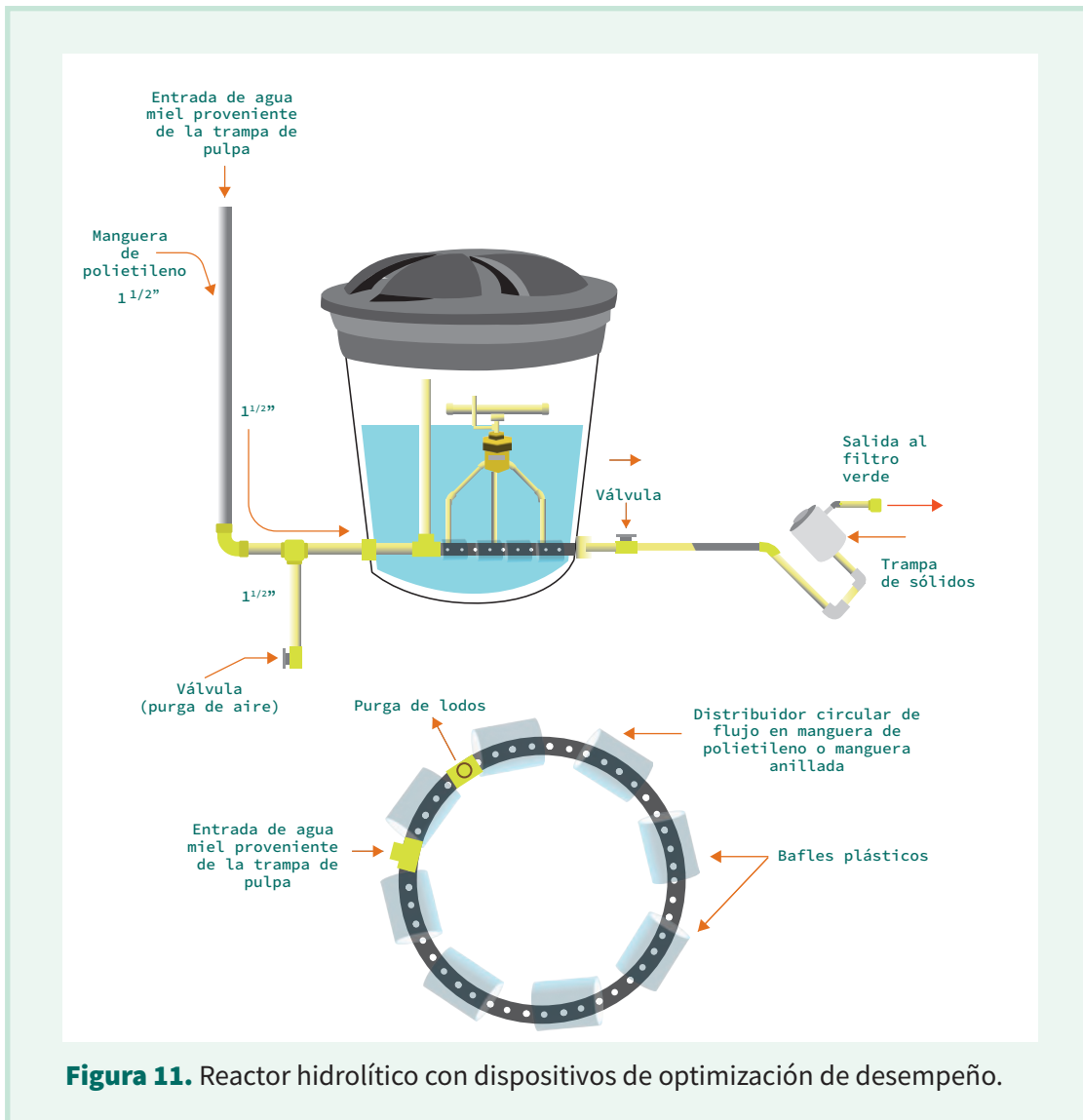
Tabla 9. Caracterización del agua residual aplicada a los filtros verdes y de los drenados recolectados durante el período de aplicación.

Tipo de muestra	Parámetro						
	N-NO ₃ * (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ * (mg L ⁻¹)	ST* (mg L ⁻¹)	Remoción ST** (%)	SST* (mg L ⁻¹)	Remoción SST** (%)	Redox (mV)
Agua - miel	12,40	111	17.090	--	5.800	--	--
Salida RHA	9,10	20	3.816	--	1.200	--	--
Salida P20 PN	2,43	12	224	94,13	86	92,83	250
Salida P20 PV	1,62	31	1.280	66,46	262	78,17	160
Salida P10 PN	1,33	14	324	91,51	85	92,92	247
Salida P10 PV	5,30	20	374	90,20	91	92,42	256
Salida P5 PN	1,57	15	145	96,20	69	94,25,	262
Salida P5 PV	2,00	11	167	95,62	24	98,00	249

**Valor promedio del agua residual y de los drenados durante las 10 semanas de aplicación (20 muestras). ** % de eliminación calculado con respecto al agua - miel que ingresó al suelo.*

Gracias al sistema de pre-tratamiento instalado (RHA) que incorpora un alimentador circular de flujo laminar, un dispositivo flotante de cabeza de presión constante y una trampa de sólidos (Rodríguez et al., 2019) (Figura 11), la carga orgánica se redujo en casi el 50% antes de su aplicación al terreno (hasta valores inferiores a 10.200 mg L⁻¹ de DQO) (Figura 12), debido a procesos de hidrólisis, flotación, sedimentación y filtración que ocurren en el RHA con el dispositivo implementado para optimizar su desempeño y regular el caudal de salida; lo cual también se reflejó en la reducción de los sólidos totales, con una eliminación del 77,67% (concentración de 3.816 mg L⁻¹ a la salida del RHA) y en la reducción de los sólidos suspendidos, alcanzando una eliminación de los mismos hasta del 79,31% (concentración de 1.200 mg L⁻¹ a la salida del RHA). Los valores de pH del agua residual, a la salida del RHA, presentaron un ligero incremento, pasando de 3,23 a 4,31 unidades.

En cuanto a los compuestos nitrogenados, es importante remarcar que el agua - miel de café contiene una elevada concentración de compuestos nitrogenados, la mayor parte de ellos en forma orgánica, con un N_T de casi 600 mg L⁻¹, de los que en el RHA se eliminó alrededor del 60%. Durante las 10 semanas de aplicación se logró constatar que el sistema suelo-vegetación-atmósfera tiene una elevada capacidad de eliminación de contaminantes, principalmente en lo referente a la carga orgánica procedente de las aguas - mieles. La concentración media de DQO encontrada en los percolados fue baja, con valores por debajo de los 1.200 mg L⁻¹ en todos los filtros verdes evaluados. De esta forma, la eficiencia de eliminación de DQO por parte del sistema de filtros verdes varió entre el 88,89% para el caso del filtro verde P20 PV (sembrado con pasto vetiver y alimentado a una carga hidráulica de 20 mm) hasta valores de más del 98% para el resto de filtros verdes, tomando como referencia el agua residual aplicada (efluente obtenido del RHA) (Tabla 8). Los valores de remoción de la DQO son mucho mayores si se evalúa el sistema completo (incluido el tratamiento primario), siendo superior al 94% en todos los casos.



Los drenados presentaron, en promedio, un pH ligeramente ácido, oscilando entre 5,88 y 6,71, con un incremento con respecto al valor encontrado en el agua aplicada (valor de 4,31). De otra parte, la conductividad eléctrica, en el agua drenada, tuvo un decremento en la mayor parte de los filtros verdes, a excepción del filtro verde P20 PV (que fue el que presentó las menores eficiencias en la remoción de DQO, ST y SST). En el caso de la concentración de fosfatos ($P-PO_4$), la eliminación fue alta, con valores de remoción superiores al 95% y concentraciones, en el efluente del filtro verde, que no superaron los $0,6 \text{ mg L}^{-1}$.



Figura 12. Aspecto del agua de ingreso y de salida del RHA con los dispositivos de optimización de desempeño.

Los rendimientos en la eliminación de N_T variaron entre el 23,63% y el 35,95%. Es importante mencionar que la mayor parte del N_T se encontró en forma orgánica (más del 80%).

En el caso de los sólidos en suspensión, se conoce que el suelo tiene una elevada capacidad de filtración siendo capaz de eliminar la mayor parte de los sólidos en suspensión presentes en el agua aplicada. Para el caso de los diferentes filtros verdes, su eficiencia de remoción varió entre 78,17% (en el filtro verde P20 PV) hasta más del 92% en el resto de los filtros verdes.

Si se comparan los resultados de depuración obtenidos en los distintos filtros verdes, con los valores permitidos de descarga de las aguas residuales del beneficio del café a cuerpos de agua superficial por parte de la legislación colombiana, establecidos por la Resolución 631 del 2015, puede concluirse que los filtros verdes realizan un tratamiento eficiente del agua residual, cumpliendo para todas las cargas hidráulicas evaluadas (5, 10 y 20 mm) los requisitos de vertido, tanto para el pH, DQO, como para los sólidos en suspensión. De igual manera, en promedio, todos los tratamientos permitieron cumplir con la norma de descarga al suelo que están aplicando las autoridades ambientales (Decreto 1594 de 1984), que establece un porcentaje de remoción de carga orgánica mayor al 80%, en espera que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible genere la Resolución respectiva con los parámetros y valores de calidad que debe cumplir el agua residual no doméstica antes de ser descargada en el recurso suelo.

En la Figura 13 se presenta el aspecto del agua residual a la salida del beneficiadero, a la salida del reactor hidrolítico - acidogénico (pretratamiento) y a la salida del filtro verde.

Cambio de las propiedades del suelo durante la experimentación. En un filtro verde, el suelo actúa como biorreactor, por lo que controlar la evolución de sus propiedades es esencial para asegurar un correcto funcionamiento a largo plazo. Es por ello que se tomaron muestras del suelo antes y después de la aplicación de las aguas residuales del beneficio del café para su caracterización.

En la Tabla 10 se resalta en color verde los parámetros del suelo que presentaron un incremento mayor al 5% con relación a su valor inicial, en color amarillo los parámetros del suelo cuya variación no fue superior al 5% respecto a su valor inicial y en color rojo los parámetros del suelo que presentaron una disminución mayor al 5% respecto a su valor inicial.

Con respecto al pH, se presentó un incremento tanto en el suelo testigo (valor de 5,20), como en el suelo de los filtros verdes sembrados con pasto vetiver (rango entre 4,90 - 5,60) y en el suelo de los filtros verdes con vegetación natural (rango 5,50 - 5,90), al comparar los valores con respecto al valor inicial del suelo (antes de iniciar experimentación) que fue de 3,80 unidades.



Figura 13. Aspecto del agua residual a la salida del beneficiadero, del pretratamiento y del filtro verde.

Tabla 10. Características químicas del suelo antes y después de la aplicación, durante 10 semanas, de las aguas residuales del beneficio del café.

Parámetro	Antes de la aplicación	Después del período de aplicación del agua residual*						
		P20 PN	P20 PV	P10 PN	P10 PV	P5 PN	P5 PV	Testigo
pH	3,80	5,60 (+47,37)	5,60 (+47,37)	5,90 (+55,26)	5,00 (+31,58)	5,50 (+44,74)	4,90 (+28,95)	5,20 (+36,84)
N (%)	0,18	0,12 (-33,33)	0,26 (+44,44)	0,19 (+5,56)	0,26 (+44,44)	0,20 (+11,11)	0,23 (+27,78)	0,20 (+11,11)
MO (%)	3,90	2,40 (-38,46)	5,80 (+48,72)	4,10 (+5,13)	5,80 (+48,72)	4,20 (+7,69)	5,10 (+30,77)	4,30 (+10,26)
K (cmol kg ⁻¹)	0,25	0,58 (+132,0)	0,82 (+228,0)	1,11 (+344,0)	0,52 (+108,0)	0,47 (+88,00)	0,30 (+20,00)	0,36 (+44,00)
Ca (cmol kg ⁻¹)	1,38	2,71 (+96,38)	3,16 (+129,0)	3,69 (+167,4)	2,03 (+47,10)	2,29 (+65,94)	1,30 (-5,80)	2,74 (+98,55)
Mg (cmol kg ⁻¹)	0,51	1,01 (+98,04)	1,29 (+152,9)	1,32 (+158,8)	0,89 (+74,51)	0,81 (+58,82)	0,74 (+45,10)	0,76 (+49,02)
Al (cmol kg ⁻¹)	2,2	0,5 (-77,27)	0,4 (-81,82)	0,2 (-90,91)	1,4 (-36,36)	0,6 (-72,73)	1,8 (-18,18)	0,60 (-72,73)
CIC	12	11 (-8,33)	15 (+25,00)	11 (-8,33)	17 (+41,67)	10 (-16,67)	14 (+16,67)	11 (-8,33)
P (mg kg ⁻¹)	710	456 (-35,77)	512 (-27,89)	169 (-76,20)	670 (-5,63)	371 (-47,75)	960 (+35,21)	187 (-73,66)
Fe (mg kg ⁻¹)	528	542 (+2,65)	740 (+40,15)	637 (+20,64)	602 (+14,02)	504 (-4,55)	576 (+9,09)	473 (-10,42)
Mn (mg kg ⁻¹)	25	84 (+236,0)	81 (+224,0)	70 (+180,0)	58 (+132,0)	55 (+120,0)	59 (+136,0)	23 (-8,00)
Zn (mg kg ⁻¹)	5,7	15,0 (+163,2)	10,6 (+85,96)	11,8 (+107,0)	5,0 (-12,28)	6,9 (+21,05)	6,6 (+15,79)	8,9 (+56,14)
Cu (mg kg ⁻¹)	14,7	13,7 (-6,80)	13,2 (-10,20)	16,8 (+14,29)	10,7 (-27,21)	13,4 (-8,84)	11,4 (-22,45)	15,8 (+7,48)
B (mg kg ⁻¹)	0,18	0,46 (+155,6)	0,43 (+138,9)	0,53 (+194,4)	0,54 (+200,0)	0,40 (+122,2)	0,36 (+100,0)	0,28 (+55,56)
S (mg kg ⁻¹)	6,8	1,4 (-79,41)	2,2 (-67,65)	2,5 (-63,24)	2,8 (-58,82)	1,2 (-82,35)	2,9 (-57,35)	1,6 (-76,47)
Textura	F.Ar.A	F.Ar.A	F.Ar.A	F.Ar.A	F.Ar.A	F.Ar.A	F.Ar.A	F.Ar.A

F.Ar.A: Franco-Arcillo-Arenosa.

*Entre paréntesis la variación porcentual presentada en cada parámetro del suelo respecto a su valor inicial (antes del período de aplicación).

Con respecto a la materia orgánica, se presentó un incremento, pasando de valores del 3,90% (inicio de la experimentación) a valores superiores a 5,00% en los filtros verdes sembrados con pasto vetiver, mientras que en los filtros verdes que contenían la vegetación natural, el mayor valor encontrado fue de 4,20%. El suelo testigo, obtenido de un área adjunta a la experimental, en la cual no se aplicó agua residual, presentó un contenido de materia orgánica de 4,30%.

Respecto a los macronutrientes N, P, K. El contenido de N en el suelo mostró un incremento en los filtros verdes sembrados con pasto vetiver, pasando de 0,18% en el área experimental, al inicio de la investigación, a valores mayores a 0,23%. En los filtros verdes con vegetación natural, el contenido de nitrógeno no superó el 0,20%. El valor en la muestra testigo fue de 0,20%. El contenido inicial de P en el suelo fue de 710 mg kg⁻¹, el cual presentó un gran decremento en la muestra testigo (valor de 187 mg kg⁻¹). En los filtros verdes sembrados con el pasto vetiver el contenido varió entre 512 y 960 mg kg⁻¹ y en los filtros verdes con vegetación natural, el contenido varió entre 169 y 456 mg kg⁻¹. El contenido inicial de K en el suelo fue de 0,25 cmol kg⁻¹, el cual presentó un incremento en la muestra testigo (valor de 0,36 cmol kg⁻¹) y en los diferentes filtros verdes. En aquellos sembrados con pasto vetiver el contenido varió entre 0,30 y 0,82 cmol kg⁻¹ y en los que contenían la vegetación natural, el contenido varió entre 0,47 y 1,11 cmol kg⁻¹.

En resumen, se presentó un incremento en el suelo, respecto a las condiciones iniciales y respecto al testigo, al regar con agua residual del café, los filtros verdes sembrados con pasto vetiver, en las siguientes variables: materia orgánica, pH, N, P, K, CIC, Ca, Mg, Mn, B, Zn, Fe.

Se presentó un incremento respecto a las condiciones iniciales y respecto al testigo, al regar, con aguas residuales del café, los filtros verdes con vegetación natural, en las siguientes variables: pH, K, Ca, Mg, Mn, B, Zn, Fe.

Se presentó un decremento respecto a las condiciones iniciales y respecto al testigo, al regar con aguas residuales del café, los filtros verdes con vegetación natural y aquellos sembrados con pasto vetiver en las siguientes variables: Al, Cu y S.

Los filtros verdes con pasto vetiver mostraron mayores contenidos que sus homólogos con vegetación natural en las variables: materia orgánica, N, P, CIC, Fe.

Cambio en la conductividad eléctrica del suelo. En la Tabla 11 se presentan los datos de la evolución diaria de la conductividad eléctrica del suelo en los seis filtros verdes evaluados y la pluviosidad que llegó a los mismos durante el período de evaluación.

Puede concluirse que la conductividad eléctrica del suelo se incrementó por efecto de la adición de las aguas - mieles. No obstante, para todos los casos sus valores están por debajo de

Tabla 11. Evolución de la conductividad eléctrica del suelo y aportes de la lluvia durante el período de aplicación.

Día	Conductividad eléctrica promedio (mS cm ⁻¹)						Pluviosidad diaria (mm)		
	P20 PN	P20 PV	P10 PN	P10 PV	P5 PN	P5 PV	Pluviómetro 1	Pluviómetro 2	Promedio
1	0,010	0,019	0,100	0,020	0,059	0,020	47	46	46,5
2	0,010	0,020	0,100	0,020	0,060	0,020	0	0	0
3	0,010	0,020	0,094	0,020	0,060	0,020	0	0	0
4	0,010	0,020	0,111	0,020	0,060	0,020	0	0	0
5	0,010	0,020	0,136	0,020	0,060	0,020	11	10	10,5
6	0,010	0,015	0,153	0,020	0,060	0,020	13	13	13
7	0,010	0,015	0,180	0,020	0,060	0,020	39	39	39
8	0,010	0,020	0,203	0,020	0,060	0,020	5	5	5
9	0,010	0,020	0,226	0,020	0,060	0,020	0	0	0
10	0,010	0,020	0,243	0,020	0,060	0,020	6	5	5,5
11	0,010	0,012	0,250	0,020	0,060	0,020	0	0	0
12	0,010	0,010	0,250	0,020	0,060	0,020	20	22	21
13	0,010	0,011	0,253	0,020	0,060	0,020	1	0	0,5
14	0,010	0,011	0,258	0,020	0,060	0,020	1	1	1
15	0,010	0,027	0,265	0,020	0,060	0,020	10	12	11
16	0,010	0,046	0,286	0,028	0,060	0,020	101	122	111,5
17	0,010	0,080	0,290	0,021	0,060	0,020	1	0	0,5
18	0,010	0,082	0,291	0,020	0,060	0,020	53	61	57
19	0,010	0,083	0,300	0,020	0,060	0,020	1	0	0,5
20	0,010	0,061	0,301	0,020	0,060	0,020	5	6	5,5
21	0,010	0,044	0,290	0,020	0,060	0,020	5	4	4,5
22	0,010	0,022	0,272	0,020	0,060	0,020	1	1	1
23	0,010	0,020	0,258	0,020	0,060	0,020	0	0	0
24	0,012	0,020	0,258	0,020	0,060	0,020	1	1	1
25	0,020	0,020	0,263	0,020	0,060	0,020	1	1	1
26	0,020	0,020	0,281	0,020	0,060	0,020	46	50	48
27	0,015	0,043	0,309	0,025	0,060	0,020	1	1	1
28	0,010	0,112	0,337	0,031	0,060	0,020	0	0	0
29	0,010	0,111	0,356	0,033	0,060	0,020	0	0	0
30	0,010	0,110	0,373	0,027	0,060	0,020	0	0	0
31	0,010	0,091	0,391	0,033	0,060	0,020	77	83	80
32	0,010	0,063	0,410	0,060	0,060	0,020	1	1	1

Continúa...

...continuación Tabla 11.

Día	Conductividad eléctrica promedio (mS cm ⁻¹)						Pluviosidad diaria (mm)		
	P20 PN	P20 PV	P10 PN	P10 PV	P5 PN	P5 PV	Pluviómetro 1	Pluviómetro 2	Promedio
33	0,012	0,045	0,419	0,069	0,060	0,024	198	225	211,5
34	0,010	0,040	0,400	0,036	0,060	0,020	3	3	3
35	0,010	0,032	0,386	0,030	0,060	0,020	0	0	0
36	0,010	0,079	0,393	0,030	0,060	0,020	42	45	43,5
37	0,010	0,121	0,394	0,034	0,060	0,020	0	0	0
38	0,015	0,102	0,395	0,039	0,060	0,020	75	82	78,5
39	0,016	0,099	0,389	0,040	0,060	0,020	1	2	1,5
40	0,011	0,085	0,372	0,035	0,060	0,020	1	0	0,5
41	0,010	0,155	0,384	0,030	0,060	0,020	0	0	0
42	0,017	0,128	0,394	0,039	0,060	0,020	0	0	0
43	0,040	0,113	0,402	0,050	0,060	0,020	13	15	14
44	0,048	0,133	0,418	0,054	0,060	0,020	50	55	52,5
45	0,054	0,130	0,430	0,051	0,060	0,023	253	280	266,5
46	0,046	0,053	0,424	0,040	0,060	0,021	73	82	77,5
47	0,037	0,050	0,406	0,030	0,060	0,020	10	10	10
48	0,019	0,123	0,395	0,030	0,060	0,020	1	1	1
49	0,016	0,119	0,390	0,030	0,060	0,020	32	35	33,5
50	0,021	0,146	0,390	0,041	0,060	0,020	0	0	0
51	0,079	0,153	0,387	0,032	0,060	0,020	13	14	13,5
52	0,088	0,229	0,383	0,030	0,060	0,020	1	1	1
53	0,086	0,212	0,380	0,030	0,060	0,020	33	35	34
54	0,078	0,139	0,379	0,030	0,060	0,020	10	10	10
55	0,074	0,165	0,373	0,031	0,060	0,020	3	4	3,5
56	0,086	0,192	0,367	0,040	0,060	0,020	4	3	3,5
57	0,082	0,205	0,346	0,053	0,060	0,021	166	176	171
58	0,072	0,179	0,319	0,040	0,060	0,020	1	1	1
59	0,064	0,160	0,278	0,030	0,060	0,020	0	0	0
60	0,058	0,140	0,236	0,030	0,060	0,020	0	0	0
61	0,028	0,120	0,214	0,030	0,060	0,020	0	0	0
62	0,020	0,147	0,195	0,029	0,060	0,016	0	0	0
63	0,023	0,185	0,206	0,042	0,060	0,019	83	87	85
64	0,028	0,177	0,280	0,046	0,060	0,020	64	65	64,5
65	0,050	0,188	0,358	0,044	0,060	0,020	19	21	20

Continúa...

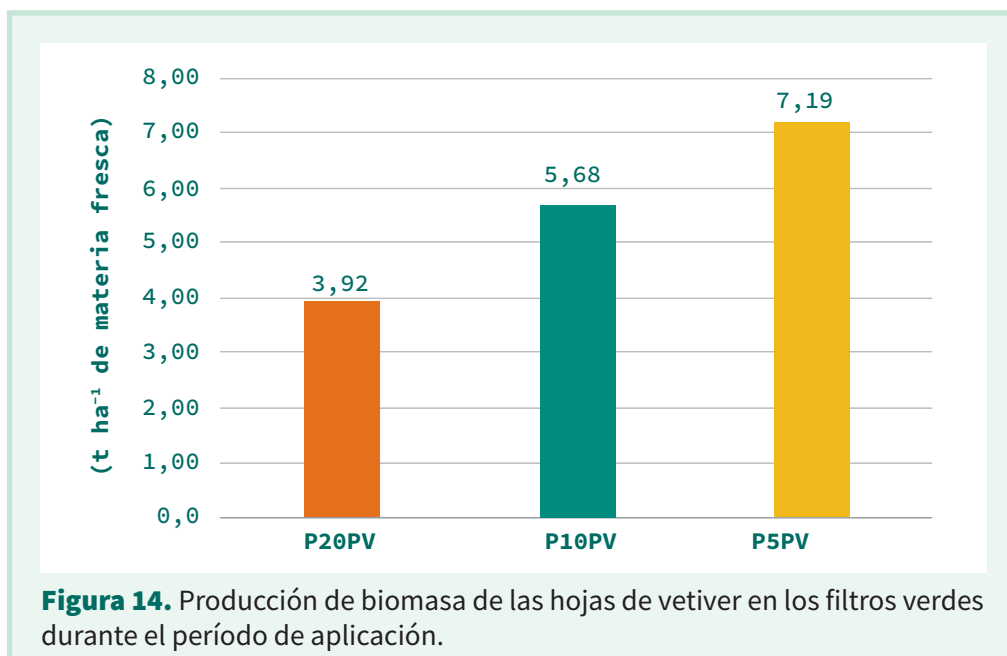
...continuación Tabla 11.

Día	Conductividad eléctrica promedio (mS cm ⁻¹)						Pluviosidad diaria (mm)		
	P20 PN	P20 PV	P10 PN	P10 PV	P5 PN	P5 PV	Pluviómetro 1	Pluviómetro 2	Promedio
66	0,051	0,185	0,383	0,040	0,060	0,022	74	82	78
67	0,050	0,158	0,370	0,034	0,060	0,020	13	14	13,5
68	0,035	0,168	0,374	0,043	0,060	0,022	106	113	109,5
69	0,029	0,155	0,344	0,037	0,060	0,020	0	0	0
70	0,030	0,165	0,302	0,067	0,060	0,021	166	176	171
Promedio	0,027	0,092	0,311	0,031	0,060	0,020	27,93	30,30	29,11
Variación (%)	+165,91	+392,24	+210,63	+57,31	+2,10	+0,73	Precipitación total (mm)		2.038

4 mS cm⁻¹ (valor límite máximo del rango óptimo para el desempeño de los filtros verdes). La conductividad eléctrica promedio del suelo, en el cual operaron los filtros verdes fue de 0,038 mS cm⁻¹, antes de iniciar con el riego de las aguas - mieles, y de 0,108 mS cm⁻¹ al final del período de aplicación, con una variación del 183,84%.

Durante los 70 días del período de aplicación ingresaron, en promedio, 2.038 mm de agua lluvia a los filtros verdes, equivalentes a 8.152 L de agua lluvia/filtro verde. Para los filtros verdes alimentados con una carga hidráulica de 5 mm, el volumen de agua residual aplicada durante la experimentación fue de 1.000 L, es decir, ocho veces menos que la cantidad de agua lluvia que ingresó; para los filtros verdes alimentados con una carga hidráulica de 10 mm, el volumen de agua residual aplicada durante la experimentación fue de 2.000 L, cuatro veces menos que la cantidad de agua lluvia que ingresó y para los filtros verdes alimentados con una carga hidráulica de 20 mm, el volumen de agua residual aplicada durante la experimentación fue de 4.000 L, dos veces menos que la cantidad de agua lluvia que ingresó.

Producción de biomasa de las hojas. Se cuantificó la producción de biomasa de las hojas de pasto vetiver durante las 10 semanas de aplicación del agua residual. El filtro verde con una menor aplicación de agua residual (5 mm) presentó la mayor producción de biomasa fresca, del orden de 7,19 t ha⁻¹, seguido del filtro verde que recibió una aplicación intermedia de agua - miel (10 mm), con una producción de biomasa fresca de 5,68 t ha⁻¹ y, por último, el filtro verde que recibió la mayor carga hidráulica (20 mm) presentó una producción de biomasa fresca de 3,92 t ha⁻¹ (Figura 14). Durante el experimento no se observaron síntomas de fitotoxicidad o senescencia en la vegetación de los filtros verdes por la aplicación de las aguas residuales.



La humedad promedio de la biomasa cosechada en el filtro verde P20PV fue del 59,90%, por lo que la producción de biomasa seca se estimó en 1,57 t ha⁻¹ (2,24 g m²-d⁻¹), para el filtro verde P10PV fue del 66,27%, estimándose la producción de biomasa seca en 1,92 t ha⁻¹ (2,74 g m²-d⁻¹) y para el filtro verde P5PV fue de 66,10% estimándose la producción de biomasa seca en 2,44 t ha⁻¹ (3,49 g m²-d⁻¹).

Período de reposo (septiembre - noviembre del 2017)

Durante las 10 semanas siguientes a la terminación de la aplicación de las aguas residuales del café sobre los filtros verdes, se continuó con el seguimiento al agua drenada de los mismos por efecto del agua lluvia que ingresó en el suelo de los filtros verdes. Los resultados se presentan a continuación.

Agua lluvia que ingresó a los filtros verdes, caracterización de drenados y cambios en la conductividad eléctrica del suelo. En la Tabla 12 se presentan los datos de la evolución diaria de la conductividad eléctrica del suelo en los seis filtros verdes evaluados y la pluviosidad que llegó a los mismos durante el período de reposo.

La conductividad eléctrica del suelo disminuyó en todos los filtros verdes, al comparar el valor promedio de la conductividad eléctrica al final de la etapa de reposo respecto a su condición inicial (final del período de aplicación de las aguas - mieles) (variación 1) excepto para el filtro verde con una carga hidráulica aplicada de 5 mm y conteniendo vegetación natural del sitio, la cual se mantuvo prácticamente constante (incremento de sólo el 2,39%), evidenciándose el

Tabla 12. Evolución de la conductividad eléctrica del suelo y aportes de la lluvia durante el período de reposo.

Día	Conductividad eléctrica promedio (mS cm ⁻¹)						Pluviosidad diaria (mm)		
	P20 PN	P20 PV	P10 PN	P10 PV	P5 PN	P5 PV	Pluviómetro 1	Pluviómetro 2	Promedio
1	0,056	0,196	0,267	0,100	0,060	0,022	73	78	75,5
2	0,085	0,153	0,242	0,047	0,060	0,020	1	1	1
3	0,076	0,162	0,229	0,044	0,060	0,021	163	175	169
4	0,064	0,135	0,217	0,040	0,060	0,020	3	4	3,5
5	0,054	0,122	0,205	0,040	0,060	0,020	11	11	11
6	0,023	0,112	0,193	0,040	0,060	0,020	0	0	0
7	0,020	0,107	0,179	0,040	0,060	0,020	0	0	0
8	0,029	0,100	0,177	0,073	0,060	0,022	107	110	108,5
9	0,030	0,090	0,178	0,090	0,060	0,020	4	3	3,5
10	0,030	0,089	0,169	0,090	0,060	0,020	23	23	23
11	0,030	0,083	0,160	0,082	0,060	0,020	3	3	3
12	0,029	0,080	0,151	0,080	0,060	0,020	18	19	18,5
13	0,029	0,080	0,150	0,072	0,060	0,020	30	32	31
14	0,030	0,080	0,143	0,070	0,060	0,020	1	0	0,5
15	0,030	0,073	0,140	0,064	0,060	0,019	0	0	0
16	0,030	0,066	0,131	0,059	0,060	0,017	45	47	46
17	0,030	0,060	0,130	0,050	0,060	0,019	4	3	3,5
18	0,036	0,060	0,132	0,093	0,060	0,023	304	316	310
19	0,030	0,051	0,130	0,068	0,060	0,020	29	32	30,5
20	0,036	0,051	0,127	0,051	0,060	0,022	235	240	237,5
21	0,031	0,050	0,120	0,039	0,060	0,020	46	52	49
22	0,031	0,050	0,113	0,036	0,060	0,023	274	292	283
23	0,033	0,046	0,110	0,034	0,060	0,022	85	94	89,5
24	0,030	0,040	0,110	0,034	0,060	0,020	13	13	13
25	0,030	0,040	0,110	0,030	0,060	0,020	0	0	0
26	0,030	0,033	0,110	0,030	0,060	0,018	0	0	0
27	0,030	0,030	0,110	0,030	0,060	0,014	11	12	11,5
28	0,030	0,026	0,120	0,030	0,060	0,011	1	1	1
29	0,030	0,020	0,128	0,030	0,060	0,010	0	0	0
30	0,030	0,020	0,137	0,029	0,059	0,010	0	0	0
31	0,030	0,020	0,145	0,029	0,054	0,010	7	7	7
32	0,030	0,020	0,155	0,026	0,050	0,010	38	40	39

Continúa...

...continuación Tabla 12.

Día	Conductividad eléctrica promedio (mS cm ⁻¹)						Pluviosidad diaria (mm)		
	P20 PN	P20 PV	P10 PN	P10 PV	P5 PN	P5 PV	Pluviómetro 1	Pluviómetro 2	Promedio
33	0,030	0,022	0,166	0,023	0,050	0,010	0	0	0
34	0,046	0,030	0,180	0,030	0,058	0,018	77	81	79
35	0,040	0,024	0,187	0,030	0,060	0,020	0	0	0
36	0,040	0,020	0,194	0,030	0,060	0,014	0	0	0
37	0,040	0,020	0,202	0,029	0,060	0,010	0	0	0
38	0,040	0,020	0,210	0,027	0,060	0,010	25	26	25,5
39	0,040	0,020	0,215	0,026	0,059	0,010	5	5	5
40	0,057	0,032	0,211	0,031	0,059	0,021	159	169	164
41	0,050	0,022	0,194	0,030	0,059	0,020	8	7	7,5
42	0,038	0,024	0,178	0,033	0,060	0,023	192	192	192
43	0,039	0,020	0,163	0,030	0,060	0,018	1	1	1
44	0,040	0,020	0,160	0,030	0,060	0,010	5	5	5
45	0,043	0,023	0,160	0,030	0,059	0,011	78	83	80,5
46	0,047	0,032	0,150	0,030	0,060	0,021	57	60	58,5
47	0,040	0,030	0,140	0,030	0,060	0,020	16	17	16,5
48	0,040	0,030	0,132	0,030	0,060	0,015	3	4	3,5
49	0,037	0,040	0,128	0,033	0,060	0,020	174	180	177
50	0,032	0,042	0,121	0,034	0,060	0,021	2	1	1,5
51	0,030	0,038	0,115	0,030	0,060	0,015	15	17	16
52	0,035	0,040	0,112	0,030	0,060	0,017	44	47	45,5
53	0,039	0,048	0,110	0,030	0,061	0,020	55	58	56,5
54	0,032	0,046	0,110	0,030	0,070	0,020	0	0	0
55	0,030	0,041	0,110	0,030	0,070	0,015	0	0	0
56	0,030	0,040	0,112	0,030	0,070	0,010	9	9	9
57	0,030	0,040	0,120	0,030	0,070	0,010	4	4	4
58	0,030	0,040	0,121	0,030	0,069	0,010	58	63	60,5
59	0,039	0,069	0,131	0,030	0,070	0,016	58	61	59,5
60	0,029	0,053	0,131	0,031	0,070	0,021	188	189	188,5
61	0,022	0,050	0,124	0,030	0,070	0,018	7	6	6,5
62	0,021	0,050	0,120	0,030	0,070	0,013	26	28	27
63	0,021	0,054	0,126	0,030	0,070	0,016	182	186	184
64	0,020	0,043	0,120	0,030	0,070	0,020	26	26	26

Continúa...

Variación 1: Variación de la conductividad eléctrica promedio respecto a la conductividad eléctrica antes de iniciar el período de reposo.

Variación 2: Variación de la conductividad eléctrica promedio respecto a la conductividad eléctrica antes de iniciar el período de aplicación.

...continuación Tabla 12.

Día	Conductividad eléctrica promedio (mS cm ⁻¹)						Pluviosidad diaria (mm)		
	P20 PN	P20 PV	P10 PN	P10 PV	P5 PN	P5 PV	Pluviómetro 1	Pluviómetro 2	Promedio
65	0,020	0,036	0,121	0,030	0,070	0,020	44	43	43,5
66	0,016	0,033	0,121	0,031	0,070	0,022	197	202	199,5
67	0,020	0,031	0,113	0,030	0,064	0,020	5	6	5,5
68	0,020	0,032	0,110	0,030	0,060	0,020	34	37	35,5
69	0,023	0,023	0,111	0,030	0,060	0,022	60	63	61,5
70	0,020	0,020	0,110	0,030	0,060	0,019	109	113	111
Promedio	0,034	0,052	0,148	0,040	0,061	0,018	49,31	51,39	50,35
Variación 1	-38,37	-73,46	-44,64	-59,86	2,39	-19,03	Precipitación total (mm)		3.525
Variación 2	+244,12	+177,24	+47,92	+100,69	+4,57	-12,28			

Variación 1: Variación porcentual de la conductividad eléctrica promedio respecto a la conductividad eléctrica antes de iniciar el período de reposo.

Variación 2: Variación porcentual de la conductividad eléctrica promedio respecto a la conductividad eléctrica antes de iniciar el período de aplicación.

efecto de lixiviación del agua lluvia sobre las sales presentes en la matriz del suelo. Sin embargo, en los valores de la variación 2 (en donde se compara la variación entre el valor promedio de la conductividad eléctrica del suelo al final del período de reposo y la conductividad eléctrica inicial del suelo antes del período de aplicación), en las 10 semanas de reposo, el suelo no logra restablecer los valores iniciales de conductividad eléctrica, siendo su incremento mayor en los filtros verdes regados con cargas hidráulicas mayores, excepto para el filtro verde alimentado con una carga hidráulica de 5 mm y sembrado con pasto vetiver, en el cual la conductividad eléctrica promedio durante el período de reposo fue ligeramente inferior al valor de la conductividad eléctrica del suelo al iniciar con el período de aplicación (valores de 0,018 mS cm⁻¹ vs 0,020 mS cm⁻¹), presentándose una disminución del 12,28%. No obstante, todos los valores de la conductividad eléctrica del suelo, en los seis filtros verdes evaluados, están por debajo de 4 mS cm⁻¹ (valor límite máximo del rango óptimo para el desempeño de los filtros verdes).

Durante los 70 días del período de reposo ingresaron, en promedio, 3.525 mm de agua lluvia a los filtros verdes, equivalentes a 14.100 L de agua lluvia/filtro verde, lo que supuso una carga hidráulica media diaria de agua lluvia de 50 mm en cada uno de los filtros verdes.

En la Tabla 13 se presentan las características de los drenados generados durante el período de reposo de los filtros verdes.

Los drenados generados durante el período de reposo de los filtros verdes presentaron valores de pH en el rango entre 5,89 a 6,20 (inferior al registrado en el período de aplicación que fue de 5,89 a 6,71) valores de DQO entre 77 y 689 mg L⁻¹ (inferior al cuantificado en el período de aplicación que fue de 78 a 1.123 mg L⁻¹), valores de ST entre 55 y 1.358 mg L⁻¹ (variable al cuantificado en el período de aplicación que fue de 145 a 1.280 mg L⁻¹) y valores de SST entre 49 y 316 mg L⁻¹ (superior al encontrado en el período de aplicación que fue de 24 a 262 mg L⁻¹), que siguen permitiendo cumplir con los valores de calidad establecidos en la Resolución 631 para vertimientos de las aguas residuales del café a cuerpos de agua superficial. De igual manera, estos valores cumplirían con los parámetros de calidad del decreto 1594 de 1984, utilizado por algunas Corporaciones para permitir la descarga de vertimientos al suelo, en espera de que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible genere la Resolución respectiva con los parámetros y valores de calidad que debe cumplir el agua residual no doméstica (ARnD) antes de ser descargada en el recurso suelo.

El contenido de N_T osciló en los drenados entre 157 y 489 mg L⁻¹ (superior al mostrado en el período de aplicación que fue de 11 a 31 mg L⁻¹); el contenido de N-NH₃ osciló entre 8 y 75 mg L⁻¹ (superior al mostrado en el período de aplicación que fue de 11 a 31 mg L⁻¹) y el contenido de N-NO₃ osciló entre 1,10 y 29,9 mg L⁻¹ (superior al mostrado en el período de aplicación que fue de 1,33 a 5,30 mg L⁻¹). El contenido de P-PO₄ osciló entre 0,42 y 1,22 mg L⁻¹ (superior al mostrado en el período de aplicación que fue de 0,19 a 0,56 mg L⁻¹).

El mayor contenido de nutrientes en los drenados generados en el período de reposo, respecto al período de aplicación, se explica por una mayor lixiviación de los componentes del suelo

Tabla 13. Caracterización de los drenados recolectados en los filtros verdes durante el período de reposo.

Tipo de muestra	Parámetro								
	pH* (unidades)	DQO* (mg L ⁻¹)	ST* (mg L ⁻¹)	SST* (mg L ⁻¹)	Conductividad eléctrica* (μS cm ⁻¹)	P-PO ₄ * (mg L ⁻¹)	N-NO ₃ * (mg L ⁻¹)	N _T * (mg L ⁻¹)	N-NH ₃ * (mg L ⁻¹)
Salida P20 PN	5,89	138	500	134	228	0,47	3,10	207	11
Salida P20 PV	6,15	689	1358	316	747	0,42	29,90	489	75
Salida P10 PN	6,11	105	249	89	80	0,71	1,49	321	15
Salida P10 PV	6,20	163	154	82	164	0,66	1,46	157	11
Salida P5 PN	6,10	83	55	49	34	1,22	1,80	256	8
Salida P5 PV	6,03	77	187	49	36	0,57	1,10	386	15

*Valor promedio de 10 muestras de drenados recolectados durante el período de reposo (10 semanas).

por la carga hidráulica aplicada, que para el período de aplicación (sumando la aplicación del agua residual y el aporte de la lluvia) no superó, en promedio, el valor de 50 mm/d en los filtros verdes con mayor carga hidráulica aplicada, y para el caso del período de reposo, todos los filtros verdes estuvieron sometidos a cargas hidráulicas promedio que superaron los 50 mm/d.

Evolución de las propiedades del suelo. En la Tabla 14 se presentan las características químicas del suelo de los filtros verdes después de terminado el período de reposo y en la cual se resalta en color verde los parámetros del suelo que presentaron un incremento mayor al 5% con relación a su valor inicial (final del período de aplicación), en color amarillo los parámetros del suelo cuya variación no fue superior al 5% respecto a su valor inicial y en color rojo los parámetros del suelo que presentaron una disminución mayor al 5% respecto a su valor inicial.

La muestra de suelo testigo, del área adjunta a los filtros verdes, a la cual no se aplicaron aguas residuales del café, mostró durante las 10 semanas de reposo, valores de pH, N, y S muy similares a los presentados 10 semanas atrás cuando se suspendió la aplicación de agua residual del café en los filtros verdes, con variaciones que no superaron el 5%; mientras que los contenidos de Ca, Mg, CIC y B aumentaron en más del 5%; los contenidos de MO, K, Al, P, Fe, Mn Zn y Cu disminuyeron en más del 5% y la textura del suelo pasó de franco-arcillo-arenosa a franca.

Los filtros verdes, después del reposo, mostraron para los tratamientos con pasto vetiver rangos de pH entre 5,00 y 5,40, y para los tratamientos con vegetación natural entre 4,90 y 5,30. Variables respecto al testigo.

Para el contenido de materia orgánica, los filtros verdes sembrados con pasto vetiver presentaron rangos entre 5,20% y 6,50% y los filtros verdes con vegetación natural entre 4,00 y 5,50%. Superiores al testigo.

Para el contenido de N, los filtros verdes sembrados con pasto vetiver presentaron rangos entre 0,23 y 0,28% y los filtros verdes con vegetación natural entre 0,19 y 0,24%. Superiores al testigo. Para el contenido de P, los filtros verdes con pasto vetiver presentaron rangos entre 325 y 500 mg kg⁻¹ y los filtros verdes con vegetación natural entre 203 y 670 mg kg⁻¹. Superiores al testigo. Para el contenido de K, los filtros verdes sembrados con pasto vetiver presentaron rangos entre 0,33 y 0,51 cmol kg⁻¹ y los filtros verdes con vegetación natural entre 0,27 y 0,35 cmol kg⁻¹. Superiores al testigo.

La textura del suelo de todos los filtros verdes al final del período de reposo fue franco-arenosa, mientras que en el suelo testigo fue franca.

En resumen, los suelos de los filtros verdes con aplicación de aguas residuales del café, después de un período de reposo de 10 semanas, mostraron mayores valores, que el suelo testigo, en las variables: N, MO, K, Al, P, Fe y Mn. En las variables Ca y Mg, los valores encontrados en los

Tabla 14. Características del suelo después del período de reposo de 10 semanas.

Parámetro	Después del período de reposo*						
	P20 PN	P20 PV	P10 PN	P10 PV	P5 PN	P5 PV	Testigo
pH	4,90 (-12,50)	5,40 (-3,57)	5,20 (-11,86)	5,30 (+6,00)	5,30 (-3,64)	5,00 (+2,04)	5,10 (-1,92)
N (%)	0,24 (+100,0)	0,28 (+7,69)	0,19 (0,00)	0,23 (-11,54)	0,20 (0,00)	0,24 (+4,35)	0,19 (-5,00)
MO (%)	5,5 (+129,2)	6,5 (+12,07)	4,0 (-2,44)	5,2 (-10,34)	4,4 (+4,76)	5,3 (+3,92)	4,0 (-6,98)
K (cmol kg ⁻¹)	0,33 (-43,10)	0,51 (-37,80)	0,27 (-75,68)	0,49 (-5,77)	0,35 (-25,53)	0,33 (+10,00)	0,22 (-38,89)
Ca (cmol kg ⁻¹)	1,47 (-45,76)	3,22 (+1,90)	2,77 (-24,93)	2,27 (+11,82)	3,20 (+39,74)	1,43 (+10,00)	4,27 (+55,84)
Mg (cmol kg ⁻¹)	0,56 (-44,55)	0,78 (-39,53)	0,84 (-36,36)	0,73 (-17,98)	0,81 (0,00)	0,54 (-27,03)	1,06 (+39,47)
Al (cmol kg ⁻¹)	1,6 (+220,0)	0,5 (+25,00)	0,9 (+350,0)	0,7 (-50,00)	0,8 (+33,33)	1,4 (-22,22)	0,4 (-33,33)
CIC	15 (+36,36)	13 (-13,33)	13 (+18,18)	17 (0,00)	13 (+30,00)	17 (+21,43)	14 (+27,27)
P (mg kg ⁻¹)	670 (+46,93)	325 (-36,52)	245 (+44,97)	398 (-40,60)	203 (-45,28)	500 (-47,92)	109 (-41,71)
Fe (mg kg ⁻¹)	686 (+26,57)	411 (-44,46)	444 (-30,30)	578 (-3,99)	551 (+9,33)	584 (+1,39)	398 (-15,86)
Mn (mg kg ⁻¹)	29 (-65,48)	25 (-69,14)	25 (-64,29)	31 (-46,55)	29 (-47,27)	35 (-40,68)	15 (-34,78)
Zn (mg kg ⁻¹)	8,2 (-45,33)	10,0 (-5,66)	12,1 (+2,54)	5,7 (+14,00)	10,5 (+52,17)	8,6 (+30,30)	7,8 (-12,36)
Cu (mg kg ⁻¹)	13,1 (-4,38)	12,5 (-5,30)	14,6 (-13,10)	11,8 (+10,28)	15,2 (+13,43)	11,5 (+0,88)	15,0 (-5,06)
B (mg kg ⁻¹)	0,38 (-17,39)	0,36 (-16,28)	0,28 (-47,17)	0,40 (-25,93)	0,30 (-25,00)	0,39 (+8,33)	0,37 (+32,14)
S (mg kg ⁻¹)	2,5 (+78,57)	3,9 (+77,27)	1,3 (-48,00)	7,1 (+153,6)	0,2 (-83,33)	2,7 (-6,90)	1,6 (0,00)
Textura	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	Franca

F. A. Franco-Arenosa.

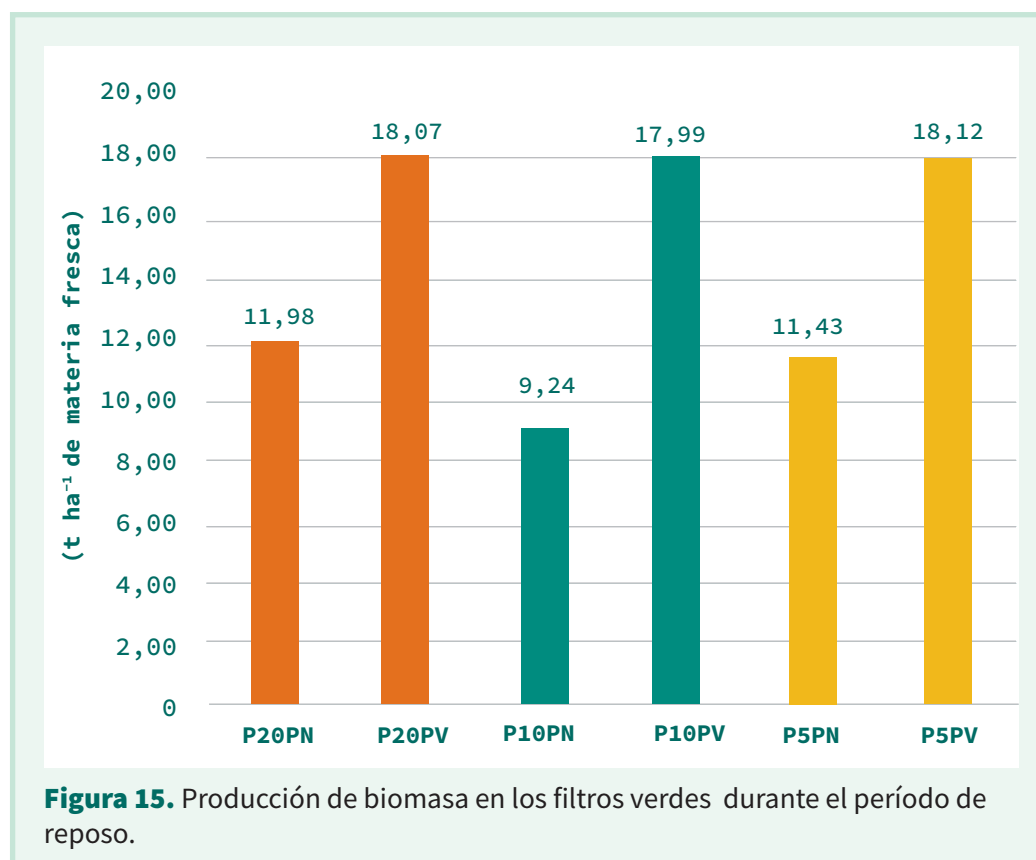
*Entre paréntesis la variación porcentual presentada en cada parámetro del suelo respecto al valor presentado al final del período de aplicación.

suelos de los filtros verdes con aplicación de aguas residuales del café fueron inferiores a las encontradas en el suelo testigo.

Respecto a los filtros verdes con aplicación de aguas residuales del café, después del período de reposo, aquellos sembrados con pasto vetiver mostraron mayores valores, que los que contenían vegetación natural, para todas las cargas hidráulicas aplicadas, en las variables: N, MO y S.

Producción de biomasa de las hojas. Se cuantificó la producción de biomasa de las hojas tanto del pasto vetiver como de la vegetación natural durante las 10 semanas de reposo. Los filtros verdes sembrados con pasto vetiver presentaron, para todos los casos, una producción de biomasa superior a sus homólogos que contenían la vegetación natural de la zona (Figura 15). La producción de biomasa fresca de vetiver varió entre 17,99 a 18,12 t ha⁻¹, mientras que la producción de biomasa fresca de la vegetación natural varió en el rango entre 9,24 y 11,98 t ha⁻¹.

La humedad promedio de la biomasa cosechada en el filtro verde P20PN fue del 55,60%, por lo que la producción de biomasa seca se estimó en 5,32 t ha⁻¹ (7,60 g m⁻²-d⁻¹); para el filtro verde P20PV fue del 65,20% con una producción de biomasa seca de 6,29 t ha⁻¹ (8,99 g m⁻²-d⁻¹); para



el filtro verde P10PN fue de 60,60% con 3,64 t ha⁻¹ (5,20 g m²-d⁻¹) de biomasa seca; para el filtro verde P10PV fue del 67,55% por lo que la producción de biomasa seca se estimó en 5,84 t ha⁻¹ (8,34 g m²-d⁻¹); para el filtro verde P5PN fue del 60,70% con una producción de biomasa seca de 4,49 t ha⁻¹ (6,41 g m²-d⁻¹) y para el filtro verde P5PV fue de 66,10% estimándose la producción de biomasa seca en 6,14 t ha⁻¹ (8,77 g m²-d⁻¹).

Estimación de la biomasa total del pasto vetiver al final de la experimentación piloto. Para la estimación de la biomasa total de los filtros verdes sembrados con pasto vetiver, al final de la experimentación de la etapa piloto, por cada filtro verde se extrajeron cuatro plantas completas, a las cuales se les retiró el suelo adherido a las raíces, se pesaron y luego se cortó la parte aérea correspondiente a las hojas-tallo, y corona y la parte anclada al suelo (raíces), con el fin de determinar su peso y proporción respecto a la planta. Las partes cortadas y pesadas de las plantas fueron secadas en estufa a 105°C hasta peso constante. De igual forma, se determinó al área ocupada por cada una de las plantas extraídas y con este valor y el peso seco de las plantas se determinó la biomasa total, expresada en toneladas de materia seca por hectárea. En la Tabla 15 se presentan los resultados promedio de la observación y en la Figura 16 se presenta el proceso de evaluación.

Para determinar la producción de la biomasa seca durante los 140 días de duración de la etapa piloto, se tuvo en cuenta la biomasa inicial sembrada en forma de esquejes en cada uno de los filtros verdes, para ello se tomaron siete esquejes de siembra, por cada uno de los filtros verdes, se pesaron y secaron en estufa a 105°C hasta peso constante. Para estimar la biomasa inicial sembrada, el peso promedio de los esquejes se multiplicó por dos (se sembraron dos esquejes por sitio), por 19², (los esquejes se sembraron al cuadro cada 10 cm, en un área de 4 m²) y el valor resultante se multiplicó por el factor de conversión de 2,5 para pasar de g m⁻² a t ha⁻¹, el valor, así calculado se restó a los valores de biomasa total calculados en la Tabla 15.

En la Figura 17 se presenta el aspecto de los esquejes utilizados para la siembra del pasto vetiver y en la Tabla 16 se presentan los resultados de la caracterización de los esquejes para cada uno de los filtros verdes evaluados.

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 15, los mayores porcentajes de la biomasa en las plantas cosechadas estuvieron representados en su parte aérea (hojas + tallos), con el 49,04% en el filtro verde P20PV, el 49,70% en el filtro verde P10PV y el 41,36% en el filtro verde P5PV y los menores valores estuvieron representados en la corona con el 21,72% en el filtro verde P20PV, el 21,04% en el filtro verde P10PV y el 26,76% en el filtro verde P5PV. La biomasa total seca fue de 18,41 t ha⁻¹ para el filtro verde P20PV (el cual operó a las mayores cargas hidráulicas y orgánicas), de 23,37 t ha⁻¹ para el filtro verde P10PV y de 23,53 t ha⁻¹ para el filtro verde P5PV (que operó a las menores cargas hidráulicas y orgánicas).

Tabla 15. Características de las plantas de pasto vetiver al final de la etapa piloto*.

Condición	Filtro verde		
	P20PV	P10PV	P5PV
Peso fresco			
Planta completa (g)	223,44	334,10	294,73
Parte aérea (hojas + tallo) (g)	112,25	168,11	130,34
Corona (g)	59,05	91,50	92,57
Raíz (g)	52,14	75,01	71,29
Humedad			
Parte aérea (%)	71,35	71,50	69,20
Corona (%)	75,88	77,83	71,95
Raíz (%)	63,23	62,40	56,60
Peso seco			
Planta completa (g)	65,57	96,60	97,05
Parte aérea (hojas + tallo) (g)	32,16	47,91	40,14
Corona (g)	14,24	20,29	25,97
Raíz (g)	19,17	28,20	30,94
Porcentaje de la planta			
Planta completa (%)	100,00	100,00	100,00
Parte aérea (hojas + tallo) (%)	49,04	49,70	41,36
Corona (%)	21,72	21,04	26,76
Raíz (%)	29,24	29,26	31,88
Otros parámetros			
Área ocupada por la planta (cm ²)	356,25	412,50	412,50
Peso fresco g cm ⁻²	0,63	0,81	0,71
Biomasa total fresca (t ha ⁻¹)	62,72	80,99	71,45
Peso seco g cm ⁻²	0,184	0,234	0,235
Biomasa total seca (t ha ⁻¹)	18,41	23,37	23,53

(*). Los valores presentados corresponden al promedio de cuatro datos.



Figura 16. Proceso de evaluación para cuantificación de la biomasa total presente en los filtros verdes sembrados con pasto vetiver al final de la etapa piloto. **a.** Aspecto del pasto vetiver en los primeros días de la siembra; **b.** Aspecto del pasto vetiver al final de la experimentación (período de aplicación + período de reposo); **c.** Detalle de una de las plantas cosechadas para su evaluación; **d.** Medición del área ocupada por la planta cosechada; **e.** Aspecto de las plantas cosechadas en los diferentes filtros verdes; **f.** Aspecto del corte de las plantas en sus hojas-tallo, corona-raíces; **g.** Detalle del corte hoja-tallo, corona y raíz de una de las plantas.



Figura 17. Aspecto de los esquejes sembrados en los filtros verdes durante la etapa piloto.

Tabla 16. Características de los esquejes de pasto vetiver al inicio de la etapa piloto (*).

Condición	Filtro verde		
	P20PV	P10PV	P5PV
Peso fresco de esquejes (g)	7,57	8,31	6,66
Humedad de esquejes (%)	72,51	74,38	76,25
Peso seco de esquejes (g)	2,10	2,13	1,59
Peso fresco biomasa (kg/filtro)	5,47	6,00	4,81
Peso fresco biomasa (t ha ⁻¹)	13,67	15,01	12,02
Peso seco biomasa (kg/filtro)	1,52	1,54	1,14
Peso seco biomasa (t ha ⁻¹)	3,79	3,84	2,86

(*). Los valores presentados corresponden al promedio de 7 datos.

Respecto a la producción de biomasa seca durante el período piloto (140 días), esta se calculó como la diferencia entre la biomasa total seca al final del período piloto (Tabla 15) y la biomasa seca inicial de los esquejes sembrados (Tabla 16), lo que permitió obtener para el filtro P20PV un valor de 14,62 t ha⁻¹, equivalente a una producción de 10,44 g m²-d⁻¹, para P10PV de 19,53 t ha⁻¹ (producción de 13,95 g m²-d⁻¹) y para P5PV de 20,67 t ha⁻¹ (producción de 14,76 g m²-d⁻¹).

De acuerdo con el análisis realizado, se determinó que las mayores producciones del pasto vetiver se presentaron a las menores cargas orgánicas e hidráulicas aplicadas, pero que, la aplicación de cargas orgánicas de hasta 1.000 kg DBO/ha-d, no inhibieron la producción de biomasa, cuya producción, para esta carga orgánica aplicada fue en promedio de 10,44 g m²-d⁻¹.

Evaluación a escala de campo

En el campo se validaron los resultados obtenidos en la experimentación piloto realizada entre los meses de febrero y noviembre del 2017 en Cenicafé. Para ello, se seleccionó la Estación Experimental El Rosario, ubicada en el Municipio de Venecia, en el departamento de Antioquia.

Para la implementación del filtro verde se recorrió la estación experimental buscando un área que fuera representativa de la caficultura de Colombia, con pendiente y niveles freáticos profundos. En esta área se delimitó con guadua una parcela de 5 m de largo x 10 m de ancho (Figura 18a y 18b), dividida en cinco subparcelas de 1 m x 10 m. Se realizaron las excavaciones para la instalación de sensores de humedad, temperatura y conductividad eléctrica, y para la instalación de cápsulas de succión (Figuras 18c, 18d, 18e y 18f).



Una vez realizadas las excavaciones, se instalaron cuatro sensores de humedad tipo Decagon 5TE (para monitorear humedad, temperatura y conductividad eléctrica), ubicados en el centro del área experimental (dos sensores se ubicaron a 20 cm de profundidad y los otros dos sensores a 40 cm de profundidad) (Figura 19a). De igual manera, se instalaron diez cápsulas de succión ubicadas a 40 cm de profundidad, y separadas entre sí cada 2 m, con el objetivo de monitorizar y muestrear el agua drenada (Figura 19b, 19c, 19d, 19e y 19f).

Los sensores se conectaron a un datalogger tipo Decagon EM50 (cinco canales) para el registro continuo de la información (Figura 20). Posteriormente se realizó el muestreo del suelo del área experimental para determinar sus características físicas y químicas antes de iniciar con la aplicación del agua residual (Figura 21a y 21b).

Vegetación utilizada en los sistemas de filtros verdes

Se sembraron esquejes de pasto vetiver de 10 cm de altura y 5 cm de raíz y se sembraron tres esquejes por sitio a 30 cm, al cuadro, en el área experimental (Figura 22). La finalización de los esquejes se terminó a mediados del mes de diciembre del 2017 y se esperó un mes para lograr la estabilización del cultivo y para realizar las resiembras del material marchito.

Tipo de suelo

La vegetación del filtro verde se sembró sobre un suelo con pendiente del 8%, textura franco-arcillo-arenosa, pH de 4,63, un contenido promedio de materia orgánica de 7,33%, permeabilidad de 194 mm h⁻¹ y conductividad eléctrica de 0,06 mS cm⁻¹.

Tipo de agua residual utilizada y pretratamiento

El agua - miel de café aplicada al filtro verde procedía de un sistema de beneficio ecológico (consumo de agua de 4,5 L kg⁻¹ café pergamino seco), con una elevada carga orgánica y fue pre-tratada en un reactor hidrolítico-acidogénico (RHA) al cual se le incorporaron dispositivos para optimizar su desempeño (Rodríguez et al., 2019), lo que permitió una reducción de la carga orgánica de casi el 50%. Dicho pretratamiento se hace indispensable para eliminar parte de los sólidos en suspensión, reducir la carga orgánica y evitar problemas de colmatación en el sistema de riego.

Cargas hidráulicas y orgánicas aplicadas

Se aplicó una carga hidráulica máxima de 60 mm (600 L/10 m²), equivalente a una carga orgánica de 3.500 kg DBO/ha-d y una carga hidráulica media de 12 mm (600 L/50 m²), equivalente a una carga orgánica de 700 kg DBO/ha-d. La carga orgánica aplicada se calculó en función de la concentración del efluente pre-tratado.

Tipo de distribución del agua residual

En la segunda quincena de enero del 2018 se procedió a instalar el sistema de riego, para lo cual se instalaron cuatro tanques de polietileno de 2 m³ para el almacenamiento del agua residual



Figura 19.Instrumentación del filtro verde; **a.** Instalación de sondas de humedad a 20 y 40 cm de profundidad. **b, c, d, e y f.** Instalación de cápsulas de succión a 40 cm de profundidad.

(Figura 23), la cual se conducía a un tanque de distribución de 2 m³ y en el cual se instaló un dispositivo filtrador - regulador de caudal (Figura 24) que permitía la salida del agua pretratada (a un caudal diario de 800 mL min⁻¹, aproximadamente 600 L d⁻¹), a través de cinco líneas de riego, de 10 m de longitud cada una, construidas en tubería PVC-P de ½”, con perforaciones de 3/32”, separadas cada 10 cm. Estas líneas se nivelaron a 20 cm por encima del suelo (Figura 25).



Figura 20. Instalación del datalogger y conexión a los sensores de humedad y al pluviómetro.



Figura 21. Muestreo del suelo; **a.** Muestreo del suelo para determinar sus características físicas; **b.** Muestreo del suelo para determinar sus características químicas.

Tiempo de aplicación del agua residual

A cada subparcela (de 1m x 10 m) se aplicó agua residual semanalmente y las cinco subparcelas recibieron agua residual en la semana, lo que implicó una aplicación de agua residual 5 días de la semana. El experimento de validación se realizó con un volumen de agua residual de 600 L d^{-1}

Evaluación del sistema de tratamiento de los filtros verdes

La evaluación se realizó en las siguientes etapas:

Montaje del experimento (diciembre del 2017 - febrero del 2018).

Período de aplicación (febrero - junio del 2018).

En febrero del 2018 se inició con la toma de muestras de agua y la recopilación de los datos de humedad, temperatura y conductividad eléctrica del suelo y precipitación sobre el área experimental.

Variables y frecuencia de muestreo en el suelo. En el filtro verde, antes del inicio de la investigación y al final del período de aplicación con las aguas - mieles del café (20 semanas, 100 días hábiles) se realizó un muestreo compuesto del suelo para determinar sus características



Figura 22. Etapa de siembra del vetiver; **a** . Trazado a 40 cm x 40 cm para la siembra del pasto vetiver; **b**. Esquejes de vetiver de 5 cm de raíz y 10 cm de tallo, para siembra en el filtro verde; **c y d**. siembra del pasto vetiver; **e**. Aspecto final del filtro verde sembrado con pasto vetiver.



Figura 23. Tanques de almacenamiento y distribución del agua residual generada.

hidráulicas (punto de marchitez, capacidad de campo); características físicas (densidad aparente, textura, conductividad eléctrica) y características químicas (bases de cambio, minerales, materia orgánica, N, P). Los métodos de análisis fueron los mismos que se referenciaron en la evaluación a escala piloto.

Variables y frecuencia de muestreo en el agua residual afluyente y en el agua percolada. Para el caso de los afluentes al sistema de tratamiento con filtros



Figura 24. Dispositivo filtrador-regulador de caudal instalado en el tanque de distribución.



Figura 25. Instalación del sistema de riego. **a.** Corte y acoplamiento de los tubos que conformaron cada línea de riego; **b.** Instalación de las llaves de paso al ingreso de cada una de las líneas de riego; **c.** Perforación de los tubos de conducción para la salida del agua por goteo; **d.** Aspecto final de las cinco líneas de riego.

verdes, se tomaron cada 15 días, para la etapa de aplicación, muestras del agua residual de ingreso y de salida del Reactor Hidrolítico - Acidogénico (unidad en la cual ocurrió el tratamiento primario). Para el caso de los efluentes del sistema de tratamiento con filtros verdes, se generaron muestras compuestas del agua percolada extraída en las cápsulas de succión. Se determinaron las siguientes variables: pH, conductividad eléctrica, potencial redox, DQO, nitrógeno total y amoniacal, nitratos y fosfatos. Los métodos de análisis fueron los mismos que se referenciaron en la evaluación a escala piloto.

En la Figura 26 se presenta el esquema del montaje del filtro verde en la Estación Experimental El Rosario.

Resultados de la evaluación

A continuación, se presenta un resumen de los principales resultados obtenidos durante la etapa de validación, tanto en lo referente a la capacidad de eliminación de contaminantes por parte del filtro verde, como a la evolución de las propiedades del suelo del filtro verdes y a la producción de biomasa de la vegetación sembrada.

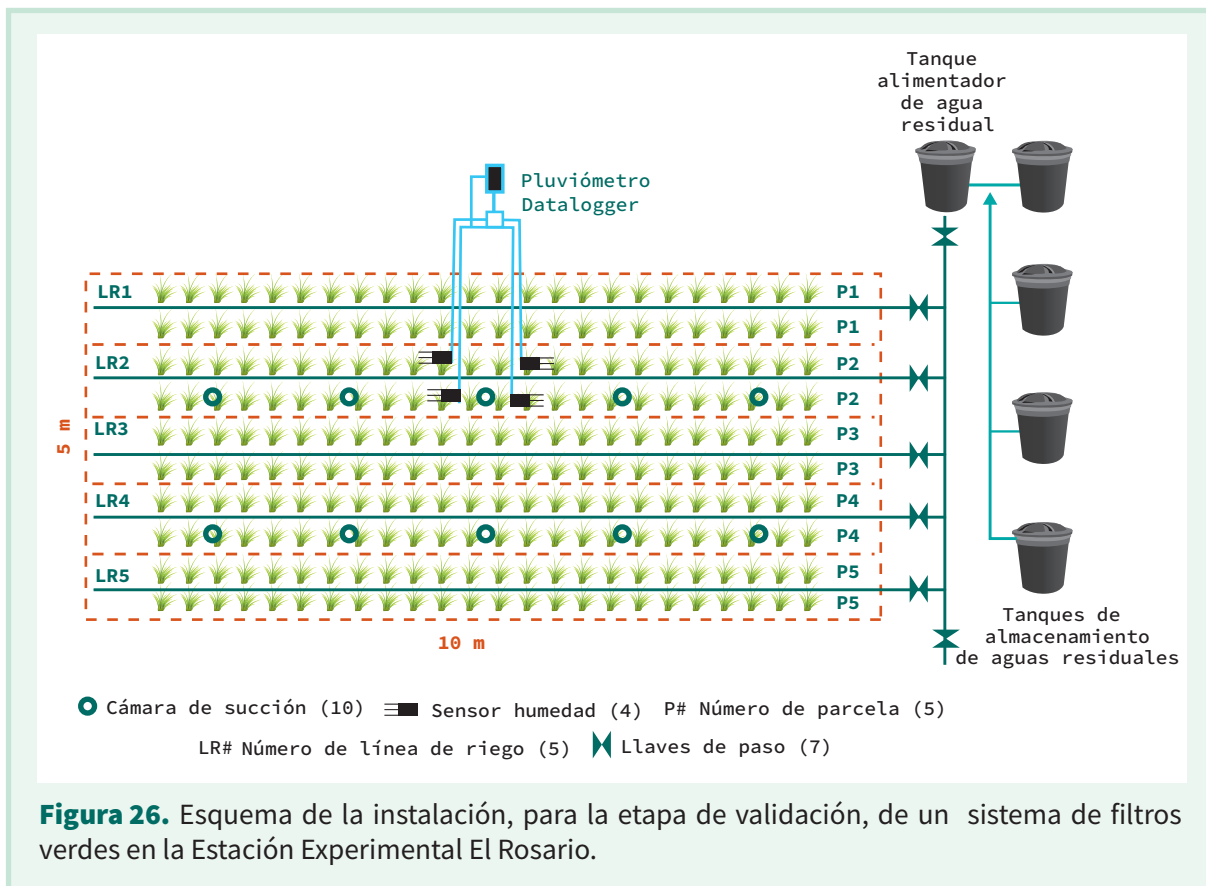


Figura 26. Esquema de la instalación, para la etapa de validación, de un sistema de filtros verdes en la Estación Experimental El Rosario.

Eliminación de contaminantes en el agua. El agua residual, proveniente del beneficio de café, en promedio presentó un valor de DQO de 21.351 mg L⁻¹ (rango de variación entre 17.720 y 25.900 mg L⁻¹), un valor medio de pH de 3,37 unidades (rango de variación entre 3,24 y 3,47 unidades), un valor medio de sólidos totales de 14.587 mg L⁻¹ (rango de variación entre 13.150 y 16.380 mg L⁻¹) y un contenido promedio de sólidos suspendidos totales de 4.454 mg L⁻¹ (rango de variación entre 3.800 y 5.020 mg L⁻¹) (Tabla 17).

El agua proveniente del tratamiento primario, presentó en promedio un valor de DQO de 11.936 mg L⁻¹ (rango de variación entre 9.950 y 14.400 mg L⁻¹), un valor medio de pH de 4,18 unidades (rango de variación entre 3,99 y 4,36 unidades), un valor medio de sólidos totales de 6.891 mg L⁻¹ (rango de variación entre 5.520 y 8.570 mg L⁻¹) y un contenido promedio de sólidos suspendidos totales de 1.180 mg L⁻¹ (rango de variación entre 1.050 y 1.400 mg L⁻¹) (Tabla 17).

El tratamiento primario realizado en el reactor hidrolítico - acidogénico mediante tratamientos bioquímicos y físicos, permitió reducir la carga orgánica en el 44,10% medida como DQO, reducir el contenido de sólidos totales en el 52,76%, reducir el contenido de sólidos suspendidos totales en el 73,51% y elevar el valor de pH (de 3,37 a 4,18).

En la Tabla 18 se presentan las caracterizaciones de los percolados del filtro verde. En total se analizaron 95 muestras, durante 20 semanas.

En promedio, el agua percolada presentó un valor de pH en el rango neutro (7,04), un valor de DQO de 229 mg L⁻¹, sólidos totales de 93 mg L⁻¹ y sólidos suspendidos totales de 30 mg L⁻¹,

Tabla 17. Caracterización del agua residual aplicada al filtro verde.

Muestra	Mes de muestreo	pH (unidades)	DQO (mg L ⁻¹)	ST (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)
Ingreso Reactor Hidrolítico	Febrero del 2018	3,38	18.700	13.550	3.800
Salida Reactor Hidrolítico	Febrero del 2018	4,01	11.150	7.700	1.100
Ingreso Reactor Hidrolítico	Marzo del 2018	3,24	25.900	16.380	4.400
Salida Reactor Hidrolítico	Marzo del 2018	3,99	14.400	5.520	1.400
Ingreso Reactor Hidrolítico	Abril del 2018	3,34	21.380	14.730	4.200
Salida Reactor Hidrolítico	Abril del 2018	4,24	10.730	6.740	1.100
Ingreso Reactor Hidrolítico	Mayo del 2018	3,42	23.057	15.125	4.850
Salida Reactor Hidrolítico	Mayo del 2018	4,29	13.450	8.570	1.250
Ingreso Reactor Hidrolítico	Junio del 2018	3,47	17.720	13.150	5.020
Salida Reactor Hidrolítico	Junio del 2018	4,36	9.950	5.925	1.050
Ingreso Reactor Hidrolítico	Promedio	3,37	21.351	14.587	4.454
Salida Reactor Hidrolítico	Promedio	4,18	11.936	6.891	1.180
Porcentaje de remoción			44,10%	52,76%	73,51%

Tabla 18. Caracterización de los drenados recogidos en el área experimental.

Muestra compuesta	Número de muestras simples	Período de tiempo	Redox (mV)	pH (Unidades)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	DQO (mg L^{-1})	ST (mg L^{-1})	SST (mg L^{-1})	N_T (mg L^{-1})	N-NH_3 (mg L^{-1})	N-NO_3 (mg L^{-1})
1	8	Feb 6 - Feb 14	173,50	6,55	230,58	754	227	18	53	6,2	2,9
2	18	Feb 16 - Mar 6	152,02	7,32	91,49	294	62	34	276	4,2	3,1
3	4	Mar 9 - Mar 13	185,08	6,84	79,03	115	80	18	161	5,9	2,6
4	12	Mar 16 - Mar 23	182,45	6,83	108,92	105	77	16	108	3,4	2,5
5	9	Mar 27 - Abr 3	167,19	7,07	124,10	138	33	16	207	5,3	2,4
6	6	Abr 4 - Abr 9	173,87	7,32	99,18	87	70	24	84	5,6	2,1
7	7	Abr 10 - Abr 17	178,01	7,07	92,76	68	64	36	119	4,2	1,7
8	4	Abr 19 - May 3	177,83	6,91	77,00	315	178	52	165	5,0	2,0
9	9	May 8 - May 15	181,23	6,93	109,31	262	69	44	158	5,0	1,8
10	8	May 18 - May 29	188,64	6,95	75,68	151	117	40	113	5,6	1,0
11	10	Jun 1 - Jun 8	180,01	7,28	90,15	172	48	34	134	6,4	1,3
Promedio	95		173,68	7,04	109,43	229	93	30	143	5,2	2,1

parámetros que están por debajo de los valores máximos admisibles para vertimientos a cuerpos de agua superficiales, de acuerdo con lo estipulado en la Resolución 631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia.

El porcentaje de reducción de DQO realizado por el suelo y el pasto vetiver fue del 98,08% (considerando que el agua residual del café llegó después del tratamiento primario, con una concentración promedio de DQO de 11.936 mg L^{-1}). El porcentaje de reducción de DQO realizado por todo el sistema de tratamiento (tratamiento primario + suelo + pasto vetiver) fue del 98,93% (considerando que el agua residual del café proveniente del beneficiadero tuvo una concentración promedio de DQO de 21.351 mg L^{-1}).

El porcentaje de reducción de sólidos totales (ST) realizado por el suelo y el pasto vetiver fue del 98,65% (considerando que el agua residual del café llegó después del tratamiento primario, con una concentración promedio de ST de 6.891 mg L^{-1}). El porcentaje de reducción de ST realizado por todo el sistema de tratamiento (tratamiento primario + suelo + pasto vetiver) fue del 99,36% (considerando que el agua residual del café proveniente del beneficiadero tuvo una concentración promedio de ST de 14.587 mg L^{-1}).

El porcentaje de reducción de sólidos suspendidos totales (SST) realizado por el suelo y el pasto vetiver fue del 97,46% (considerando que el agua residual del café llegó después del tratamiento primario, con una concentración promedio de SST de 1.180 mg L^{-1}). El porcentaje de reducción de SST realizado por el todo el sistema de tratamiento (tratamiento primario + suelo + pasto vetiver) fue del 99,33% (considerando que el agua residual del café proveniente del beneficiadero tuvo una concentración promedio de SST de 4.454 mg L^{-1}).

Tanto el valor promedio de pH en los percolados como los porcentajes promedio de eliminación de DQO y SST están dentro del rango de valores para vertimientos al suelo establecidos por las Corporaciones Autónomas Regionales, las cuales se están referenciando en los valores condensados en el decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Agricultura de Colombia, que exige un valor de pH entre 5 y 9, y una eliminación de DQO y SST superiores al 80%, hasta tanto el MADS expida la norma de vertimientos de aguas residuales no domésticas (ARnD) al suelo.

En promedio, el contenido de nitrógeno total Kjeldahl en los percolados fue de 143 mg L^{-1} , el contenido promedio de nitrógeno amoniacal fue de $5,2 \text{ mg L}^{-1}$ y el contenido promedio de nitratos de $2,1 \text{ mg L}^{-1}$, con más del 94% del nitrógeno en forma de nitrógeno orgánico.

La conductividad eléctrica promedio del agua percolada fue de $109,43 \mu\text{S cm}^{-1}$, variando en un rango entre $75,68$ y $230,58 \mu\text{S cm}^{-1}$. Para el caso del suelo, la conductividad eléctrica promedio al iniciar con la aplicación de las aguas - mieles del café fue de $0,050 \text{ mS cm}^{-1}$ y este mismo valor se obtuvo al finalizar el período de aplicación de las 20 semanas.

La pluviosidad que llegó al filtro verde durante las 20 semanas de experimentación fue de 1.244 mm, equivalente a $62,2 \text{ m}^3$ para los 50 m^2 de filtro verde. El volumen de aguas - mieles aplicado al filtro verde durante las 20 semanas de experimentación fue de 60 m^3 .

En la Figura 27 se presenta el aspecto del agua residual a la salida del beneficiadero, a la salida del reactor hidrolítico - acidogénico (pretratamiento) y a la salida del filtro verde.

Evolución de las propiedades del suelo. En la Tabla 19 se presenta el valor promedio de las características iniciales del suelo del filtro verde antes de iniciar con la aplicación del agua residual del café proveniente del tratamiento primario.

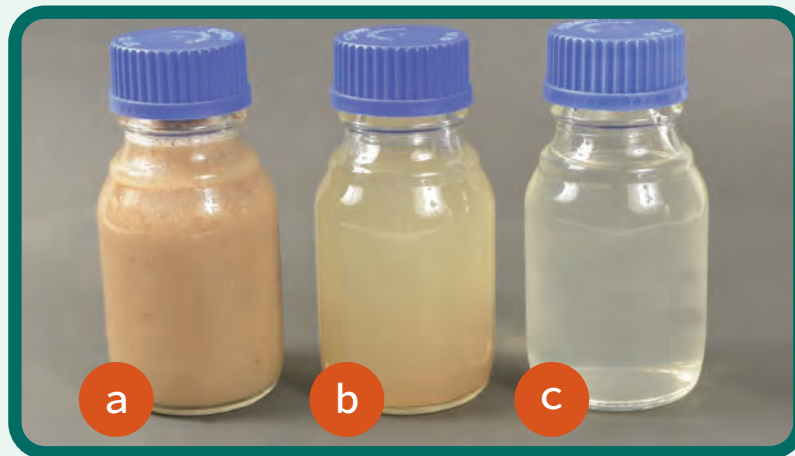


Figura 27. Aspecto del agua. **a.** A la salida del beneficiadero, **b.** A la salida del pretratamiento **c.** A la salida del filtro verde.

El valor promedio, de la evaluación de tres muestras, presentó un valor de pH de 4,63, un contenido de N del 0,31% y un contenido de materia orgánica del 7,33%. Además, presentó una capacidad de intercambio catiónico de 25 y unos contenidos de macronutrientes de 13 mg kg⁻¹ para el P y de 0,72 cmol kg⁻¹ para el K.

En la Tabla 19 se presenta el valor promedio de la caracterización de las muestras de suelo al final del período de aplicación en las diferentes subparcelas. Por cada subparcela se tomaron dos muestras de suelo (diez en total para todo el suelo del filtro verde), y se presentan los valores promedio para muestras de suelo del testigo (área adjunta a la experimental a la cual no se le aplicó aguas residuales del café) y para la cual se evaluaron dos muestras. En la Tabla se resaltan en color verde los parámetros del suelo que presentaron un incremento mayor al 5% con relación a su valor inicial, en color amarillo los parámetros del suelo cuya variación no fue superior al 5% respecto a su valor inicial y en color rojo los parámetros del suelo que presentaron una disminución mayor al 5% respecto a su valor inicial.

El valor promedio del pH de toda el área experimental fue de 4,88, superior en el 5,40% al presentado antes de iniciar con la aplicación de las aguas residuales y el cual refleja que no se presentó deterioro del suelo por la aplicación de las aguas residuales tratadas, que presentaron un pH inferior (en promedio 4,18). El suelo testigo mostró un incremento del valor del pH a valores promedio de 5,20 (después de 20 semanas).

El contenido promedio de materia orgánica del suelo, al final del período de aplicación, fue de 6,81%, valor un poco por debajo al presentado inicialmente por el suelo, antes de la aplicación del agua residual, que fue de 7,33% (disminución del 7,09%). El suelo testigo presentó un valor

Tabla 19. Características del suelo del filtro verde evaluado*.

Característica	Suelo inicial (Promedio de tres muestras)	Suelo final (Promedio de diez muestras)	Suelo testigo (Promedio de dos muestras)
pH	4,63	4,88 (+5,40)	5,20 (+12,31)
N (%)	0,31	0,29 (-6,45)	0,23 (-25,81)
Materia orgánica (%)	7,33	6,81 (-7,09)	5,15 (-29,74)
K (cmol kg ⁻¹)	0,72	0,57 (-20,83)	3,09 (+329,17)
Ca (cmol kg ⁻¹)	8,46	6,22 (-26,48)	3,43 (-59,46)
Mg (cmol kg ⁻¹)	2,34	1,48 (-36,75)	1,35 (-42,31)
Al (cmol kg ⁻¹)	2,30	2,77 (+20,43)	1,85 (-19,57)
CIC	25	26 (+4,00)	22 (-12,00)
P (mg kg ⁻¹)	13	9 (-30,77)	15 (+15,38)
Fe (mg kg ⁻¹)	527	436 (-17,27)	346 (-34,35)
Mn (mg kg ⁻¹)	49	23 (-53,06)	21 (-57,14)
Zn (mg kg ⁻¹)	5,93	4,43 (-25,30)	2,80 (-52,78)
Cu (mg kg ⁻¹)	6,37	4,45 (-30,14)	3,45 (-45,84)
B (mg kg ⁻¹)	0,34	0,38 (+11,76)	0,35 (+2,94)
S (mg kg ⁻¹)	23,63	8,04 (-65,98)	8,35 (-64,66)
Textura	F.Ar.	F.Ar.	F.Ar.

F.Ar: Franco-Arcillosa.

*Entre paréntesis la variación porcentual presentada en cada parámetro del suelo respecto al valor inicial (antes del período de aplicación).

de materia orgánica del 5,15% (disminución del 29,74% respecto al valor inicial), disminución aún mayor que la presentada en el área experimental.

Contenido de macronutrientes N, P, K. El contenido promedio de N del suelo, al final del período de aplicación, fue de 0,29% (disminución del 6,45% respecto al valor presentado inicialmente por el suelo, antes de la aplicación del agua residual, que fue de 0,31%). El suelo testigo (después de 20 semanas) presentó un valor de N del 0,23%, una disminución del 25,81%, mayor a la presentada por el área experimental alimentada con las aguas - mieles del café. El contenido promedio de K del suelo, al final del período de aplicación fue de 0,57 cmol kg⁻¹ (disminución del 20,83% respecto al valor presentado inicialmente por el suelo, que fue de 0,72 cmol kg⁻¹). El suelo testigo presentó un valor de K de 3,09 cmol kg⁻¹, es decir, un 329,17% superior al del suelo en sus condiciones iniciales. El contenido promedio de P del suelo, al final del período de aplicación fue de 9 mg kg⁻¹, disminución del 30,77% respecto al valor presentado inicialmente por el suelo, antes de la aplicación del agua residual, que fue de 13 mg kg⁻¹. El suelo testigo presentó (después de 20 semanas) un valor de P de 15 mg kg⁻¹.

En resumen, el suelo del área experimental, presentó después de 20 semanas de aplicación con aguas residuales del café un incremento en las variables: pH, Al y B (diferencias entre promedios superiores al 5%), un decremento en las variables: N, MO, K, Ca, Mg, P, Fe, Mn, Zn, Cu y S (diferencias entre promedios superiores al 5%) y un valor similar en las variables: CIC (diferencias entre promedios inferiores al 5%), respecto a las condiciones iniciales del suelo.

En resumen, el suelo del área experimental, presentó después de 20 semanas de aplicación con aguas residuales del café un incremento en las variables: N, MO, Ca, Mg, Al, CIC, Fe, Mn, Zn, Cu y B (diferencias entre promedios superiores al 5%), un decremento en las variables: pH, K y P (diferencias entre promedios superiores al 5%) y un valor similar en las variables: S (diferencias entre promedios inferiores al 5%), respecto a las condiciones finales del suelo testigo.

La disminución en el valor de un alto número de los parámetros caracterizadores del suelo del área experimental y del área testigo, ocurrió probablemente por el efecto lixivador de la lluvia que ingresó al suelo del filtro verde y al suelo testigo, durante el período de evaluación, dado que en varios días se registraron valores de pluviosidad superiores a los 40 mm (Cenicafé, 2019).

Los suelos óptimos para el cultivo del café deben presentar, entre otros, un valor de pH entre 5,2 a 6,2 (rango manejable entre 4,5 a 7,0), un contenido de MO entre 8% al 12% (rango manejable, mayor al 5%), contenido de K entre 0,5 a 0,75 cmol kg⁻¹ (rango manejable mayor a 0,2 cmol kg⁻¹), Ca entre 4 y 20 cmol kg⁻¹, Mg entre 1 y 10 cmol kg⁻¹, P entre 10 y 30 mg kg⁻¹, Mn entre 5 y 50 mg kg⁻¹ y textura entre franca a franca-arcillosa, condiciones que se mantienen en el suelo después de la aplicación de las aguas residuales del café tratadas.

Producción de biomasa de las hojas. Se cuantificó la producción de biomasa de las hojas del pasto vetiver durante las 20 semanas de aplicación. En la Tabla 20 se presenta la tasa de crecimiento de la biomasa fresca en g d^{-1} y t ha^{-1} .

En promedio, la tasa de crecimiento del pasto vetiver (biomasa fresca) fue de $133,7 \text{ g d}^{-1}$ (rango de variación entre $65,63$ y $184,98 \text{ g d}^{-1}$), para una producción de $18,72 \text{ t ha}^{-1}$ ($13,37 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$). En la Figura 28 se grafican los resultados de producción de biomasa fresca en t ha^{-1} para las diferentes subparcelas y el valor promedio.

En la Tabla 21 se presenta la tasa de crecimiento de la biomasa seca del pasto vetiver, que fue, en promedio, de $35,83 \text{ g d}^{-1}$ (rango de variación entre $19,09$ y $51,07 \text{ g d}^{-1}$), para una producción de $5,02 \text{ t ha}^{-1}$ ($3,59 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$). En la Figura 29 se grafican los resultados de producción de biomasa seca para las diferentes subparcelas y el valor promedio.

Consideraciones respecto a los resultados obtenidos en las evaluaciones piloto y de campo

En función de los resultados de eliminación de contaminantes puede concluirse que la tecnología de filtros verdes es apta para el tratamiento de las aguas - mieles procedentes del beneficio ecológico del café, presentando unos elevados porcentajes de remoción de carga orgánica. Tanto a escala piloto como a escala de campo, los drenados provenientes de los filtros verdes presentaron, en los diferentes parámetros evaluados, valores que estuvieron dentro de los límites de calidad establecidos en la normativa colombiana en el Decreto 1594 de 1984 y en la Resolución 631 del 2015 respecto a vertimientos a cuerpos de agua superficiales.

Para las diferentes cargas hidráulicas evaluadas a escala piloto ($5,0$, $10,0$ y $20,0 \text{ mm d}^{-1}$) y a escala de campo (12 mm d^{-1} y máximas de 60 mm d^{-1}), los filtros verdes mostraron un buen desempeño en el tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café. En la literatura se reporta que cargas hidráulicas entre $2,5$ y 15 mm d^{-1} son usualmente aplicadas a los filtros

Tabla 20. Tasa de crecimiento del pasto vetiver (biomasa fresca) durante la experimentación.

Área	Abril (g d^{-1})	Mayo (g d^{-1})	Junio (g d^{-1})	Promedio (g d^{-1})	Promedio (t ha^{-1})
Subparcela 1	156,25	171,43	227,27	184,98	25,90
Subparcela 2	150,00	85,71	142,42	126,05	17,65
Subparcela 3	153,13	128,57	157,58	146,42	20,50
Subparcela 4	153,13	128,57	154,55	145,41	20,36
Subparcela 5	46,88	100,00	50,00	65,63	9,19
Promedio	131,88	122,86	146,36	133,70	18,72

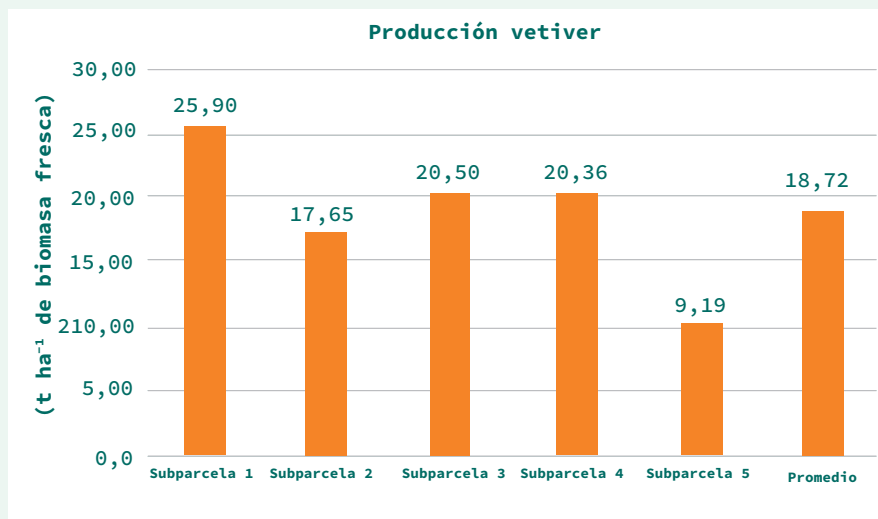


Figura 28. Producción de biomasa fresca de pasto vetiver en la Estación Experimental El Rosario (Venecia, Antioquia).

Tabla 21. Tasa de crecimiento del pasto vetiver (biomasa seca) durante la experimentación.

Área	Abril (g d ⁻¹)	Mayo (g d ⁻¹)	Junio (g d ⁻¹)	Promedio (g d ⁻¹)	Promedio (t ha ⁻¹)
Subparcela 1	42,63	49,10	61,50	51,07	7,15
Subparcela 2	37,67	27,15	37,59	34,14	4,78
Subparcela 3	34,44	34,78	40,61	36,61	5,13
Subparcela 4	38,76	34,28	41,70	38,24	5,35
Subparcela 5	13,27	29,93	14,06	19,09	2,67
Promedio	33,35	35,05	39,09	35,83	5,02

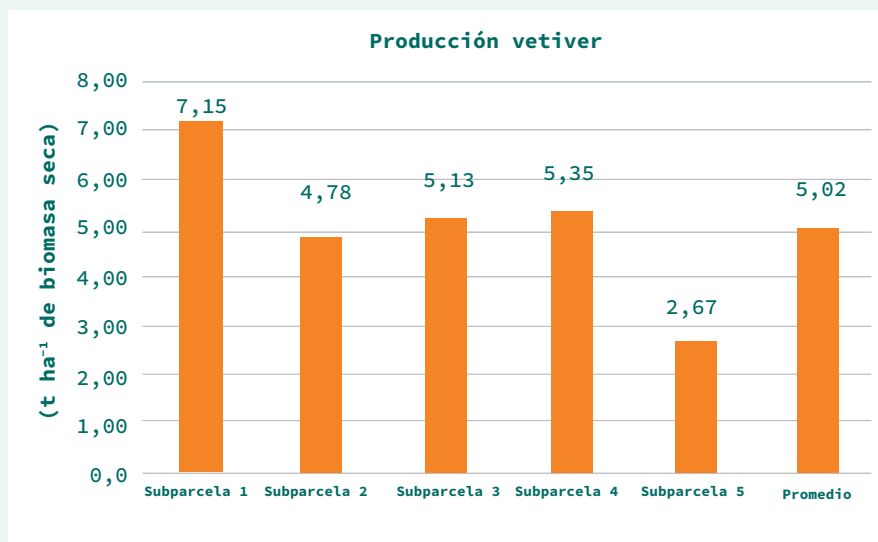


Figura 29. Producción de biomasa seca de pasto vetiver en la Estación Experimental El Rosario (Venecia, Antioquia).

verdes, cuando se trata de agua limpia (Mokma, 2006) y se reportan rangos entre 2 y 140 mm d⁻¹ de aplicación con éxito, en filtros verdes operando con aguas residuales provenientes de la agroindustria (Carawan et al., 1979).

Las máximas cargas orgánicas aplicadas de aguas residuales del beneficio del café al suelo del filtro verde fueron de 1.000 kg DBO/ha-d, (2.000 kg DQO/ha-d) en la etapa piloto y de 3.500 kg DBO/ha-d (solo un día a la semana), (7.000 kg DQO/ha-d), en la etapa de campo, con un buen desempeño de los filtros verdes evaluado en función de la calidad de los efluentes obtenidos, del crecimiento de la vegetación y de los cambios en las propiedades químicas del suelo. En la literatura se reportan cargas orgánicas aplicadas de aguas residuales, en los filtros verdes, en rangos entre 500 kg DBO/ha-d (1.000 kg DQO/ha-d) (Mokma, 2006) y 10.000 kg DBO/ha-d (20.000 kg DQO/ha-d) (Jewell et al., 1978).

Fuller y Warrick (1985), citados por Mokma (2006), reportan que con cargas hidráulicas superiores a 75 mm d⁻¹ el suelo se satura y, por lo tanto, la carga hidráulica y la carga de DBO son importantes en el diseño de un sistema natural de filtros verdes para el tratamiento de aguas residuales.

En el sistema completo de tratamiento del filtro verde, es decir, considerando el tratamiento primario y el tratamiento por el suelo y la vegetación, las máximas cargas orgánicas aplicadas de aguas residuales del beneficio del café fueron de 4.000 kg DQO/ha-d en la etapa piloto y de 14.000 kg DQO/ha-d en la etapa de campo, mostraron un buen desempeño de los filtros verdes.

Tanto en la etapa piloto como en la etapa de campo, se comprobó la conveniencia de la utilización de pasto vetiver como material vegetal de los filtros verdes, dado que con aplicación de cargas hidráulicas al suelo de hasta 60 mm d⁻¹ y de cargas orgánicas de hasta 3,5 t de DBO/ha-d, se presentó crecimiento del mismo. La tasa de crecimiento del pasto vetiver en la etapa piloto varió entre 3,92 t ha⁻¹ (5,60 g m²-d⁻¹) y 18,12 t ha⁻¹ (25,89 g m²-d⁻¹) de material fresco y para la etapa de campo se encontraron valores promedio de 18,72 t ha⁻¹ (13,37 g m²-d⁻¹) de material fresco. La producción total de biomasa fresca, estimada en la etapa piloto, varió entre 49,05 (35,04 g m²-d⁻¹) y 65,98 t ha⁻¹ (47,13 g m²-d⁻¹) de material fresco y la producción total de biomasa seca varió entre 14,62 t ha⁻¹ (10,44 g m²-d⁻¹) y 20,67 t ha⁻¹ (14,76 g m²-d⁻¹). En la literatura se reportan cosechas de materia seca de hasta 40,7 t ha⁻¹, con consumos de agua por parte del pasto vetiver de hasta 28 L m²-d (Truong & Danh, 2015).

No se evidenció, en la evaluación a escala piloto ni a escala de campo, un cambio negativo en los contenidos químicos del suelo que pueda cuestionar la viabilidad a largo plazo del uso de la tecnología de los filtros verdes en el tratamiento de las aguas residuales del café, por el contrario, al comparar los contenidos químicos del suelo de las áreas de filtros verdes regadas con las aguas residuales del café con el suelo de áreas sin riego (parcelas testigo), se encontraron mejores contenidos en variables como materia orgánica, pH, N, CIC, Ca, Mg, Mn, B, Zn, Fe.

De acuerdo con los resultados obtenidos a escala piloto y de campo en el tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café utilizando la tecnología de filtros verdes, se recomienda utilizar cargas orgánicas de hasta 2.000 kg DBO/ha-d (4.000 kg DQO/ha-d) a la entrada del tratamiento primario y cargas orgánicas hasta 1.000 kg DBO/ha-d (2.000 kg DQO/ha-d) en el sistema de aplicación al suelo con vegetación, y pasto vetiver sembrado al cuadro, a distancias de 30 cm y 3 esquejes por sitio, como vegetación del filtro verde, con cargas hidráulicas que no superen los 20 mm d⁻¹. Con estos parámetros se logra obtener efluentes que cumplen con los requerimientos de calidad establecidos en la normativa colombiana vigente en materia de vertimientos.



**Investigaciones en
filtros verdes para lograr
cero descargas de las
aguas residuales del
beneficio del café**

Dados los costos ambientales legales asociados a la generación de vertimientos al suelo (Decreto 50 del 2018), a cuerpos de agua superficial (Resolución 631 del 2015) y al reúso de las aguas residuales en actividades agrícolas (Resolución 1256 del 2021), se investigó la tecnología de filtros verdes para evitar generación de descargas de residuos líquidos “Zero Liquid Discharge” (ZLD).

Evaluación a escala piloto

Se evaluaron 15 filtros verdes, tipo invernadero, de 1 m² (1 m x 1 m) y 0,6 m de profundidad, impermeabilizados con geomembrana de 20 mils y sembrados con vegetación, para determinar después de tres períodos de aplicación y de tres períodos de reposo, la tasa de evapotranspiración de la vegetación sembrada y utilizar la información generada para el diseño de filtros verdes tipo ZLD. En la Figura 30 se detalla el proceso de construcción y evaluación de los filtros verdes, los cuales se equiparon con un sensor de humedad tipo Decagon 5TE (humedad, temperatura y conductividad eléctrica), ubicado en el centro de cada filtro verde (Figura 31) a una profundidad de 30 cm (Figura 32). Las sondas se conectaron a un datalogger tipo Decagon EM50 (cinco canales) para el registro continuo de la información.

Vegetación utilizada en los sistemas de filtros verdes

En tres de los filtros verdes, la vegetación creció de forma espontánea, compuesta principalmente por *Digitaria horizontalis* Willd (pata de gallina), *Synedrella nodiflora* (L) Gaertn (yuyo), *Spilanthus ocyimifolia* Lam (botoncillo), *Oxalis latifolia* H.B.K. (acedera), *Panicum máximum* Jacq (arrocillo), *Commelina diffusa* Burm. f. (suelda) y *Paspalum paniculatum* L (gramalote) identificados con base en el libro de Gómez & Rivera (1987) (Figura 33). En los 12 filtros verdes restantes se sembró *Chrysopogon zizanioides* (pasto vetiver) en alta densidad (dos esquejes por sitio cada 10 cm) (Figura 34), los esquejes sembrados tenían 10 cm de tallo y 5 cm de raíz. Periódicamente, el crecimiento de la vegetación se controló con cortes regulares a 35 cm de altura, para maximizar su capacidad de crecimiento y su capacidad de captación de nutrimentos.

Tipo de suelo

La vegetación del filtro verde se sembró sobre un suelo de pendiente menor al 1%, textura entre franco-arenosa y franco-arcillo-arenosa, un valor de pH entre 4,60 y 6,50, contenido en materia orgánica entre 2,90% y 6,20% y conductividad eléctrica entre 0,01 y 0,17 mS cm⁻¹ (Tabla 22).

Tipo de agua residual utilizada y pretratamiento

Se utilizaron tres tipos de aguas residuales del lavado del café (provenientes de la tecnología del tanque tina en el lavado del café en tanques, lixiviados de la tecnología Becolsub y mieles de la tecnología Ecomill®) y agua limpia con la que realizaba el proceso de beneficio del café. Los diferentes tipos de aguas residuales se almacenaron en tanques de 5 m³ provistos de un dispositivo de descarga que permitía obtener el agua clarificada del tercio medio del tanque,

quedando los sobrenadantes en el tercio superior y los lodos en el tercio inferior (Figura 35). Una vez consumida el agua residual se realizó el mantenimiento a los tanques de almacenamiento, descargando los lodos generados en lechos de secado (Figura 36).





Figura 31. Elaboración de una perforación en el centro de los filtros verdes para la instalación de los sensores.



Figura 32. Ubicación del sensor a 30 cm de profundidad del filtro verde.

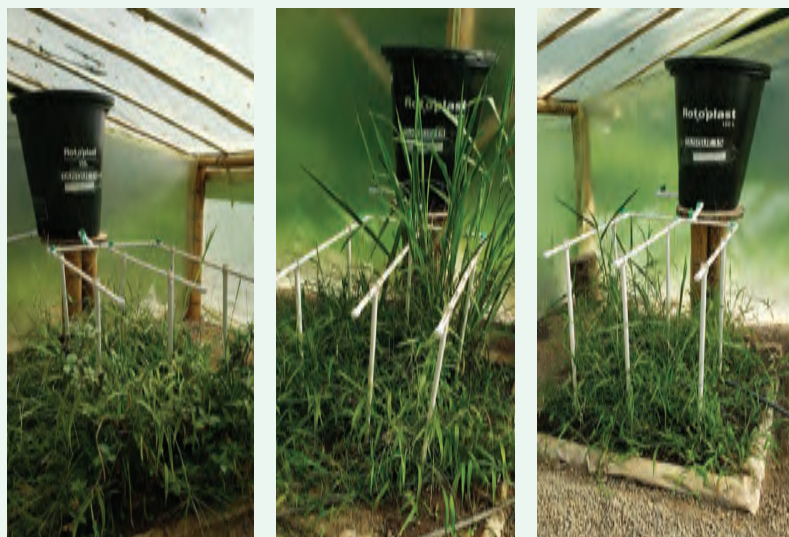


Figura 33. Vegetación natural de los filtros verdes (FV13, FV14, FV15) al inicio de la primera aplicación de agua.



Figura 34. Pasto vetiver como vegetación de los filtros verdes (FV1 al FV12) al inicio de la primera aplicación de agua.

Cargas hidráulicas aplicadas

Se evaluaron tres valores de carga hidráulica (20, 40 y 60 mm).

Tipo de distribución del agua residual

El agua residual pre-tratada del café fue aplicada a los filtros verdes mediante un dispositivo de riego por goteo, utilizando una tubería nivelada, para garantizar una distribución homogénea de la misma. Gracias al uso de un dispositivo de regulación de caudal se consiguió un caudal constante de 100 mL min^{-1} (Figura 37).

Tiempo de aplicación del agua residual

La aplicación con aguas residuales del café se realizó de lunes a viernes, durante 12 semanas consecutivas, y después se sometieron los filtros verdes a un período de reposo de 12 semanas, durante las cuales un día a la semana se realizaba riego con agua limpia para mantener el crecimiento de la vegetación. Se evaluaron tres períodos de aplicación y tres períodos de reposo.

Evaluación del sistema de tratamiento de los filtros verdes

La evaluación se realizó en las siguientes etapas:

- Montaje de la investigación (febrero del 2019 - septiembre del 2019).
- Primer período de aplicación (septiembre del 2019 - diciembre del 2019).
- Primer período de reposo (diciembre del 2019 - junio del 2020).
- Segundo período de aplicación (junio del 2020 - septiembre del 2020).

Tabla 22. Características químicas del suelo de los filtros verdes.

Parámetro	FV1	FV2	FV3	FV4	FV5
pH	4,9	4,6	4,9	4,7	5,3
CE (mS cm ⁻¹)	0,03	0,06	0,06	0,06	0,17
N (%)	0,21	0,25	0,24	0,18	0,18
MO (%)	4,5	5,6	5,4	3,8	3,7
K (cmol kg ⁻¹)	0,68	0,70	0,39	1,10	3,33
Ca (cmol kg ⁻¹)	4,64	6,65	5,89	4,41	4,83
Mg (cmol kg ⁻¹)	0,89	1,06	1,37	1,05	1,24
Al (cmol kg ⁻¹)	0,3	0,2	0,1	0,3	0,1
CIC	13	16	18	12	13
P (mg kg ⁻¹)	90	121	142	74	115
Fe (mg kg ⁻¹)	240	231	164	255	397
Mn (mg kg ⁻¹)	19	20	14	22	35
Zn (mg kg ⁻¹)	6,0	8,8	8,0	4,8	4,0
Cu (mg kg ⁻¹)	16,1	14,7	15,4	20,5	18,2
B (mg kg ⁻¹)	0,28	0,23	0,37	0,15	0,43
S (mg kg ⁻¹)	12,6	23,0	23,9	16,9	48,8
Arcilla (%)	22	20	20	20	20
Limo (%)	28	24	28	26	24
Arena (%)	50	56	52	54	56
Textura	Franco-Ar-A	Franco-Ar-A	Franco-Ar-A	Franco-Ar-A	Franco-Ar-A
Parámetro	FV6	FV7	FV8	FV9	FV10
pH	6,0	4,9	5,4	6,5	4,9
CE (mS cm ⁻¹)	0,05	0,03	0,02	0,03	0,01
N (%)	0,27	0,16	0,14	0,23	0,17
MO (%)	6,0	3,3	2,9	5,0	3,6
K (cmol kg ⁻¹)	4,68	1,77	2,59	0,93	0,80
Ca (cmol kg ⁻¹)	6,17	4,18	5,24	5,88	4,59
Mg (cmol kg ⁻¹)	1,98	0,96	1,38	1,95	1,07
Al (cmol kg ⁻¹)	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
CIC	17	10	11	17	12
P (mg kg ⁻¹)	152	80	149	175	151
Fe (mg kg ⁻¹)	431	283	287	396	320
Mn (mg kg ⁻¹)	28	28	27	28	26
Zn (mg kg ⁻¹)	4,7	5,9	6,1	4,5	5,4
Cu (mg kg ⁻¹)	15,2	17,3	19,6	16,1	19,4
B (mg kg ⁻¹)	0,79	0,30	0,61	3,20	0,47
S (mg kg ⁻¹)	51,6	17,1	22,8	49,5	15,2
Arcilla (%)	20	16	16	18	16
Limo (%)	24	30	22	26	24
Arena (%)	56	54	62	56	60
Textura	Franco-Ar-A	FrancoArenosa	FrancoArenosa	FrancoArenosa	FrancoArenosa

Continúa...

...continuación Tabla 22.

Parámetro	FV11	FV12	FV13	FV14	FV15
pH	5,9	5,7	4,7	4,9	5,3
CE (mS cm ⁻¹)	0,01	0,01	0,01	0,05	0,07
N (%)	0,17	0,22	0,23	0,22	0,27
MO (%)	3,5	4,9	5,0	4,9	6,2
K (cmol kg ⁻¹)	3,29	0,37	0,23	0,28	0,12
Ca (cmol kg ⁻¹)	4,97	3,73	5,74	5,87	5,39
Mg (cmol kg ⁻¹)	1,56	1,77	1,60	1,61	1,53
Al (cmol kg ⁻¹)	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1
CIC	12	12	16	15	17
P (mg kg ⁻¹)	137	183	150	194	141
Fe (mg kg ⁻¹)	375	653	301	328	160
Mn (mg kg ⁻¹)	35	33	26	27	11
Zn (mg kg ⁻¹)	4,6	3,9	12,8	10,6	6,8
Cu (mg kg ⁻¹)	20,5	19,8	16,9	17,4	12,2
B (mg kg ⁻¹)	0,74	1,09	0,32	0,38	0,04
S (mg kg ⁻¹)	26,4	45,1	25,6	25,0	33,1
Arcilla (%)	16	18	16	16	16
Limo (%)	22	24	23	21	25
Arena (%)	62	58	61	63	59
Textura	FrancoArenosa	FrancoArenosa	FrancoArenosa	FrancoArenosa	FrancoArenosa

Franco-Ar-A: Franco-Arcilloso-Arenosa.



Figura 35. Dispositivo de toma del agua residual en los tanques de almacenamiento.

- Segundo período de reposo (septiembre del 2020 - diciembre del 2020).
- Tercer período de aplicación (diciembre del 2020 - marzo del 2021).
- Tercer período de reposo (marzo del 2021 - junio del 2021).

Variables y frecuencia de muestreo en el suelo. Los filtros verdes se instrumentaron con sensores 5TE de DECAGON que registraron el contenido de humedad, la temperatura y la conductividad eléctrica del suelo y que estuvieron conectados a un datalogger. Adicionalmente, se instaló un termómetro para registrar la temperatura ambiente en el interior del invernadero (Figura 38).

El sensor 5TE de DECAGON es un sensor electromagnético que realiza una medición indirecta del contenido de humedad del suelo, influenciada por la permitividad



Figura 36. Aspecto de los lodos generados en los tanques de almacenamiento y conducción hasta los lechos de secado.



Figura 37. Aspecto del sistema de riego de los filtros verdes.

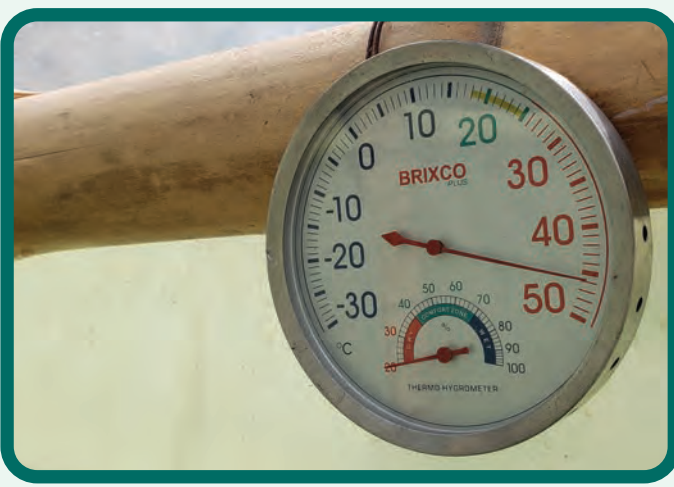


Figura 38. Instrumentación de los filtros verdes.

dieléctrica o constante dieléctrica (ϵ_a) del suelo, bajo el concepto de capacitancia. De acuerdo con Decagon (2014), el sensor de capacitancia 5TE mide la ϵ_a 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. No todos los suelos tienen las mismas propiedades eléctricas, por lo que se hace necesario realizar una calibración específica del sensor, según Decagon 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). La calibración se basó en el procedimiento general para calibración de sensores de capacitancia desarrollado por Starr y Paltineanu (2002).

La información generada por los sensores se registró cada 15 minutos y correspondió a valores procesados de humedad volumétrica del suelo ($m^3 m^{-3}$), temperatura del suelo ($^{\circ}C$) 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 ($m^3 m^{-3}$), temperatura del suelo ($^{\circ}C$) y conductividad eléctrica del suelo ($mS cm^{-1}$) para ser ajustados a través de la ecuación específica obtenida para el suelo en el cual se instalaron los sensores.

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.

Determinación de las tasas de evapotranspiración (ET). El valor de la evapotranspiración se determinó a través de eventos concretos, de la siguiente manera:

Para aquellos días en los cuales no se aplicó agua (sábados, domingos y festivos) y la humedad volumétrica registrada por las sondas (a 30 cm de profundidad) y ya ajustada con la respectiva ecuación de calibración, estuvo por debajo de la capacidad de campo del suelo en el cual estaban instaladas las sondas, se calculó la pérdida de humedad, cada 15 minutos, a través de la diferencia entre los valores registrados y ajustados en el intervalo de tiempo de registro de la variable. 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). Finalmente, para obtener el valor de ET (en $mm d^{-1}$), se sumaron los valores positivos de los 96 datos analizados por día y el resultado obtenido se multiplicó por el volumen de suelo.

Determinación de las características del suelo. En los filtros verdes, antes del inicio de la investigación, al final de los diferentes períodos de aplicación con las aguas residuales del café (12 semanas, 60 días hábiles) y al final de los diferentes períodos de reposo (12 semanas), se realizó un muestreo compuesto del suelo para determinar sus características hidráulicas (punto de marchitez, capacidad de campo); características físicas (densidad aparente, textura,

conductividad eléctrica) y características químicas (bases de cambio, minerales, materia orgánica, N, P) (Figura 39 y Figura 40).

Los métodos de análisis fueron los mismos que se describieron en las investigaciones en filtros verdes para el tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café.

Variables y frecuencia de muestreo en el agua residual afluyente y en el agua percolada

Determinación por lisimetría de drenaje del volumen de agua retenido y evapotranspirado. Semanalmente, se cuantificó la cantidad de agua aplicada a cada uno de los filtros verdes y la cantidad de agua drenada de los mismos. El agua retenida y evapotranspirada se calculó como la diferencia entre el volumen aplicado y el volumen drenado. Para presentar los datos en mm, el valor de la diferencia se dividió entre el número de días transcurridos para



Figura 39. Muestreo de suelo para la determinación de propiedades físicas.



Figura 40. Muestreo de suelo para la determinación de propiedades químicas.

obtener los drenados que variaron entre 6, 7 y 8 días, dependiendo de la presencia de días festivos. Todos los filtros verdes tuvieron 1 m² de área superficial.

Determinación de la eficiencia de tratamiento de los filtros verdes. Se tomaron muestras semanales del agua pretratada aplicada a los filtros verdes y de los drenados generados por los mismos (Figura 41). Se determinaron, tanto en el agua que ingresó al filtro verde, como en el agua percolada, las siguientes variables: pH, conductividad eléctrica, turbidez, DQO, sólidos totales y sólidos suspendidos totales.

Método 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).

Variables y frecuencia de muestreo de la biomasa

Se realizó un corte frecuente de la biomasa para determinar su tasa de crecimiento y realizar su caracterización. La biomasa cortada se pesó y secó (Figura 42), posteriormente se caracterizaron sus variables: cenizas, N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, B. Los métodos de análisis fueron: cenizas: calcinación a 475°C, nitrógeno: semimicro Kjeldahl; fósforo: colorimétrico (molibdovanadato de amonio); potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, zinc y cobre: espectrofotometría de absorción atómica; boro: colorimétrico (azometina H).

En la Tabla 23 se presentan las condiciones de operación de los diferentes filtros verdes evaluados.





Figura 42. Aspecto de la biomasa cortada en proceso de secado.

Tabla 23. Condiciones de operación en la evaluación de los diferentes filtros verdes.

Filtro verde	Carga hidráulica (mm)	Tipo de agua	Tipo de vegetación
FV1	20	Limpia, usada en el beneficio	Pasto vetiver
FV2	40	Limpia, usada en el beneficio	Pasto vetiver
FV3	60	Limpia, usada en el beneficio	Pasto vetiver
FV4	20	Residual del tanque tina	Pasto vetiver
FV5	40	Residual del tanque tina	Pasto vetiver
FV6	60	Residual del tanque tina	Pasto vetiver
FV7	20	Residual de lixiviados	Pasto vetiver
FV8	40	Residual de lixiviados	Pasto vetiver
FV9	60	Residual de lixiviados	Pasto vetiver
FV10	20	Residual de Ecomill®	Pasto vetiver
FV11	40	Residual de Ecomill®	Pasto vetiver
FV12	60	Residual de Ecomill®	Pasto vetiver
FV13	20	Limpia, usada en el beneficio	Natural
FV14	40	Limpia, usada en el beneficio	Natural
FV15	60	Limpia, usada en el beneficio	Natural

Resultados de la evaluación de los filtros verdes tipo ZLD

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante los tres períodos de aplicación y los tres períodos de reposo de los diferentes filtros verdes evaluados.

Primera aplicación. En la Tabla 24 se presentan los volúmenes retenidos y evapotranspirados de agua en los filtros verdes durante la primera aplicación, que se realizó entre el 23 de septiembre del 2019 y el 15 de diciembre del 2019, medidos mediante lisimetría de drenaje.

Tabla 24. Volúmenes retenidos y evapotranspirados de agua. Primera aplicación.

Filtro verde	Agua semanal (L)	Agua retenida y evapotranspirada (L·m ² ·d ⁻¹)												Promedio por FV	Promedio por agrupación
		Semana													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
FV1	100	12,14	11,29	10,88	9,50	10,29	9,13	6,71	7,83	9,71	9,71	12,29	9,71	9,93	
FV2	200	25,00	26,00	22,38	21,67	24,43	21,75	19,00	21,67	24,86	24,43	25,43	24,71	23,44	22,92
FV3	300	37,14	41,14	31,75	31,33	35,86	32,25	27,57	31,83	39,29	38,57	38,71	39,14	35,38	
FV4	100	13,57	13,86	12,13	12,83	13,86	12,13	11,00	12,67	13,71	13,86	13,86	13,86	13,11	
FV5	200	28,43	28,43	24,88	26,33	25,57	21,25	19,00	22,00	25,57	27,29	28,00	27,71	25,37	25,25
FV6	300	37,14	38,43	32,88	35,00	38,43	34,38	31,43	36,50	40,14	40,57	41,14	41,00	37,25	
FV7	100	10,71	12,29	9,00	9,00	10,86	9,50	8,57	10,83	12,71	12,43	13,43	13,43	11,06	
FV8	200	27,14	27,29	24,50	26,17	28,14	21,63	22,14	25,50	27,86	27,86	27,86	27,86	26,16	24,87
FV9	300	36,43	40,43	34,00	35,00	38,29	32,88	29,57	36,50	41,00	40,71	41,86	42,00	37,39	
FV10	100	14,29	14,29	12,13	12,83	13,71	12,13	6,14	12,50	13,71	12,86	13,71	13,57	12,66	
FV11	200	27,86	27,29	20,13	19,33	21,00	19,25	17,14	22,33	24,43	25,14	25,43	26,00	22,94	23,47
FV12	300	40,00	35,86	32,00	32,33	35,86	31,75	27,29	32,67	37,43	37,29	37,71	37,57	34,81	
FV13	100	12,00	11,29	7,50	6,33	8,29	8,38	6,43	10,33	9,00	9,00	9,57	9,29	8,95	
FV14	200	26,43	20,86	24,63	25,00	28,14	19,25	15,71	18,50	28,14	28,14	28,14	28,00	24,25	22,64
FV15	300	42,14	42,57	29,88	30,83	34,71	31,88	27,57	31,50	36,00	35,86	36,71	37,00	34,72	
Promedio general												23,83			

En la Tabla 25 se presentan los resultados del análisis de carga orgánica, expresada como DQO, ST y SST, además de las variables pH, turbidez y conductividad eléctrica realizados a las aguas alimentadas a los filtros verdes y a los drenados recolectados, durante la primera aplicación y los porcentajes de eliminación de la carga orgánica.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la primera aplicación, condensados en las Tablas 24 y 25 se puede resumir lo siguiente:

- 1.** Los menores valores de volumen retenido y evapotranspirado de agua, expresados en $L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$, se presentaron para los filtros verdes (FV) con cargas hidráulicas de 20 mm, siendo de $8,95\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para el FV13 con aplicación de agua limpia y conteniendo vegetación natural y de $9,93\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para el FV1 con aplicación de agua limpia y sembrado con pasto vetiver. Los mayores valores de volumen retenido y evapotranspirado de agua se presentaron para los filtros verdes con cargas hidráulicas de 60 mm, siendo de $37,25\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para el FV6 con aplicación de aguas residuales provenientes del tanque tina y sembrado con pasto vetiver y de $37,39\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para el FV9 con aplicación de lixiviados y sembrado con pasto vetiver.
- 2.** Al tomar el promedio de los valores de agua retenida y evapotranspirada, por tipo de agua y tipo de vegetación, estos variaron entre $22,64\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para los FV regados con agua limpia y conteniendo vegetación natural y $25,25\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para los FV sembrados con pasto vetiver y regados con aguas residuales del beneficio del café proveniente del tanque tina.
- 3.** En promedio, el volumen retenido y evapotranspirado de agua en la experimentación fue de $23,83\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ (incluyendo todos los FV) y de $24,53\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ (para los FV con aplicación de los diferentes tipos de aguas residuales del beneficio del café).
- 4.** En promedio el agua limpia utilizada para el beneficio del café y que se utilizó como testigo en los FV mostró valores de pH de 6,70, turbidez de 26 FTU, conductividad eléctrica de $0,190\ mS\ cm^{-1}$, DQO de $233\ mg\ L^{-1}$, ST de $253\ mg\ L^{-1}$ y SST de $20\ mg\ L^{-1}$.
- 5.** La DQO del agua residual del beneficio del café utilizada para el riego de los FV varió entre $32.383\ mg\ L^{-1}$ (tanque tina) y $90.521\ mg\ L^{-1}$ (lixiviados).
- 6.** El valor promedio de eliminación de la DQO, ST y SST en los FV regados con aguas provenientes del tanque tina fue de 77,51%, 62,01% y 72,37%, respectivamente; para los FV con aplicación de lixiviados fue del 58,24%, 45,37% y 88,63%, respectivamente, y para los FV regados con mieles del Ecomill® fue de 63,50%, 56,06% y 93,51%, respectivamente.

Una vez terminada la aplicación, se realizó el muestreo del suelo de los diferentes filtros verdes, para determinar las características físico-químicas del mismo. En la Tabla 26 se resaltan en color verde los parámetros del suelo que presentaron un incremento mayor al 5% con relación a su valor inicial (antes de iniciar con la aplicación), en color amarillo los parámetros del suelo cuya variación no fue superior al 5% respecto a su valor inicial y en color rojo los parámetros del suelo que presentaron una disminución mayor al 5% respecto a su valor inicial.

Tabla 25. Caracterización de las aguas residuales aplicadas a los filtros verdes y de sus drenados. Primera aplicación* .

Filtro verde	pH (unidades)		Turbidez (FTU)		Conductividad eléctrica (mS cm ⁻¹)		DQO (mg L ⁻¹)		ST (mg L ⁻¹)		SST (mg L ⁻¹)		Remoción DQO (%)		Remoción ST (%)		Remoción SST (%)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Por FV	Agrupado	Por FV	Agrupado	Por FV	Agrupado
FV1	5,53	70	0,070	308	264	47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FV2	6,70	75	0,190	286	352	81	253	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FV3	5,42	15	0,147	418	258	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FV4	4,83	255	1,985	7.413	2.416	327	77,11	-	65,90	-	73,38	-	-	-	-	-	-	-
FV5	3,75	253	3,320	7.458	3.034	328	7,087	1.230	76,97	77,51	62,01	57,18	73,32	72,37	-	-	-	-
FV6	5,17	290	2,478	6.976	2.626	364	-	-	78,46	-	62,94	-	70,41	-	-	-	-	-
FV7	4,37	>500	7,678	33.743	14.156	739	-	-	62,72	-	55,98	-	86,54	-	-	-	-	-
FV8	3,58	>500	9,438	39.785	20.346	650	5,490	56,05	58,24	45,37	88,17	88,63	-	-	-	-	-	-
FV9	4,19	>500	8,484	39.864	18.207	485	-	-	55,96	-	43,39	-	91,17	-	-	-	-	-
FV10	4,40	>500	5,061	18.560	6.347	598	-	-	75,53	-	73,14	-	92,45	-	-	-	-	-
FV11	3,71	>500	7,197	27.869	11.349	550	7,920	63,26	63,50	56,06	93,05	93,51	-	-	-	-	-	-
FV12	4,43	>500	7,308	36.643	13.452	394	-	-	51,69	-	43,08	-	95,03	-	-	-	-	-
FV13	5,32	155	0,165	643	507	107	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FV14	6,70	118	0,190	634	452	82	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FV15	5,48	54	0,116	370	244	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Promedio general												66,42	54,48	84,83				

(*) Todos los valores corresponden al promedio de 12 muestras. Entrada (Agua aplicada). Salida (Agua drenada).

Tabla 26. Caracterización del suelo de los filtros verdes al final de la primera aplicación*.

Parámetro	FV1	FV2	FV3	FV4	FV5	FV6	FV7
pH	5,50 (+12,24%)	5,40 (+17,39%)	5,40 (+10,20%)	5,1 (+8,51%)	4,9 (-7,55%)	4,6 (-23,33%)	5,9 (+20,41%)
N (%)	0,22 (+4,76%)	0,24 (-4,00%)	0,29 (+20,83%)	0,16 (-11,11%)	0,16 (-11,11%)	0,25 (-7,41%)	0,16 (0,00%)
MO (%)	4,90 (+8,89%)	5,40 (-3,57%)	6,70 (+24,07%)	3,3 (-13,16%)	3,3 (-10,81%)	5,6 (-6,67%)	3,2 (-3,03%)
K (cmol kg ⁻¹)	0,20 (-70,59%)	0,33 (-52,86%)	0,23 (-41,03%)	3,42 (+210,91%)	2,50 (-24,92%)	2,75 (-41,24%)	4,93 (+178,53%)
Ca (cmol kg ⁻¹)	5,59 (+20,47%)	6,36 (-4,36%)	6,54 (+11,04%)	3,73 (-15,42%)	3,12 (-35,40%)	3,21 (-47,97%)	3,97 (-5,02%)
Mg (cmol kg ⁻¹)	0,87 (-2,25%)	1,56 (+47,17%)	1,67 (+21,90%)	1,08 (+2,86%)	0,84 (-32,26%)	0,83 (-58,08%)	1,19 (+23,96%)
Al (cmol kg ⁻¹)	0,10 (-66,67%)	0,10 (-50,00%)	0,10 (0,00%)	0,1 (-66,67%)	0,20 (+100,00%)	0,3 (+200,00%)	0,1 (-50,00%)
CIC	13 (0,00%)	17 (+6,25%)	18 (0,00%)	13 (+8,33%)	14 (+7,69%)	16 (-5,88%)	12 (+20,00%)
P (mg kg ⁻¹)	63 (-30,00%)	75 (-38,02%)	75 (-47,18%)	60 (-18,92%)	22 (-80,87%)	45 (-70,39%)	73 (-8,75%)
Fe (mg kg ⁻¹)	252 (+5,00%)	251 (+8,66%)	264 (+60,98%)	680 (+166,67%)	875 (+120,40%)	1079 (+150,35%)	476 (+68,20%)
Mn (mg kg ⁻¹)	19 (0,00%)	21 (+5,00%)	24 (+71,43%)	78 (+254,55%)	76 (+117,14%)	62 (+121,43%)	76 (+171,43%)
Zn (mg kg ⁻¹)	6,20 (+3,33%)	6,10 (-30,68%)	7,40 (-7,50%)	3,3 (-31,25%)	2,8 (-30,00%)	3,8 (-19,15%)	2,9 (-50,85%)
Cu (mg kg ⁻¹)	19,2 (+19,25%)	17,8 (+21,09%)	17,6 (+14,29%)	24,8 (+20,98%)	24,1 (+32,42%)	22,6 (+48,68%)	22,6 (+30,64%)
B (mg kg ⁻¹)	0,38 (+35,71%)	0,25 (+8,70%)	0,32 (-13,51%)	0,84 (+460,00%)	0,61 (+41,86%)	0,97 (+22,78%)	0,92 (+206,67%)
S (mg kg ⁻¹)	8,4 (-33,33%)	6,5 (-71,74%)	16,9 (-29,29%)	17,3 (+2,37%)	23,9 (-51,02%)	30,1 (-41,67%)	24,0 (+40,35%)
Arcilla (%)	9 (-59,09%)	9 (-55,00%)	11 (-45,00%)	9 (-55,00%)	11 (-45,00%)	9 (-55,00%)	9 (-43,75%)
Limo (%)	34 (+21,43%)	33 (+37,50%)	30 (+7,14%)	34 (+30,77%)	30 (+25,00%)	36 (+50,00)	32 (+6,67%)
Arena (%)	57 (+14,00%)	57 (+1,79%)	59 (+13,46%)	57 (+5,56%)	59 (+5,36%)	55 (-1,79%)	59 (+9,26%)
Textura	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.

F.A.: Franco Arenosa.

Continúa...

* Entre paréntesis la variación presentada en cada parámetro del suelo respecto a su valor inicial (antes de la primera aplicación de agua).

...continuación Tabla 26.

Parámetro	FV8	FV9	FV10	FV11	FV12	FV13	FV14	FV15
pH	5,6 (+3,70%)	5,9 (-9,23%)	5,4 (+10,20%)	5,0 (-15,25%)	5,9 (+3,51%)	5,6 (+19,15%)	5,5 (+12,24%)	5,7 (+7,55%)
N (%)	0,22 (+57,14%)	0,24 (+4,35%)	0,25 (+47,06%)	0,25 (+47,06%)	0,24 (+9,09%)	0,18 (-21,74%)	0,14 (-36,36%)	0,20 (-25,93%)
MO (%)	4,9 (+68,97%)	5,3 (+6,00%)	5,5 (+52,78%)	5,7 (+62,86%)	5,5 (+12,24%)	3,8 (-24,00%)	2,7 (-44,90%)	4,2 (-32,26%)
K (cmol kg ⁻¹)	6,25 (+141,31%)	6,05 (+550,54%)	4,37 (+446,25%)	4,62 (+40,43%)	4,96 (+1240%)	0,32 (+39,13%)	0,15 (-46,43%)	0,14 (+16,67%)
Ca (cmol kg ⁻¹)	3,27 (-37,60%)	2,10 (-64,29%)	2,45 (-46,62%)	3,15 (-36,62%)	1,36 (-63,54%)	4,84 (-15,68%)	4,48 (-23,68%)	4,77 (-11,50%)
Mg (cmol kg ⁻¹)	0,94 (-31,88%)	0,75 (-61,54%)	0,71 (-33,64%)	0,98 (-37,18%)	0,65 (-63,28%)	1,36 (-15,00%)	1,29 (-19,88%)	1,59 (+3,92%)
Al (cmol kg ⁻¹)	0,1 (+0,00%)	0,1 (+0,00%)	0,1 (0,00%)	0,1 (0,00%)	0,2 (+100,00%)	0,1 (-50,00%)	0,1 (-50,00%)	0,1 (0,00%)
CIC	14 (+27,27%)	15 (-11,76%)	10 (-16,67%)	14 (+16,67%)	16 (+33,33%)	13 (-18,75%)	11 (-26,67%)	15 (-11,76%)
P (mg kg ⁻¹)	104 (-30,20%)	95 (-45,71)	98 (-35,10%)	115 (-16,06%)	103 (-43,72%)	94 (-37,33%)	68 (-64,95%)	84 (-40,43%)
Fe (mg kg ⁻¹)	798 (+178,05%)	814 (+105,56%)	1007 (+214,69%)	969 (+158,40%)	656 (+0,46%)	264 (-12,29%)	250 (-23,78%)	263 (+64,38%)
Mn (mg kg ⁻¹)	83 (+207,41%)	55 (+96,43%)	62 (+138,46)	51 (+45,71%)	17 (-48,48%)	24 (-7,69%)	16 (-40,74%)	20 (+81,82%)
Zn (mg kg ⁻¹)	3,9 (-36,07%)	2,8 (-37,78%)	5,4 (0,00%)	5,1 (+10,87%)	3,5 (-10,26%)	3,9 (-69,53%)	3,3 (-68,87%)	5,9 (-13,24%)
Cu (mg kg ⁻¹)	23,1 (+17,86%)	20,1 (+24,84%)	27,1 (+39,69%)	22,6 (+10,24%)	23,0 (+16,16%)	19,3 (+14,20%)	22,2 (+27,59%)	16,7 (+36,89%)
B (mg kg ⁻¹)	0,93 (+52,46%)	1,57 (-50,94%)	0,51 (+8,51%)	0,65 (-12,16%)	1,85 (+69,72%)	0,49 (+53,13%)	0,68 (+78,95%)	0,37 (+825,00%)
S (mg kg ⁻¹)	34,2 (+50,00%)	25,8 (-47,88%)	31,1 (+104,61%)	40,1 (+51,89%)	13,2 (-70,73%)	10,4 (-59,38%)	8,5 (-66,00%)	11,1 (-66,47%)
Arcilla (%)	14 (-12,50%)	16 (-11,11%)	16 (0,00%)	12 (-25,00%)	16 (-11,11%)	16 (0,00%)	12 (-25,00%)	12 (-25,00%)
Limo (%)	26 (+18,18%)	22 (-15,38%)	24 (0,00%)	24 (+9,09%)	24 (0,00%)	26 (+13,04%)	28 (+33,33%)	28 (+12,00%)
Arena (%)	60 (-3,23%)	62 (+10,71%)	60 (0,00%)	64 (+3,23%)	60 (+3,45%)	58 (-4,92%)	60 (-4,76%)	60 (+1,69%)
Textura	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.

* Entre paréntesis la variación presentada en cada parámetro del suelo respecto a su valor inicial (antes de la primera aplicación de agua).

De acuerdo con lo condensado en la Tabla 26 se puede resumir:

Al comparar entre la presencia de pasto vetiver o de vegetación natural en filtros verdes regados con agua limpia, se evidencia para la primera aplicación, una clara tendencia a tener un suelo con mayores valores de parámetros químicos como N, MO, Ca, Mg, CIC, entre otros, en los filtros verdes sembrados con el pasto vetiver.

Al comparar el comportamiento del suelo de los filtros verdes sembrados con pasto vetiver y regados con aguas residuales del café, para la primera aplicación, se evidencia un mayor contenido en los parámetros químicos N, MO y K, a medida que la carga orgánica del agua residual aplicada es mayor.

En las Figuras 43 a la 47 se presenta el aspecto de la vegetación de los filtros verdes al final de la primera aplicación.

Segunda aplicación. En la Tabla 27 se presentan los volúmenes retenidos y evapotranspirados, semanalmente, de agua en los filtros verdes experimentales durante la segunda aplicación, que se realizó entre el 16 de junio del 2020 y el 6 de septiembre del 2020, medidos mediante lisimetría de drenaje.

En la Tabla 28 se presentan los resultados del análisis de carga orgánica, expresada como DQO, ST y SST, además de las variables de pH, turbidez y conductividad eléctrica realizados a las aguas aplicadas a los filtros verdes y a los drenados recolectados, durante la segunda aplicación y los porcentajes de eliminación de la carga orgánica.



Figura 43. Aspecto de los filtros verdes 1, 2, 3 al final de la primera aplicación de agua.



Figura 44. Aspecto de los filtros verdes 4, 5, 6 al final de la primera aplicación de agua.

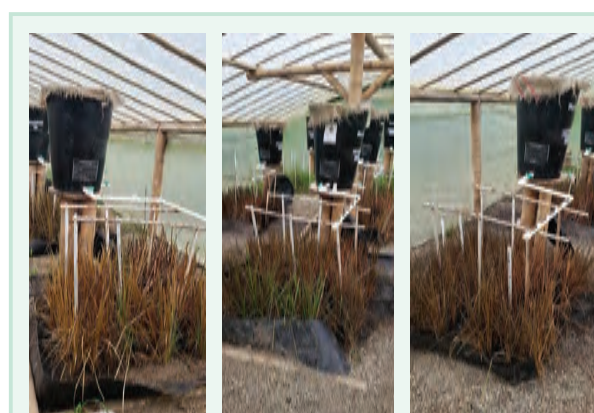


Figura 45. Aspecto de los filtros verdes 7, 8, 9 al final de la primera aplicación de agua.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la segunda aplicación, condensados en las Tablas 27 y 28 se puede resumir lo siguiente:

1. Los menores valores de volumen retenido y evapotranspirado de agua, expresados en $L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$, se presentaron para los filtros verdes (FV) con cargas hidráulicas de 20 mm, siendo de $8,26\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para el FV1 con aplicación de agua limpia y sembrado con pasto vetiver y de $8,34\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para el FV13 con aplicación de agua limpia y con vegetación natural. Los mayores valores de volumen retenido y evapotranspirado de agua se presentaron para los filtros verdes con cargas hidráulicas de 60 mm, siendo de $35,36\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para el FV6 regado con aguas residuales del tanque tina y sembrado con pasto vetiver y de $35,62\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para el FV3 regado con agua limpia y sembrado con pasto vetiver.

2. Al promediar los valores de agua retenida y evapotranspirada, por tipo de agua y tipo de vegetación, se encontró que los valores variaron entre $19,43\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para los FV con aplicación de agua limpia y con vegetación natural y $23,85\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para los FV sembrados



Figura 46. Aspecto de los filtros verdes 10, 11, 12 al final de la primera aplicación de agua.



Figura 47. Aspecto de los filtros verdes 13, 14, 15 al final de la primera aplicación de agua.

con pasto vetiver y regados con aguas residuales del beneficio del café proveniente del tanque tina.

3. En promedio, el volumen retenido y evapotranspirado de agua en la experimentación fue de $21,76\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ (incluyendo todos los FV) y de $22,47\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ (para los FV con aplicación de las diferentes aguas residuales del beneficio del café).

4. El agua limpia utilizada para el beneficio del café y que se utilizó como testigo en los FV, en promedio mostró valores de pH de 6,73, turbidez de 5 FTU, conductividad eléctrica de $0,151\ mS\ cm^{-1}$, DQO de $43\ mg\ L^{-1}$, ST de $170\ mg\ L^{-1}$ y SST de $19\ mg\ L^{-1}$.

5. La DQO del agua residual del beneficio del café utilizada para el riego de los FV varió entre $19.542\ mg\ L^{-1}$ (tanque tina) y $65.917\ mg\ L^{-1}$ (mieles del Ecomill®).

6. El promedio de eliminación de la DQO, ST y SST en los FV con aplicación de aguas provenientes del tanque tina fue de 72,21%, 44,07% y 79,17% respectivamente; para los FV

Tabla 27. Volúmenes retenidos y evapotranspirados de agua. Segunda aplicación.

Filtro verde	Agua semanal (L)	Agua retenida y evapotranspirada (L·m ² ·d ⁻¹)												Promedio por agrupación	
		Semana													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		Promedio por FV
FV1	100	10,29	6,86	6,83	8,57	8,00	6,50	8,86	7,43	8,25	7,50	11,43	8,57	8,26	21,94
FV2	200	14,29	18,43	20,67	24,00	21,88	22,17	25,29	20,43	22,25	22,50	25,71	25,57	21,93	
FV3	300	30,57	32,57	34,50	38,29	34,63	35,17	39,57	32,14	34,88	36,00	40,00	39,14	35,62	12,64
FV4	100	11,14	11,00	12,83	13,86	12,25	12,83	14,00	11,14	12,13	12,83	13,86	13,86	12,64	
FV5	200	18,86	19,71	23,00	25,86	23,13	24,67	27,00	21,71	23,75	23,00	24,57	27,14	23,53	23,85
FV6	300	28,71	29,57	34,17	38,43	34,00	35,67	39,71	31,86	35,25	36,50	40,43	40,00	35,36	
FV7	100	8,14	8,86	9,83	12,00	10,88	11,50	12,71	10,00	11,13	11,00	12,86	12,57	10,96	22,64
FV8	200	22,29	22,00	24,33	24,71	24,00	24,83	25,29	20,00	20,00	20,50	24,00	22,57	22,88	
FV9	300	30,86	30,86	34,33	38,43	33,25	35,17	37,71	28,29	32,50	33,67	36,29	37,57	34,08	8,75
FV10	100	11,00	9,86	6,50	8,71	7,88	8,00	10,00	7,86	8,63	8,33	8,14	10,14	8,75	
FV11	200	17,71	17,71	20,17	22,86	19,00	20,00	22,57	16,57	20,38	21,67	24,57	23,00	20,52	20,94
FV12	300	32,43	32,29	37,67	38,71	29,00	31,67	36,00	28,43	31,88	32,17	36,14	36,14	33,54	
FV13	100	6,43	6,57	7,17	9,00	9,00	7,17	9,86	8,14	8,88	9,50	8,57	9,86	8,34	19,43
FV14	200	20,43	14,71	16,00	20,00	18,38	16,50	20,86	17,43	18,63	16,83	20,00	21,29	18,42	
FV15	300	28,86	26,00	30,00	34,29	31,13	31,17	35,71	28,57	32,00	29,33	35,71	35,57	31,53	21,76
Promedio general														21,76	

Tabla 28. Caracterización de las aguas residuales aplicadas a los filtros verdes y de sus drenados. Segunda aplicación*.

Filtro verde	pH (unidades)		Turbidez (FTU)		Conductividad eléctrica (mS cm ⁻¹)		DQO (mg L ⁻¹)		ST (mg L ⁻¹)		SST (mg L ⁻¹)		Remoción DQO (%) Promedio		Remoción ST (%) Promedio		Remoción SST (%) Promedio	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Por FV	Agrupado	Por FV	Agrupado	Por FV	Agrupado
FV1		5,68		6		0,080		48	114		21		-	-	-	-	-	-
FV2	6,73	5,57	5	17	0,151	0,109	43	62	170	192	19	19	-	-	-	-	-	-
FV3		5,50		10		0,104		53	158		20		-	-	-	-	-	-
FV4		5,45		162		2,924		6.318	3.408		404		67,67	41,20		79,23		
FV5	4,35	5,41	>500	179	4,309	3,042	19.542	4.053	5.796	2.803	1.946	411	79,26	72,21	51,64	44,07	78,86	79,17
FV6		5,21		171		4,000		5.918	3.514		400		69,71	39,37		79,43		
FV7		6,56		>500		6,604		11.858	7.318		355		73,34	42,18		80,90		
FV8	5,24	6,39	>500	>500	8,920	6,986	44.483	17.313	12.656	9.115	1.859	390	61,08	66,20	27,98	35,68	79,00	79,73
FV9		6,04		>500		6,358		15.942	7.989		385		64,16	36,88		79,29		
FV10		6,10		198		4,330		9.492	4.936		338		85,60	46,06		81,64		
FV11	4,18	5,70	>500	>500	4,664	4,882	65.917	17.338	9.150	6.064	1.843	410	73,70	77,50	33,73	35,39	77,76	79,74
FV12		5,70		>500		4,399		17.663	6.737		372		73,20	26,37		79,81		
FV13		5,67		27		0,150		100	679		18		-	-	-	-	-	-
FV14	6,73	5,67	5	26	0,151	0,130	43	69	170	293	19	20	-	-	-	-	-	-
FV15		5,66		15		0,122		48	650		18		-	-	-	-	-	-
Promedio general												71,97	38,38	79,55				

(**) Todos los valores corresponden al promedio de 12 muestras. Entrada (Agua aplicada). Salida (Agua drenada).

regados con lixiviados fue del 66,20%, 35,68% y 79,73%, respectivamente, y para los FV con aplicación de mieles del Ecomill® fue de 77,50%, 35,39% y 79,74%, respectivamente.

Al final del primer período de reposo (inicio de la segunda aplicación de agua), se realizó el muestreo del suelo de los diferentes filtros verdes, para determinar las características físico-químicas del mismo, las cuales se presentan en la Tabla 29, en la cual se resaltan en color verde los parámetros del suelo que presentaron un incremento mayor al 5% con relación a su valor antes de iniciar la primera aplicación, en color amarillo los parámetros del suelo cuya variación no fue superior al 5% respecto a su valor inicial y en color rojo los parámetros del suelo que presentaron una disminución mayor al 5% respecto a su valor inicial.

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 29 (final del primer período de reposo) puede resumirse:

Para los filtros verdes con aplicación de agua limpia, se observa un cambio superior al 5% en los contenidos químicos en el suelo, entre los valores encontrados al final del primer período de reposo respecto a los encontrados al final de la primera aplicación, con incrementos en los contenidos de B y S y decrementos en los contenidos de K, Ca, Fe, Mn y Zn en los filtros verdes sembrados con pasto vetiver e incrementos en los contenidos de S y decremento en los contenidos de Fe, B y CIC en los filtros verdes con vegetación natural.

Para los FV 4, 5, 6 con aplicación de agua residual del café proveniente del tanque tinay sembrados con pasto vetiver, se mantuvo el incremento en los parámetros Fe y Mn y el decremento en los parámetros Ca, y Zn, encontrados al final de la primera aplicación, respecto a su contenido inicial (antes de realizar la aplicación); mientras que los parámetros N, MO, Al y Cu se mantuvieron constantes o presentaron incrementos en algunos de los filtros verdes y parámetros como pH y CIC, se mantuvieron constantes o presentaron decrementos en algunos de los filtros verdes. Al comparar los cambios presentados en el contenido químico en el suelo, entre el final del primer período de reposo y el final de la primera aplicación, se observaron incrementos por encima del 5% en los tres filtros verdes, en los parámetros Al, P y S y decrementos en los parámetros K, Ca, Mg, CIC, Fe, Mn, Cu y B, mientras que parámetros como el N y la MO aumentaron o se mantuvieron constantes en algunos de los filtros. Se evidencia que durante el período de reposo algunos parámetros que incrementaron su contenido en el suelo por la primera aplicación de las aguas residuales del café como el Fe, Mn, Cu y B, empiezan a disminuir su contenido en el suelo, aunque algunos de ellos (Fe, Mn) mantienen su incremento respecto al valor inicial en el suelo, pero en menores porcentajes.

Para los FV 7, 8, 9 con aplicación de agua residual del café proveniente de los lixiviados de la mezcla pulpa + mucílago y sembrados con pasto vetiver se mantuvo el incremento en los parámetros K, Fe y Mn y el decremento en el parámetro Zn, encontrados al final de la primera aplicación, respecto a su contenido inicial; mientras que el Cu se mantuvo constante o presentó

incremento en algunos de los filtros y el Al se mantuvo constante o presentó un decremento en algunos de los filtros. Al comparar los cambios presentados en el contenido químico en el suelo, entre el final del primer período de reposo y el final de la primera aplicación, se observaron incrementos por encima del 5% en los tres filtros verdes, en los parámetros P y S y decrementos en los parámetros K, CIC, Fe, Mn y Cu, mientras que parámetros como el Al y Zn, aumentaron o se mantuvieron constantes en algunos de los filtros.

Para los FV 10, 11, 12 con aplicación de agua residual del café proveniente de la tecnología Ecomill® y sembrados con pasto vetiver se mantuvo el incremento en el parámetro Cu y se presentó incremento en los parámetros CIC, P y Cu y se mantuvo el decremento en los parámetros Ca y Mg, encontrados al final de la primera aplicación, respecto a su contenido inicial; mientras que los parámetros N, MO, Al y S se mantuvieron constantes o presentaron incremento en algunos de los filtros. Al comparar los cambios presentados en el contenido químico en el suelo, entre el final del primer período de reposo y el final de la primera aplicación, se observaron incrementos por encima del 5%, en los tres filtros verdes, en el parámetro P y decrementos en los parámetros K, Fe, Mn y Cu, mientras que parámetros como el Al, aumentó o se mantuvo constantes en algunos de los filtros y parámetros como Ca y Cu se mantuvieron constantes o disminuyeron en algunos de los filtros.

En síntesis, durante el período de reposo disminuyen algunos de los parámetros del suelo de los filtros verdes que se incrementan por efecto de la aplicación de las aguas residuales del café, en particular el K, por su asimilación por parte de la vegetación presente en los filtros.

Al final de la segunda aplicación, se realizó el muestreo del suelo de los diferentes filtros verdes, cuyos resultados se presentan en la Tabla 30, en la cual se resaltan en color verde los parámetros del suelo que presentaron un incremento mayor al 5% con relación a su valor inicial (antes de iniciar la primera aplicación), en color amarillo los parámetros del suelo cuya variación no fue superior al 5% respecto a su valor inicial y en color rojo los parámetros del suelo que presentaron una disminución mayor al 5% respecto a su valor inicial.

De acuerdo con lo condensado en la Tabla 30 se puede resumir:

Al igual, que sucedió al final de la primera aplicación, al comparar entre la presencia de pasto vetiver o de vegetación natural en los filtros verdes regados con agua limpia, se evidencia la tendencia a tener un suelo con mayores contenidos de N, MO, Ca, Mg, CIC, entre otros, en los filtros verdes sembrados con el pasto vetiver.

Al comparar el comportamiento del suelo de los filtros verdes sembrados con pasto vetiver y regados con aguas residuales del café, se evidencia, para la segunda aplicación, un incremento en el valor del pH (que no se había observado al final de la primera aplicación) y para los filtros verdes alimentados con aguas residuales del café con mayores cargas orgánicas (lixiviados y

Tabla 29. Caracterización del suelo de los filtros verdes al inicio de la segunda aplicación*.

Parámetro	FV1	FV2	FV3	FV4	FV5	FV6	FV7
pH	5,5 (+12,24%)	5,2 (+13,04%)	5,8 (+18,37%)	4,8 (+2,13%)	4,4 (-16,98%)	4,6 (-23,33%)	5,9 (+20,41%)
N (%)	0,24 (+14,29%)	0,23 (-8,00%)	0,29 (+20,83%)	0,19 (+5,56%)	0,26 (+44,44%)	0,26 (-3,70%)	0,17 (+6,25%)
MO (%)	5,2 (+15,56%)	5,0 (-10,71%)	6,6 (+22,22%)	4,0 (+5,26%)	5,9 (+59,46%)	5,8 (-3,33%)	3,6 (+9,09%)
K (cmol kg ⁻¹)	0,17 (-75,00%)	0,15 (-78,57%)	0,11 (-71,79%)	2,00 (+81,82%)	2,22 (-33,33)	2,30 (-50,85%)	4,64 (+162,15%)
Ca (cmol kg ⁻¹)	5,02 (+8,19%)	4,27 (-35,79%)	5,97 (+1,36%)	2,99 (-32,20%)	2,30 (-52,38%)	2,59 (-58,02%)	2,77 (-33,73%)
Mg (cmol kg ⁻¹)	0,96 (+7,87%)	1,04 (-1,89%)	3,24 (+136,50%)	0,94 (-10,48%)	0,73 (-41,13)	0,78 (-60,61%)	1,04 (+8,33%)
Al (cmol kg ⁻¹)	0,10 (-66,67%)	0,20 (0,00%)	0,10 (0,00%)	0,3 (0,00%)	0,8 (+700,00%)	0,50 (+400,00%)	0,1 (-50,00%)
CIC	15 (+15,38%)	15 (-6,25%)	16 (-11,11%)	12 (0,00%)	12 (-7,69%)	14 (-17,65%)	11 (+10,00%)
P (mg kg ⁻¹)	93 (+3,33%)	86 (-28,93%)	72 (-49,30%)	81 (+9,46%)	123 (+6,96%)	123 (-19,08%)	139 (+73,75%)
Fe (mg kg ⁻¹)	198 (-17,50%)	205 (-11,26%)	196 (+19,51%)	568 (+122,75%)	812 (+104,53%)	858 (+99,07%)	430 (+51,94%)
Mn (mg kg ⁻¹)	17 (-10,53%)	18 (-10,00%)	22 (+57,14%)	53 (+140,91%)	50 (+42,86%)	49 (+75,00%)	55 (+96,43%)
Zn (mg kg ⁻¹)	5,0 (-16,67%)	4,0 (-54,55%)	7,0 (-12,50%)	3,0 (-37,50%)	3,0 (-25,00%)	4,0 (-14,89%)	3,0 (-49,15%)
Cu (mg kg ⁻¹)	17 (+5,59%)	17 (+15,65%)	17 (+10,39%)	21 (+2,44%)	22 (+20,88%)	20 (+31,58%)	21 (+21,39%)
B (mg kg ⁻¹)	0,45 (+60,71%)	0,62 (+169,57%)	0,61 (+64,86%)	0,60 (+300,00%)	0,39 (-9,30%)	0,51 (-35,44%)	0,63 (+110,00%)
S (mg kg ⁻¹)	26,4 (+109,52%)	16,6 (-27,83%)	28,0 (+17,15%)	18,6 (+10,06%)	43,6 (-10,66%)	33,7 (-34,69%)	64,4 (+276,61%)
Arcilla (%)	15 (-31,82%)	17 (-15,00%)	15 (-25,00%)	15 (-25,00%)	15 (-25,00%)	15 (-25,00%)	13 (-18,75%)
Limo (%)	31 (+10,71%)	31 (+29,17%)	33 (+17,86%)	33 (+26,92%)	33 (+37,50%)	31 (+29,17%)	33 (+10,00%)
Arena (%)	54 (+8,00%)	52 (-7,14%)	52 (0,00%)	52 (-3,70%)	52 (-7,14%)	54 (-3,57%)	54 (0,00%)
Textura	F.A.	F.Ar.A	Fr.Ar.A	F.Ar.A	F.Ar.A	F.A.	F.A.

F.A: Franco Arenosa.

Continúa...

F.Ar.A: Franco Arcillosa Arenosa

* Entre paréntesis la variación presentada en cada parámetro del suelo respecto a su valor inicial (antes de la primera aplicación de agua).

...continuación Tabla 29.

Parámetro	FV8	FV9	FV10	FV11	FV12	FV13	FV14	FV15
pH	5,8 (+7,41%)	5,6 (-13,85%)	5,3 (+8,16%)	5,3 (-10,17%)	4,6 (-19,30%)	5,3 (+12,77%)	5,6 (+14,29%)	5,7 (+7,55%)
N (%)	0,22 (+57,14%)	0,21 (-8,70%)	0,26 (+52,94%)	0,26 (+52,94%)	0,23 (+4,55%)	0,26 (+13,04%)	0,17 (-22,73%)	0,20 (-25,93%)
MO (%)	4,7 (+62,07%)	4,7 (-6,00%)	5,9 (+63,89%)	5,8 (+65,71%)	5,1 (+4,08%)	5,8 (+16,00%)	3,6 (-26,53%)	4,4 (-29,03%)
K (cmol kg ⁻¹)	5,10 (+96,91%)	4,86 (+422,58%)	3,59 (+348,75%)	2,98 (-9,42%)	4,69 (+1168%)	0,31 (+34,78%)	0,15 (-46,43%)	0,17 (+41,67%)
Ca (cmol kg ⁻¹)	2,71 (-48,28%)	2,24 (-61,90%)	2,54 (-44,66%)	2,52 (-49,30%)	1,42 (-61,93%)	5,15 (-10,28%)	4,03 (-31,35%)	3,94 (-26,90%)
Mg (cmol kg ⁻¹)	1,04 (-24,64%)	0,87 (-55,38%)	0,89 (-16,82%)	0,82 (-47,44%)	0,73 (-58,76%)	1,46 (-8,75%)	1,33 (-17,39%)	1,58 (+3,27%)
Al (cmol kg ⁻¹)	0,1 (0,00%)	0,1 (0,00%)	0,1 (0,00%)	0,2 (+100,00%)	0,4 (+300,00%)	0,1 (-50,00%)	0,2 (0,00%)	0,1 (0,00%)
CIC	12 (+9,09%)	12 (-29,41%)	14 (+16,67%)	13 (+8,33%)	13 (+8,33%)	12 (-25,00%)	10 (-33,33%)	13 (-23,53%)
P (mg kg ⁻¹)	155 (+4,03%)	149 (-14,86%)	175 (+15,89%)	165 (+20,44%)	212 (+15,85%)	94 (-37,33%)	89 (-54,12%)	112 (-20,57%)
Fe (mg kg ⁻¹)	603 (+110,10%)	516 (+30,30%)	713 (+122,81%)	684 (+82,40%)	543 (-16,85%)	205 (-31,89%)	189 (-42,38%)	193 (+20,63%)
Mn (mg kg ⁻¹)	50 (+85,19%)	32 (+14,29%)	39 (+50,00%)	35 (0,00%)	16 (-51,52%)	27 (+3,85)	14 (-48,15%)	18 (+63,64%)
Zn (mg kg ⁻¹)	4,0 (-34,43%)	3,0 (-33,33%)	4 (-25,93%)	5,0 (+8,70%)	4,0 (+2,56%)	5,0 (-60,94%)	3,0 (-71,70%)	4,0 (-41,18%)
Cu (mg kg ⁻¹)	20 (+2,04%)	18 (+11,80%)	25 (+28,87%)	22 (+7,32%)	21 (+6,06%)	17 (+0,59%)	22 (+26,44%)	16 (+31,15%)
B (mg kg ⁻¹)	1,08 (+77,05%)	1,05 (-67,19%)	1,12 (+138,30%)	0,65 (-12,16%)	0,85 (-22,02%)	0,45 (+40,63%)	0,35 (-7,89%)	0,25 (+525,00%)
S (mg kg ⁻¹)	74,1 (+225,00%)	52,9 (+6,87%)	44,7 (+194,08%)	33,2 (+25,76%)	43,8 (-2,88%)	30,9 (+20,70%)	32,1 (+28,40%)	22,1 (-33,23%)
Arcilla (%)	11 (-31,25%)	11 (-38,89%)	11 (-31,25%)	11 (-31,25%)	13 (-27,78%)	15 (-6,25%)	11 (-31,25%)	13 (-18,75%)
Limo (%)	29 (+31,82%)	29 (+11,54%)	33 (+37,50%)	29 (+31,82%)	29 (+20,83%)	29 (+26,09%)	31 (+47,62%)	29 (+16,00%)
Arena (%)	60 (-3,23%)	60 (+7,14%)	56 (-6,67%)	60 (-3,23%)	58 (0,00%)	56 (-8,20%)	58 (-7,94%)	57 (-3,39%)
Textura	F.A	F.A	F.A.	F.A.	F.A.	F.A	F.A	F.A.

F.A: Franco Arenosa.

* Entre paréntesis la variación presentada en cada parámetro del suelo respecto a su valor inicial (antes de la primera aplicación de agua).

Tabla 30. Caracterización del suelo de los filtros verdes al final de la segunda aplicación*.

Parámetro	FV1	FV2	FV3	FV4	FV5	FV6	FV7
pH	5,70 (+16,33%)	5,9 (+28,26%)	6,2 (+26,53%)	7,0 (+48,94%)	6,9 (+30,19%)	6,4 (+6,67%)	7,9 (+61,22%)
N (%)	0,24 (+14,29%)	0,27 (+8,00%)	0,32 (+33,33%)	0,18 (0,00%)	0,18 (0,00%)	0,24 (-11,11%)	0,20 (+25,00%)
MO (%)	5,3 (+17,78%)	6,0 (+7,14%)	7,5 (+38,89%)	3,7 (-2,63%)	3,9 (+5,41%)	5,4 (-10,00%)	4,2 (+27,27%)
K (cmol kg ⁻¹)	0,14 (-79,41%)	0,11 (-84,29%)	0,11 (-71,79%)	4,11 (+273,64%)	4,06 (+21,92%)	3,79 (-19,02%)	5,33 (+201,13%)
Ca (cmol kg ⁻¹)	4,46 (-3,88%)	4,53 (-31,88%)	5,76 (-2,21%)	2,75 (-37,64%)	2,28 (-52,80%)	2,37 (-61,59%)	2,17 (-48,09%)
Mg (cmol kg ⁻¹)	1,05 (+17,98%)	1,40 (+32,08%)	3,13 (+128,47%)	1,13 (+7,62%)	0,87 (-29,84%)	0,82 (-58,59%)	0,82 (-14,58%)
Al (cmol kg ⁻¹)	0,2 (-33,33%)	0,1 (-50,00%)	0,1 (0,00%)	0,1 (-66,67%)	0,1 (0,00%)	0,1 (0,00%)	0,1 (-50,00%)
CIC	14 (+7,69%)	15 (-6,25%)	58 (+222,22%)	13 (+8,33%)	12 (-7,69%)	13 (-23,53%)	11 (+10,00%)
P (mg kg ⁻¹)	113 (+25,56%)	74 (-38,84%)	83 (-41,55%)	82 (+10,81%)	69 (-40,00%)	107 (-29,61%)	150 (+87,50%)
Fe (mg kg ⁻¹)	181 (-24,58%)	161 (-30,30%)	179 (+9,15%)	362 (+41,96%)	797 (+100,76%)	725 (+68,21%)	575 (+103,18%)
Mn (mg kg ⁻¹)	16 (-15,79%)	17 (-15,00%)	24 (+71,43%)	71 (+222,73%)	145 (+314,29%)	132 (+371,43%)	109 (+289,29%)
Zn (mg kg ⁻¹)	5,0 (-16,67%)	4,0 (-54,55%)	6,0 (-25,00%)	2,0 (-58,33%)	2,0 (-50,00%)	3,0 (-36,17%)	3,0 (-49,15%)
Cu (mg kg ⁻¹)	16 (-0,62%)	17 (+15,65%)	16 (+3,90%)	20 (-2,44%)	25 (+37,36%)	21 (+38,16%)	25 (+44,51%)
B (mg kg ⁻¹)	0,43 (+53,57%)	0,23 (0,00%)	0,44 (+18,92%)	1,42 (+846,67%)	1,74 (+304,65%)	1,43 (+81,01%)	5,90 (+1867%)
S (mg kg ⁻¹)	7,4 (-41,27%)	9,0 (-60,87%)	7,3 (-69,46%)	40,0 (+136,69%)	49,6 (+1,64%)	36,5 (-29,26%)	12,5 (-26,90%)
Arcilla (%)	15 (-31,82%)	15 (-25,00%)	16 (-20,00%)	15 (-25,00%)	15 (-25,00%)	15 (-25,00%)	11 (-31,25%)
Limo (%)	32 (+14,29%)	32 (+33,33%)	32 (+14,29%)	32 (+23,08%)	32 (+33,33%)	30 (+25,00%)	34 (+13,33%)
Arena (%)	53 (+6,00%)	53 (-5,36%)	53 (+1,92%)	53 (-1,85%)	53 (-5,36%)	55 (-1,79%)	55 (+1,85%)
Textura	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.

F.A: Franco Arenosa.

Continúa...

* Entre paréntesis la variación presentada en cada parámetro del suelo respecto a su valor inicial (antes de la primera aplicación de agua).

...continuación Tabla 30.

Parámetro	FV8	FV9	FV10	FV11	FV12	FV13	FV14	FV15
pH	8,1 (+50,00%)	7,9 (+21,54%)	6,7 (+36,73%)	6,8 (+15,25%)	6,6 (+15,79%)	5,7 (+21,28%)	5,9 (+20,41%)	6,1 (+15,09%)
N (%)	0,24 (+71,43%)	0,26 (+13,04%)	0,27 (+58,82%)	0,26 (+52,94%)	0,25 (+13,64%)	0,25 (+8,70%)	0,22 (0,00%)	0,27 (0,00%)
MO (%)	5,3 (+82,76%)	5,7 (+14,00)	6,1 (+69,44%)	6,0 (+71,43%)	5,7 (+16,33%)	5,5 (+10,00%)	4,9 (0,00%)	6,1 (-1,61%)
K (cmol kg ⁻¹)	6,07 (+134,36%)	5,88 (+532,26%)	4,57 (+471,25%)	4,14 (+25,84%)	4,03 (+989,19%)	0,27 (+17,39%)	0,15 (-46,43%)	0,10 (-16,67%)
Ca (cmol kg ⁻¹)	2,06 (-60,69%)	1,95 (-66,84%)	3,28 (-28,54%)	2,26 (-54,53%)	1,40 (-62,47%)	4,19 (-27,00%)	4,27 (-27,26%)	3,99 (-25,97%)
Mg (cmol kg ⁻¹)	0,97 (-29,71%)	0,97 (-50,26%)	1,15 (+7,48%)	0,92 (-41,03%)	0,73 (-58,76%)	1,33 (-16,88%)	1,45 (-9,94%)	1,89 (+23,53%)
Al (cmol kg ⁻¹)	0,2 (+100,00%)	0,3 (+200,00%)	0,1 (0,00%)	0,1 (0,00%)	0,2 (+100,00%)	0,1 (-50,00%)	0,1 (-50,00%)	0,1 (0,00%)
CIC	12 (+9,09%)	13 (-23,53%)	14 (+16,67%)	13 (+8,33%)	13 (+8,33%)	12 (-25,00%)	12 (-20,00%)	15 (-11,76%)
P (mg kg ⁻¹)	180 (+20,81%)	192 (+9,71%)	148 (-1,99%)	144 (+5,11%)	234 (+27,87%)	83 (-44,67%)	119 (-38,66%)	32 (-77,30%)
Fe (mg kg ⁻¹)	764 (+166,20%)	698 (+76,26%)	692 (+116,25%)	801 (+113,60%)	714 (+9,34%)	210 (-30,23%)	236 (-28,05%)	211 (+31,88%)
Mn (mg kg ⁻¹)	96 (+255,56%)	70 (+150,00%)	99 (+280,77%)	90 (+157,14%)	32 (-3,03%)	27 (+3,85%)	23 (-14,81%)	23 (+109,09%)
Zn (mg kg ⁻¹)	4,0 (-34,43%)	3,0 (-33,33%)	4,0 (-25,93%)	4,0 (-13,04%)	4,0 (+2,56%)	4,0 (-68,75%)	3,0 (-71,70%)	5,0 (-26,47%)
Cu (mg kg ⁻¹)	25 (+27,55%)	21 (+30,43%)	24 (+23,71%)	24 (+17,07%)	25 (+26,26%)	18 (+6,51%)	20 (+14,94%)	15 (+22,95%)
B (mg kg ⁻¹)	13,51 (+2115%)	13,97 (+336,56%)	3,54 (+653,19%)	3,85 (+420,27%)	5,84 (+435,78%)	0,39 (+21,88%)	0,43 (+13,16%)	0,34 (+750,00%)
S (mg kg ⁻¹)	21,0 (-7,89%)	18,9 (-61,82%)	20,4 (+34,21%)	13,8 (-47,73%)	33,7 (-25,28%)	32,3 (+26,17%)	38,5 (+54,00%)	19,5 (-41,09%)
Arcilla (%)	11 (-31,25%)	12 (-33,33%)	14 (-12,50%)	10 (-37,50%)	14 (-22,22%)	12 (-25,00%)	10 (-37,50%)	10 (-37,50%)
Limo (%)	30 (+36,36%)	30 (+15,38%)	28 (+16,67%)	29 (+31,82%)	23 (-4,17%)	29 (+26,09%)	29 (+38,10%)	33 (+32,00%)
Arena (%)	59 (-4,84%)	59 (+5,36%)	59 (-1,67%)	61 (-1,61%)	63 (+8,62%)	59 (-3,28%)	61 (-3,17%)	57 (-3,39%)
Textura	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.	F.A.

F.A: Franco Arenosa.

* Entre paréntesis la variación presentada en cada parámetro del suelo respecto a su valor inicial (antes de la primera aplicación de agua).

mieles del Ecomill®) se evidencia, para todos los filtros verdes, un incremento en los parámetros N, MO, K, Fe, Cu y B, mientras que parámetros como el P y el Mn se mantuvieron constantes o se incrementaron en algunos de los filtros y el parámetro Ca disminuyó en todos los filtros verdes.

Para los filtros verdes sembrados con pasto vetiver, la mayor diferencia en la composición del suelo, entre los filtros con aplicación de agua limpia y aplicación de aguas residuales del beneficio del café, radicó en el contenido de K que es aportado por las aguas residuales del café.

En las Figuras 48 a 52 se presenta el aspecto de los filtros verdes al final de la segunda aplicación.

Tercera aplicación. En la Tabla 31 se presentan los volúmenes retenidos y evapotranspirados, semanalmente, de agua en los filtros verdes experimentales durante la tercera aplicación, que se realizó entre el 7 de diciembre del 2020 y el 7 de marzo del 2021, medidos mediante lisimetría de drenaje.

En la Tabla 32 se presentan los resultados del análisis de carga orgánica, expresada como DQO, ST y SST, además de las variables de pH, turbidez y conductividad eléctrica realizados a las aguas aplicadas a los filtros verdes y a los drenados recolectados, durante la tercera aplicación y los porcentajes de eliminación de la carga orgánica.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la tercera aplicación, condensados en las Tablas 31 y 32 puede resumirse:

1. Los menores valores de volumen retenido y evapotranspirado de agua, expresados en $L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$, se presentaron para los filtros verdes (FV) con cargas hidráulicas de 20 mm, siendo de $8,71\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para el FV13 con aplicación de agua limpia y con vegetación natural y de $8,86\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para el FV1 con aplicación de agua limpia y sembrado con pasto vetiver. Los mayores valores de volumen retenido y evapotranspirado de agua se presentaron para los filtros verdes con carga hidráulica de 60 mm, siendo de $36,27\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para el FV6 regado con aguas residuales del tanque tina y sembrado con pasto vetiver y de $36,21\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para el FV9 regado con lixiviados y sembrado con pasto vetiver.
2. Los valores promedio de agua retenida y evapotranspirada, por tipo de agua y tipo de vegetación, variaron entre $19,89\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para los FV con aplicación de agua limpia y con vegetación natural y $24,35\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ para los FV sembrados con pasto vetiver y regados con aguas residuales del beneficio del café proveniente del tanque tina.
3. En promedio, el volumen retenido y evapotranspirado de agua en la experimentación fue de $22,56\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ (incluyendo todos los FV) y de $23,66\ L\ m^{-2}\cdot d^{-1}$ (para los FV con aplicación de los diferentes tipos de aguas residuales del beneficio del café).
4. En promedio el agua limpia utilizada para el beneficio del café y que se utilizó como testigo en los FV mostró valores de pH de 6,56, turbidez de 6 FTU, conductividad eléctrica de $0,181\ mS\ cm^{-1}$, DQO de $13\ mg\ L^{-1}$, ST de $200\ mg\ L^{-1}$ y SST de $21\ mg\ L^{-1}$.



Figura 48. Aspecto de los filtros verdes 1, 2, 3, al final de la segunda aplicación de agua.



Figura 49. Aspecto de los filtros verdes 4, 5, 6, al final de la segunda aplicación de agua.



Figura 50. Aspecto de los filtros verdes 7, 8, 9, al final de la segunda aplicación de agua.



Figura 51. Aspecto de los filtros verdes 10, 11, 12, al final de la segunda aplicación de agua.



Figura 52. Aspecto de los filtros verdes 13, 14, 15, al final de la segunda aplicación de agua.

Tabla 31. Volúmenes retenidos y evapotranspirados de agua. Tercera aplicación.

Filtro verde	Agua semanal (L)	Agua retenida y evapotranspirada (L m ⁻² ·d ⁻¹)												Promedio por agrupación	
		Semana													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		Promedio por FV
FV1	100	8,00	9,57	5,43	5,71	8,88	10,00	8,71	10,00	9,86	9,86	10,14	10,14	8,86	21,97
FV2	200	20,00	23,86	13,71	14,29	21,50	23,33	24,43	25,14	25,14	25,71	25,14	25,57	22,32	
FV3	300	28,00	38,00	21,86	22,86	33,75	36,67	38,71	39,43	39,29	39,29	39,29	39,57	34,73	
FV4	100	11,40	13,86	8,29	8,29	12,13	13,00	13,71	13,86	13,86	13,86	13,86	13,86	12,50	24,35
FV5	200	21,20	27,00	16,29	16,29	24,00	25,83	27,57	27,57	27,71	27,71	25,00	25,29	24,29	
FV6	300	32,00	40,29	24,00	23,71	35,38	37,67	40,29	40,14	40,43	40,43	40,43	40,43	36,27	
FV7	100	10,20	12,86	7,57	7,14	11,25	12,33	13,00	11,86	9,86	12,43	12,00	11,71	11,02	23,82
FV8	200	23,00	28,00	16,71	16,71	24,50	26,00	27,86	27,86	23,00	24,71	26,43	26,14	24,24	
FV9	300	35,20	42,29	25,29	25,14	36,88	39,17	39,43	41,14	34,00	38,29	37,43	40,29	36,21	
FV10	100	11,40	13,86	8,29	8,14	11,38	12,17	12,43	13,86	13,86	13,57	13,57	12,86	12,11	22,79
FV11	200	20,80	26,14	15,57	15,29	23,25	21,17	23,71	26,43	26,29	23,43	22,43	19,29	21,98	
FV12	300	35,60	42,14	19,57	8,00	29,25	36,33	41,29	41,57	41,43	40,71	37,14	38,29	34,28	
FV13	100	8,80	8,14	4,29	5,29	8,63	10,00	10,00	10,14	9,71	9,86	9,71	10,00	8,71	19,89
FV14	200	16,00	21,29	12,00	12,00	17,63	20,00	20,57	22,86	22,86	21,43	21,14	21,71	19,12	
FV15	300	24,00	34,71	19,43	20,43	30,25	33,33	35,43	37,14	35,57	36,14	39,14	36,43	31,83	
Promedio general												22,56			

Tabla 32. Caracterización de las aguas residuales aplicadas a los filtros verdes y de sus drenados. Tercera aplicación*.

Filtro verde	pH (unidades)		Turbidez (FTU)		Conductividad eléctrica (mS cm ⁻¹)		DQO (mg L ⁻¹)		ST (mg L ⁻¹)		SST (mg L ⁻¹)		Remoción DQO (%) Promedio		Remoción ST (%) Promedio		Remoción SST (%) Promedio		
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Por FV	Agrupado	Por FV	Agrupado	Por FV	Agrupado	
FV1	5,69	5	0,065	79	948	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FV2	6,56	6	0,181	13	207	21	200	207	207	207	30	-	-	-	-	-	-	-	-
FV3	5,41	11	0,118	77	1.021	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FV4	5,14	>500	5,428	7.747	7.136	649	75,46	7.136	7.136	7.136	649	75,46	45,34	45,34	45,34	45,34	45,34	45,34	75,62
FV5	4,17	>500	7,210	31.571	4.747	2.664	13.055	4.747	4.747	2.664	558	91,35	83,99	63,64	57,56	57,56	63,64	57,56	79,04
FV6	6,33	135	4,852	4.686	4.739	601	85,16	4.739	4.739	601	601	85,16	63,70	63,70	63,70	63,70	63,70	63,70	77,45
FV7	6,29	>500	10,503	17.042	13.819	572	73,06	13.819	13.819	572	572	73,06	46,09	46,09	46,09	46,09	46,09	46,09	74,80
FV8	4,40	>500	13,571	63.267	14.224	2.270	25.632	14.224	14.224	2.270	616	69,66	65,08	44,51	39,54	39,54	44,51	39,54	72,86
FV9	5,72	>500	13,837	30.035	18.445	733	52,53	18.445	18.445	733	733	52,53	28,04	28,04	28,04	28,04	28,04	28,04	67,69
FV10	5,50	>500	7,920	17.740	9.830	720	72,52	9.830	9.830	720	720	72,52	58,03	58,03	58,03	58,03	58,03	58,03	81,14
FV11	3,94	>500	7,423	64.550	11.676	3.821	23.423	11.676	11.676	3.821	641	57,86	60,85	50,15	52,54	52,54	50,15	52,54	83,21
FV12	4,61	>500	8,671	30.873	11.846	585	52,17	11.846	11.846	585	585	52,17	49,43	49,43	49,43	49,43	49,43	49,43	84,69
FV13	5,66	25	0,143	90	259	32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FV14	6,56	6	0,181	13	246	21	200	246	246	21	35	-	-	-	-	-	-	-	-
FV15	5,72	6	0,097	41	235	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Promedio general												69,98	49,88	77,39					

(*) Todos los valores corresponden al promedio de 12 muestras. Entrada (Agua aplicada). Salida (Agua drenada).

5. La DQO del agua residual del beneficio del café utilizada para regar los FV varió entre 31.571 mg L⁻¹ (tanque tina) y 64.550 mg L⁻¹ (mieles del Ecomill®).

6. El valor promedio de eliminación de la DQO, ST y SST en los FV regados con aguas provenientes del tanque tina fue de 83,99%, 57,56% y 77,37% respectivamente; para los FV con aplicación de lixiviados fue del 65,08%, 39,54% y 71,78%, respectivamente y para los FV regados con mieles del Ecomill® fue de 60,85%, 52,54% y 83,01%, respectivamente.

Al final del segundo período de reposo (inicio de la tercera aplicación), se realizó el muestreo del suelo de los diferentes filtros verdes, para determinar las características físico-químicas del mismo, las cuales se presentan en la Tabla 33, en la cual se resaltan en color verde los parámetros del suelo que presentaron un incremento mayor al 5% con relación a su valor inicial (antes de iniciar la primera aplicación), en color amarillo los parámetros del suelo cuya variación no fue superior al 5% respecto a su valor inicial y en color rojo los parámetros del suelo que presentaron una disminución mayor al 5% respecto a su valor inicial.

De acuerdo con la información condensada en la Tabla 33 (final del segundo período de reposo) se puede resumir:

Para los FV 1, 2, 3 con aplicación de agua limpia y sembrados con pasto vetiver, se mantuvo el incremento en el parámetro pH (encontrado al final de la primera y segunda aplicación) y se presentó un decremento en el parámetro B en los tres filtros verdes (que para el final del primer período de reposo y final de la segunda aplicación se había presentado incremento).

Para los FV 13, 14, 15 con aplicación de agua limpia y con vegetación natural, se mantuvo el incremento en el parámetro pH (encontrado al final de la primera y segunda aplicación) y los parámetros Ca, CIC, P y Zn mantienen el decremento encontrado al final de la primera y segunda aplicación y del primer período de reposo.

Para estos dos tipos de filtros verdes, regados con agua limpia, se observa un cambio superior al 5% en los contenidos químicos en el suelo, entre el final del segundo período de reposo respecto al final de la segunda aplicación, con incrementos en los contenidos de K, Ca, Zn y S y decrementos en los contenidos de B en los filtros verdes sembrados con pasto vetiver e incrementos en los contenidos de K y decremento en los contenidos de N, MO, y Mn en los filtros verdes con vegetación natural.

Para los FV 4, 5, 6 regados con agua residual del café proveniente del tanque tina y sembrados con pasto vetiver, se mantuvo el incremento en los parámetros Fe y Mn y el decremento en los parámetros Ca, y Zn, encontrados al final de la primera y segunda aplicación y al final del primer período de reposo, respecto a su contenido inicial (antes de realizar la primera aplicación). Al comparar los cambios presentados en el contenido químico en el suelo, entre el final del segundo período de reposo y el final de la segunda aplicación, se observaron incrementos por

encima del 5%, en los tres filtros verdes, en los parámetros N, MO, K, P y Zn y decrementos en los parámetros pH, Mn y B, mientras que parámetros como el Al se mantuvieron constantes en los tres filtros verdes.

Para los FV 7, 8, 9 con aplicación de agua residual del café proveniente de los lixiviados de la mezcla pulpa + mucílago y sembrados con pasto vetiver se mantuvo el incremento en los parámetros K, Fe y Mn, encontrados al final de la primera y segunda aplicación y al final del primer período de reposo, respecto a su contenido inicial. Al comparar los cambios presentados en el contenido químico en el suelo, entre el final del segundo período de reposo y el final de la segunda aplicación, se observaron incrementos por encima del 5%, en los tres filtros verdes, en los parámetros K, Ca, Mg, P y S y decrementos en los parámetros pH, N, MO, Fe, Mn y B.

Para los FV 10, 11, 12 regados con agua residual del café proveniente de la tecnología Ecomill® y sembrados con pasto vetiver se mantuvo el incremento en el parámetro Cu (encontrado al final de la primera y segunda aplicación y al final del primer período de reposo) y se presentó incremento en los parámetros N, MO, K, Al, CIC, P y S, respecto a su contenido inicial; mientras que los parámetros Ca y Mg disminuyeron. Al comparar los cambios presentados en el contenido químico en el suelo, entre el final del segundo período de reposo y el final de la segunda aplicación, se observaron incrementos por encima del 5%, en los tres filtros verdes, en los parámetros K, Al, CIC, P, Zn y S y decrementos en los parámetros pH, Mn y B.

Al final de la tercera aplicación, se realizó el muestreo del suelo de los diferentes filtros verdes, cuyos resultados se presentan en la Tabla 34, en la cual se resaltan en color verde los parámetros del suelo que presentaron un incremento mayor al 5% con relación a su valor inicial (antes de iniciar la primera aplicación), en color amarillo los parámetros del suelo cuya variación no fue superior al 5% respecto a su valor inicial y en color rojo los parámetros del suelo que presentaron una disminución mayor al 5% respecto a su valor inicial.

De acuerdo con la información condensada en la Tabla 34 se puede resumir:

Para los FV con aplicación de agua limpia se presentó un incremento en el pH. Para los FV 4, 5, 6 con aplicación de agua residual del café proveniente del tanque tina y sembrados con pasto vetiver, se presentó un incremento en los parámetros pH (que ya se había observado al final de la segunda aplicación), K, P (que no se habían observado en las alimentaciones anteriores), Fe, Mn, B (que se habían observado en las dos alimentaciones anteriores) y S y un decremento en el parámetro Zn (que se habían observado en las dos alimentaciones anteriores).

Para los FV 7, 8, 9 con aplicación de lixiviados y sembrados con pasto vetiver se presentó un incremento en los parámetros pH, P (que se habían observado al final de la segunda aplicación para los tres filtros verdes), K, Fe, Mn, Cu (que se habían observado al final de las dos alimentaciones

Tabla 33. Caracterización del suelo de los filtros verdes al inicio de la tercera aplicación*.

Parámetro	FV1	FV2	FV3	FV4	FV5	FV6	FV7
pH	5,5 (+12,24%)	5,5 (+19,57%)	5,9 (+20,41%)	5,8 (+23,40%)	5,6 (+5,66%)	5,4 (-10,00%)	7,4 (+51,02%)
N (%)	0,21 (0,00%)	0,24 (-4,00%)	0,32 (+33,33%)	0,21 (+16,67%)	0,20 (+11,11%)	0,26 (-3,70%)	0,16 (0,00%)
MO (%)	4,6 (+2,22%)	5,3 (-5,36%)	7,4 (+37,04%)	4,6 (+21,05%)	4,3 (+16,22%)	5,8 (-3,33%)	3,2 (-3,03%)
K (cmol kg ⁻¹)	0,46 (-32,35%)	0,38 (-45,71%)	0,51 (+30,77%)	5,10 (+363,64%)	5,40 (+62,16%)	7,30 (+55,98%)	16,83 (+850,85%)
Ca (cmol kg ⁻¹)	5,40 (+16,38%)	4,83 (-27,37%)	6,99 (+18,68%)	2,94 (-33,33%)	2,16 (-55,28%)	3,03 (-50,89%)	3,04 (-27,27%)
Mg (cmol kg ⁻¹)	1,09 (+22,47%)	1,24 (+16,98%)	3,23 (+135,77%)	0,99 (-5,71%)	0,70 (-43,55%)	1,13 (-42,93%)	1,05 (+9,38%)
Al (cmol kg ⁻¹)	0,1 (-66,67%)	0,1 (-50,00%)	0,1 (0,00%)	0,1 (-66,67%)	0,1 (0,00%)	0,1 (0,00%)	0,1 (-50,00%)
CIC	13 (0,00%)	15 (-6,25%)	18 (0,00%)	13 (+8,33%)	12 (-7,69%)	15 (-11,76%)	12 (+20,00%)
P (mg kg ⁻¹)	90 (0,00%)	87 (-28,10%)	95 (-33,10%)	135 (+82,43%)	297 (+158,26%)	205 (+34,87%)	198 (+147,50%)
Fe (mg kg ⁻¹)	183 (-23,75%)	191 (-17,32%)	198 (+20,73%)	454 (+78,04%)	788 (+98,49%)	1036 (+140,37%)	535 (+89,05%)
Mn (mg kg ⁻¹)	13 (-31,58%)	15 (-25,00%)	23 (+64,29%)	51 (+131,82%)	47 (+34,29%)	35 (+25,00%)	63 (+125,00%)
Zn (mg kg ⁻¹)	5,8 (-3,33%)	4,7 (-46,59%)	9,3 (+16,25%)	3,4 (-29,17%)	2,8 (-30,00%)	3,5 (-25,53%)	3,2 (-45,76%)
Cu (mg kg ⁻¹)	15,5 (-3,73%)	17,3 (+17,69%)	16,5 (+7,14%)	19,3 (-5,85%)	21,8 (+19,78%)	19,0 (+25,00%)	21,6 (+24,86%)
B (mg kg ⁻¹)	0,07 (-75,00%)	0,03 (-86,96%)	0,21 (-43,24%)	0,63 (+320,00%)	0,37 (-13,95%)	0,58 (-26,58%)	2,13 (+610,00%)
S (mg kg ⁻¹)	21,8 (+73,02%)	17,2 (-25,22%)	27,7 (+15,90%)	36,9 (+118,34%)	49,6 (+1,64%)	46,8 (-9,30%)	28,7 (+67,84%)
Arcilla (%)	10 (-54,55%)	14 (-30,00%)	12 (-40,00%)	12 (-40,00%)	12 (-40,00%)	12 (-40,00%)	12 (-25,00%)
Limo (%)	28 (0,00%)	29 (+20,83%)	31 (+10,71%)	31 (+19,23%)	29 (+20,83%)	31 (+29,17%)	28 (-6,67%)
Arena (%)	62 (+24,00%)	57 (+1,79%)	57 (+9,62%)	57 (+5,56%)	59 (+5,36%)	57 (+1,79%)	59 (+9,26%)
Textura	F.A	F.A	F.A	F.A	F.A	F.A	F.A

F.A: Franco Arenosa

Continúa...

* Entre paréntesis la variación presentada en cada parámetro del suelo respecto a su valor inicial (antes de la primera aplicación de agua).

...continuación Tabla 33.

Parámetro	FV8	FV9	FV10	FV11	FV12	FV13	FV14	FV15
pH	7,0 (+29,63%)	6,3 (-3,08%)	4,8 (-2,04%)	5,0 (-15,25%)	4,4 (-22,81%)	5,6 (+19,15%)	5,7 (+16,33%)	6,0 (+13,21%)
N (%)	0,21 (+50,00%)	0,23 (0,00%)	0,24 (+41,18%)	0,29 (+70,59%)	0,25 (+13,64%)	0,22 (-4,35%)	0,19 (-13,64%)	0,24 (-11,11%)
MO (%)	4,5 (+55,17%)	5,0 (0,00%)	5,4 (+50,00%)	6,7 (+91,43%)	5,5 (+12,24%)	4,7 (-6,00%)	4,1 (-16,33%)	5,3 (-14,52%)
K (cmol kg ⁻¹)	15,84 (+511,58%)	12,55 (+1249%)	6,15 (+668,75%)	6,90 (+109,73%)	7,75 (+1995%)	0,71 (+208,70%)	0,46 (+64,29%)	0,39 (+225,00%)
Ca (cmol kg ⁻¹)	2,46 (-53,05%)	2,69 (-54,25%)	2,49 (-45,75%)	2,68 (-46,08%)	2,21 (-40,75%)	5,64 (-1,74%)	4,25 (-27,60%)	4,59 (-14,84%)
Mg (cmol kg ⁻¹)	1,05 (-23,91%)	1,22 (-37,44%)	0,87 (-18,69%)	1,10 (-29,49%)	1,06 (-40,11%)	1,91 (+19,38%)	1,36 (-15,53%)	2,21 (+44,44%)
Al (cmol kg ⁻¹)	0,1 (0,00%)	0,1 (0,00%)	0,2 (+100,00%)	0,2 (+100,00%)	0,5 (+400,00%)	0,1 (-50,00%)	0,1 (-50,00%)	0,1 (0,00%)
CIC	12 (+9,09%)	14 (-17,65%)	15 (+25,00%)	15 (+25,00%)	15 (+25,00%)	13 (-18,75%)	10 (-33,33%)	13 (-23,53%)
P (mg kg ⁻¹)	254 (+70,47%)	452 (+158,29%)	248 (+64,24%)	350 (+155,47%)	819 (+347,54%)	79 (-47,33%)	105 (-45,88%)	140 (-0,71%)
Fe (mg kg ⁻¹)	553 (+92,68%)	648 (+63,64%)	1109 (+246,56%)	973 (+159,47%)	639 (-2,14%)	189 (-37,21%)	222 (-32,32%)	207 (+29,38%)
Mn (mg kg ⁻¹)	39 (+44,44%)	29 (+3,57%)	30 (+15,38%)	27 (-22,86%)	19 (-42,42%)	23 (-11,54%)	17 (-37,04%)	19 (+72,73%)
Zn (mg kg ⁻¹)	4,2 (-31,15%)	5,5 (+22,22%)	5,4 (0,00%)	8,4 (+82,51%)	6,8 (+74,36%)	5,1 (-60,16%)	4,2 (-60,38%)	5,0 (-26,47%)
Cu (mg kg ⁻¹)	20,5 (+4,59%)	20,1 (+24,84%)	23,6 (+21,65%)	22,3 (+8,78%)	21,8 (+10,10%)	15,7 (-7,10%)	20,6 (+18,39%)	16,4 (+34,43%)
B (mg kg ⁻¹)	8,54 (+1300%)	2,81 (-12,19%)	0,79 (+68,09%)	0,77 (+4,05%)	0,92 (-15,60%)	0,07 (-78,13%)	0,22 (-42,11%)	0,11 (+175,00%)
S (mg kg ⁻¹)	27,4 (+20,18%)	59,2 (+19,60%)	59,7 (+292,76%)	53,8 (+103,79%)	53,2 (+17,96%)	35,5 (+38,67%)	19,7 (-21,20%)	12,5 (-62,24%)
Arcilla (%)	11 (-31,25%)	8 (-55,56%)	10 (-37,50%)	8 (-50,00%)	10 (-44,44%)	12 (-25,00%)	10 (-37,50%)	10 (-37,50%)
Limo (%)	27 (+22,73%)	27 (+3,85%)	27 (+12,50%)	25 (+13,64%)	29 (+20,83%)	29 (+26,09%)	27 (+28,57%)	29 (+16,00%)
Arena (%)	63 (+1,61%)	65 (+16,07%)	63 (+5,00%)	67 (+8,06%)	61 (+5,17%)	59 (-3,28%)	63 (0,00%)	61 (+3,39%)
Textura	F.A	F.A	F.A	F.A	F.A	F.A	F.A	F.A

F.A: Franco Arenosa

* Entre paréntesis la variación presentada en cada parámetro del suelo respecto a su valor inicial (antes de la primera aplicación de agua).

Tabla 34. Caracterización del suelo de los filtros verdes al final de la tercera aplicación*.

Parámetro	FV1	FV2	FV3	FV4	FV5	FV6	FV7
pH	5,7 (+16,33%)	5,8 (+26,09%)	6,1 (+24,49%)	6,2 (+31,91%)	7,2 (+35,85%)	6,4 (+6,67%)	9,2 (+87,76%)
N (%)	0,22 (+4,76%)	0,23 (-8,00%)	0,32 (+33,33%)	0,23 (+27,78%)	0,20 (+11,11%)	0,26 (-3,70%)	0,18 (+12,50%)
MO (%)	4,8 (+6,67%)	5,0 (-10,71%)	7,6 (+40,74%)	5,1 (+34,21%)	4,3 (+16,22%)	5,9 (-1,67%)	3,7 (+12,12%)
K (cmol kg ⁻¹)	0,39 (-42,65%)	0,42 (-40,00%)	0,42 (+7,69%)	9,78 (+789,09%)	13,35 (+300,90%)	14,04 (+200,00%)	32,86 (+1757%)
Ca (cmol kg ⁻¹)	4,89 (+5,39%)	5,13 (-22,86%)	6,57 (+11,54%)	4,20 (-4,76%)	4,23 (-12,42%)	3,20 (-48,14%)	2,63 (-37,08%)
Mg (cmol kg ⁻¹)	1,04 (+16,85%)	1,51 (+42,45%)	3,21 (+134,31%)	1,31 (+24,76%)	1,32 (+6,45%)	1,15 (-41,92%)	1,28 (+33,33%)
Al (cmol kg ⁻¹)	0,1 (-66,67%)	0,1 (-50,00%)	0,1 (0,00%)	0,1 (-66,67%)	0,1 (0,00%)	0,1 (0,00%)	0,1 (-50,00%)
CIC	14 (+7,69%)	14 (-12,50%)	18 (0,00%)	13 (+8,33%)	12 (-7,69%)	15 (-11,76%)	13 (+30,00%)
P (mg kg ⁻¹)	84 (-6,67%)	75 (-38,02%)	82 (-42,25%)	134 (+81,08%)	252 (+119,13%)	198 (+30,26%)	375 (+368,75%)
Fe (mg kg ⁻¹)	175 (-27,08%)	188 (-18,61%)	163 (-0,61%)	556 (+118,04%)	1068 (+169,02%)	1149 (+166,59%)	741 (+161,84%)
Mn (mg kg ⁻¹)	11 (-42,11%)	16 (-20,00%)	18 (+28,57%)	61 (+177,27%)	67 (+91,43%)	67 (+139,29%)	85 (+203,57%)
Zn (mg kg ⁻¹)	4,9 (-18,33%)	4,3 (-51,14%)	7,3 (-8,75%)	3,2 (-33,33%)	2,7 (-32,50%)	3,7 (-21,28%)	4,5 (-23,73%)
Cu (mg kg ⁻¹)	16,4 (+1,86%)	16,7 (+13,61%)	14,1 (-8,44%)	20,5 (0,00%)	21,5 (+18,13%)	21,3 (+40,13%)	21,2 (+22,54%)
B (mg kg ⁻¹)	0,11 (-60,71%)	0,20 (-13,04%)	0,22 (-40,54%)	0,75 (+400,00%)	2,38 (+453,49%)	1,38 (+74,68%)	18,90 (+6200%)
S (mg kg ⁻¹)	12,0 (-4,76%)	14,5 (-36,96%)	16,9 (-29,29%)	50,6 (+199,41%)	77,1 (+57,99%)	68,4 (+32,56%)	73,6 (+330,41%)
Arcilla (%)	14 (-36,36%)	14 (-30,00%)	12 (-40,00%)	14 (-30,00%)	10 (-50,00%)	12 (-40,00%)	8 (-50,00%)
Limo (%)	28 (0,00%)	30 (+25,00%)	32 (+14,29%)	28 (+7,69%)	30 (+25,00%)	30 (+25,00%)	28 (-6,67%)
Arena (%)	58 (+16,00%)	56 (0,00%)	56 (+7,69%)	58 (+7,41%)	60 (+7,14%)	58 (+3,57%)	64 (+18,52%)
Textura	F.A	F.A	F.A	F.A	F.A	F.A	F.A

F.A: Franco Arenosa

Continúa...

* Entre paréntesis la variación presentada en cada parámetro del suelo respecto a su valor inicial (antes de la primera aplicación de agua).

...continuación Tabla 34.

Parámetro	FV8	FV9	FV10	FV11	FV12	FV13	FV14	FV15
pH	8,9 (+64,81%)	8,2 (+26,15%)	6,3 (+28,57%)	6,5 (+10,17%)	5,7 (0,00%)	5,8 (+23,40%)	6,2 (+26,53%)	6,4 (+20,75%)
N (%)	0,19 (+35,71%)	0,20 (-13,04%)	0,27 (+58,82%)	0,24 (+41,18%)	0,25 (+13,64%)	0,22 (-4,35%)	0,25 (+13,64%)	0,23 (-14,81%)
MO (%)	4,2 (+44,83%)	4,4 (-12,00%)	6,0 (+66,67%)	5,3 (+51,43%)	5,6 (+14,29%)	4,8 (-4,00%)	5,6 (+14,29%)	5,1 (-17,74%)
K (cmol kg ⁻¹)	31,14 (+1102%)	15,28 (+1543%)	12,95 (+1519%)	8,23 (+150,15%)	10,33 (+2692%)	0,63 (+173,91%)	0,44 (+57,14%)	0,32 (+166,67%)
Ca (cmol kg ⁻¹)	2,08 (-60,31%)	1,09 (-81,46%)	2,98 (-35,08%)	1,87 (-62,37%)	1,78 (-52,28%)	4,30 (-25,09%)	5,27 (-10,22%)	3,15 (-41,56%)
Mg (cmol kg ⁻¹)	1,06 (-23,19%)	0,55 (-71,79%)	1,25 (+16,82%)	0,69 (-55,77%)	0,90 (-49,15%)	1,31 (-18,13%)	1,93 (+19,88%)	1,53 (0,00%)
Al (cmol kg ⁻¹)	0,1 (0,00%)	0,1 (0,00%)	0,1 (0,00%)	0,1 (0,00%)	0,1 (0,00%)	0,1 (-50,00%)	0,1 (-50,00%)	0,1 (0,00%)
CIC	13 (+18,18%)	12 (-29,41%)	15 (+25,00%)	12 (0,00%)	12 (0,00%)	13 (-18,75%)	13 (-13,33%)	12 (-29,41%)
P (mg kg ⁻¹)	365 (+144,97%)	548 (+213,14%)	297 (+96,69%)	346 (+152,55%)	449 (+145,36%)	86 (-42,67%)	139 (-28,35%)	130 (-7,80%)
Fe (mg kg ⁻¹)	798 (+178,05%)	713 (+80,05%)	791 (+147,19%)	1143 (+204,80%)	1114 (+70,60%)	214 (-28,90%)	297 (-9,45%)	203 (+26,88%)
Mn (mg kg ⁻¹)	68 (+151,85%)	39 (+39,29%)	58 (+123,08%)	56 (+60,00%)	34 (+3,03%)	28 (+7,69%)	25 (-7,41%)	18 (+63,64%)
Zn (mg kg ⁻¹)	4,1 (-32,79%)	3,8 (-15,56%)	5,0 (-7,41%)	4,9 (+6,52%)	5,3 (+35,90%)	4,7 (-63,28%)	5,0 (-52,83%)	4,1 (-39,71%)
Cu (mg kg ⁻¹)	21,5 (+9,69%)	19,3 (+19,88%)	22,9 (+18,04%)	20,7 (+0,98%)	21,5 (+8,59%)	18,1 (+7,10%)	17,9 (+2,87%)	14,1 (+15,57%)
B (mg kg ⁻¹)	15,27 (+2403%)	17,32 (+441,25%)	1,72 (+265,96%)	2,17 (+193,24%)	1,06 (-2,75%)	0,08 (-75,00%)	0,64 (+68,42%)	0,03 (-25,00%)
S (mg kg ⁻¹)	78,1 (+242,54%)	30,0 (-39,39%)	50,9 (+234,87%)	61,2 (+131,82%)	70,4 (+56,10%)	19,7 (-23,05%)	21,0 (-16,00%)	11,4 (-65,56%)
Arcilla (%)	8 (-50,00%)	8 (-55,56%)	10 (-37,50%)	8 (-50,00%)	8 (-55,56%)	12 (-25,00%)	10 (-37,50%)	10 (-37,50%)
Limo (%)	26 (+18,18%)	24 (-7,69%)	26 (+8,33%)	27 (+22,73%)	28 (+16,67%)	28 (+21,74%)	30 (+42,86%)	27 (+8,00%)
Arena (%)	66 (+6,45%)	68 (+21,43%)	64 (+6,67%)	66 (+6,45%)	64 (+10,34%)	60 (-1,64%)	60 (-4,76%)	63 (+6,78%)
Textura	F.A	F.A	F.A	F.A	F.A	F.A	F.A	F.A

F.A: Franco Arenosa

* Entre paréntesis la variación presentada en cada parámetro del suelo respecto a su valor inicial (antes de la primera aplicación de agua).

anteriores) y B (que se había observado al final de la segunda aplicación) y un decremento en los parámetros Ca y Zn (que se habían observado al final de las dos alimentaciones anteriores). Para los FV 10, 11, 12 regados con agua residual del café proveniente de la tecnología Ecomill® y sembrados con pasto vetiver se presentó un incremento en los parámetros N, MO, K (que se habían observado al final de las dos alimentaciones anteriores), P, Fe, y S y un decremento en el parámetro Ca (que se habían observado al final de las dos alimentaciones anteriores), mientras que los parámetros pH, Al, CIC, Mn, Cu y B se mantuvieron constantes o presentaron incremento en algunos de los filtros.

En las Figuras 53 a 57 se presenta el aspecto de los filtros verdes al final de la tercera aplicación.

Tercer período de reposo. Una vez terminada la tercera aplicación, se dejaron los filtros verdes en reposo durante 3 meses. En la Tabla 35 se presentan los resultados de la caracterización

Cambios acumulados en los parámetros químicos del suelo de filtros verdes sembrados con pasto vetiver después de recibir tres aplicaciones de aguas residuales del café a diferentes cargas hidráulicas, durante 36 semanas, en un período de tiempo de 18 meses (23 de septiembre del 2019 al 7 de marzo del 2021).

La aplicación de las aguas residuales del café sobre filtros verdes sembrados con pasto vetiver permitió incrementar el valor del pH en ocho de los nueve filtros verdes evaluados (89%). Para el FV12 operando con una carga hidráulica de 60 mm de aguas residuales provenientes de la tecnología Ecomill® no se presentó cambio en el valor del pH del suelo después de recibir las tres aplicaciones. Los incrementos en el valor del pH del suelo variaron entre 6,67% (FV6) y 87,76% (FV7) con un valor promedio de incremento del 32,43%.

La aplicación de las aguas residuales del café sobre filtros verdes sembrados con pasto vetiver permitió incrementar el valor de la materia orgánica del suelo en siete de los nueve filtros verdes evaluados (78%). Para el FV9 operando con una carga hidráulica de 60 mm de lixiviados provenientes de la mezcla pulpa + mucílago, se presentó una disminución de la materia orgánica inicial en un valor del 12,00% y para el FV6 operando con una carga hidráulica de 60 mm de aguas - mieles provenientes de la tecnología tanque tina se presentó una disminución de la materia orgánica inicial en un valor del 1,67% después de recibir las tres aplicaciones. Los incrementos en el valor de la materia orgánica del suelo variaron entre 12,12% (FV7) y 66,67% (FV10) con un valor promedio de incremento del 25,12%.

Respecto al cambio en los macronutrientes del suelo: N, P, K, se observó el siguiente comportamiento:

La aplicación de las aguas residuales del café sobre filtros verdes sembrados con pasto vetiver permitió incrementar el valor del N del suelo en siete de los nueve filtros verdes evaluados (78%). Para el FV9 se presentó una disminución del N inicial en un 13,04% y para el FV6 la disminución del N inicial fue de 3,70% después de recibir las tres aplicaciones. Los incrementos en el valor del N del suelo variaron entre 11,11% (FV5) y 58,82% (FV10) con un valor promedio de incremento del 20,44%. El contenido de K se incrementó en el 100% de los FV por efecto de la aplicación de las aguas residuales del café y sus incrementos variaron entre 150,15% (FV11) y 2.692% (FV12), con un valor promedio de incremento del 1.117%. El contenido de P también se incrementó por efecto de la aplicación de las aguas residuales en el 100% de los FV y sus incrementos variaron entre 30,26% (FV6) y 368,75% (FV7), con un valor promedio de incremento del 150,21%.

El Fe y Mn se incrementaron en el 100% de los filtros verdes en los cuales se aplicaron las aguas residuales del café. El Cu, B y S se incrementaron en ocho de los nueve FV (89%). Para el Cu, el FV4 no mostró variación respecto a su contenido inicial; para el B, el FV12 mostró una disminución del 2,75% respecto a su contenido inicial y para el caso del S, el FV9 mostró una disminución del 39,39% respecto a su contenido inicial.

Al comparar el efecto de la aplicación de las aguas residuales del café al suelo de los filtros verdes sembrados con pasto vetiver respecto a aquellos regados con agua limpia, se observa que el suelo de los FV regados con agua limpia mostraron una disminución (en todos ellos) en los parámetros P, Fe, B y S. Para el caso del K se observó disminución en dos de los tres FV y para el caso de la materia orgánica y del N se observó disminución en uno de los tres filtros verdes, respecto a sus contenidos iniciales.

química de los suelos de los filtros verdes durante el período de reposo, en la cual se resaltan en color verde los parámetros del suelo que presentaron un incremento mayor al 5% con relación a su valor inicial (antes de iniciar la primera aplicación), en color amarillo los parámetros del suelo cuya variación no fue superior al 5% respecto a su valor inicial y en color rojo los parámetros del suelo que presentaron una disminución mayor al 5% respecto a su valor inicial. De acuerdo con la información condensada en la Tabla 35 (final del tercer período de reposo) se puede resumir:

Para los FV 1, 2, 3 con aplicación de agua limpia y sembrados con pasto vetiver, se mantuvo el incremento en el parámetro pH (encontrado al final de todas las alimentaciones) y se observó un incremento en el parámetro Mg y un decremento en los parámetros K y Zn Al comparar los cambios presentados en el contenido químico en el suelo, entre el final del tercer período de reposo y el final de la tercera aplicación, se observaron incrementos por encima del 5%, en los tres filtros verdes, en el parámetro B y decremento en el parámetro K.

Para los FV 13, 14, 15 con aplicación de agua limpia y con vegetación natural, se mantuvo el incremento en el parámetro pH (encontrado al final de todas las alimentaciones) y se observó un incremento en los parámetros K y Cu y un decremento en los parámetros N, MO, CIC, P, Zn y S. Al comparar los cambios presentados en el contenido químico en el suelo, entre el final

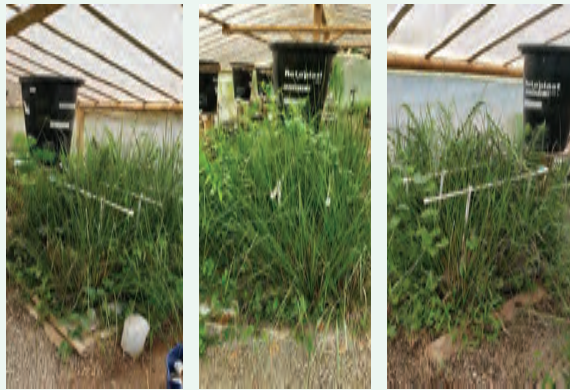


Figura 53. Aspecto de los filtros verdes 1, 2, 3 al final de la tercera aplicación de agua.



Figura 54. Aspecto de los filtros verdes 4, 5, 6 al final de la tercera aplicación de agua.



Figura 55. Aspecto de los filtros verdes 7, 8, 9 al final de la tercera aplicación de agua.



Figura 56. Aspecto de los filtros verdes 10, 11, 12 al final de la tercera aplicación de agua.

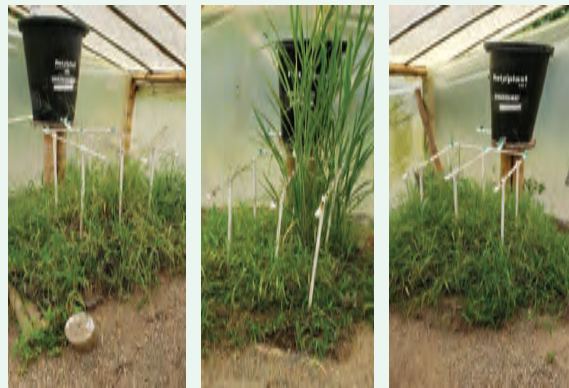


Figura 57. Aspecto de los filtros verdes 13, 14, 15 al final de la tercera aplicación de agua.

del tercer período de reposo y el final de la tercera aplicación, se observaron incrementos por encima del 5%, en los tres filtros verdes, en el parámetro Cu y decremento en los parámetros P y S.

Para los FV 4, 5, 6 con aplicación de agua residual del café proveniente del tanque tina y sembrados con pasto vetiver, se observó que los parámetros N y MO se mantuvieron constantes o incrementaron su valor en algunos de los filtros verdes, respecto a su contenido inicial (antes de realizar la primera aplicación) y que el parámetro Ca disminuyó en los tres filtros verdes, respecto a su valor inicial. Al comparar los cambios presentados en el contenido químico en el suelo, entre el final del tercer período de reposo y el final de la tercera aplicación, se observaron decrementos por encima del 5%, en los tres filtros verdes, en los parámetros Ca, Mg y P.

Para los FV 7, 8, 9 regados con lixiviados y sembrados con pasto vetiver se mantuvo el incremento en los parámetros K, Fe (encontrados al final de las tres alimentaciones), respecto a su contenido inicial y se observó un incremento en los parámetros P, Cu, B y S y un decremento en el parámetro Ca. Al comparar los cambios presentados en el contenido químico en el suelo, entre el final del tercer período de reposo y el final de la tercera aplicación, se observaron incrementos por encima del 5%, en los tres filtros verdes, en los parámetros P y Cu y decrementos en los parámetros pH, Mn y B.

Para los FV 10, 11, 12 regados con mieles provenientes de la tecnología Ecomill® y sembrados con pasto vetiver se mantuvo el incremento en el parámetro Cu (encontrado al final de las tres alimentaciones) y se presentó incremento en los parámetros K, CIC, P, Fe, Cu y B, respecto a su contenido inicial; mientras que los parámetros Ca, Mg y Mn disminuyeron. Al comparar los cambios presentados en el contenido químico en el suelo, entre el final del tercer período de reposo y el final de la tercera aplicación, se observaron incrementos por encima del 5%, en los tres filtros verdes, en los parámetros K, CIC, P, y Cu y decrementos en los parámetros pH, Fe y Mn.

En las Figuras 58 a 62 se presenta el aspecto de los filtros verdes 3 meses después de la tercera aplicación.

En las Figuras 63 a 67 se presenta el aspecto de los filtros verdes, un año después de la tercera aplicación de agua. Para el caso de los FV del 7 al 12 se realizó la resiembra (para reemplazar el pasto vetiver marchito) en el mismo suelo que recibió las aplicaciones de agua residual durante 36 semanas.

Valores promedio de los tres períodos de aplicación de agua

Volúmenes retenidos y evapotranspirados de agua en los filtros verdes, calculados por lisimetría de drenaje. En la Tabla 36 se presentan los volúmenes promedio retenidos y

Tabla 35. Caracterización del suelo de los filtros verdes al final del tercer período de reposo*.

Parámetro	FV1	FV2	FV3	FV4	FV5	FV6	FV7
pH	5,9 (+20,41%)	6,0 (+30,43%)	6,1 (+24,49%)	6,4 (+36,17%)	5,5 (+3,77%)	5,0 (-16,67%)	7,0 (+42,86%)
N (%)	0,49 (+133,33%)	0,23 (-8,00%)	0,54 (+125,00%)	0,19 (+5,56%)	0,18 (0,00%)	0,41 (+51,85%)	0,15 (-6,25%)
MO (%)	12,8 (+184,44%)	5,0 (-10,71%)	14,6 (+170,37%)	4,0 (+5,26%)	3,7 (0,00%)	10,1 (+68,33%)	3,1 (-6,06%)
K (cmol kg ⁻¹)	0,05 (-92,65%)	0,04 (-94,29%)	0,04 (-89,74%)	13,41 (+1119%)	12,19 (+266,07%)	0,51 (-89,10%)	23,90 (+1250%)
Ca (cmol kg ⁻¹)	5,52 (+18,97%)	5,12 (-23,01%)	5,68 (-3,57%)	3,40 (-22,90%)	2,04 (-57,76%)	2,58 (-58,18%)	2,48 (-40,67%)
Mg (cmol kg ⁻¹)	1,38 (+55,06%)	1,77 (+66,98%)	2,77 (+102,19%)	1,21 (+15,24%)	0,65 (-47,58%)	0,43 (-78,28%)	1,04 (+8,33%)
Al (cmol kg ⁻¹)	0,1 (-66,67%)	0,1 (-50,00%)	0,1 (0,00%)	0,1 (-66,67%)	0,1 (0,00%)	0,4 (+300,00%)	0,1 (-50,00%)
CIC	14 (+7,69%)	12 (-25,00%)	18 (0,00%)	12 (0,00%)	11 (-15,38%)	23 (+35,29%)	13 (+30,00%)
P (mg kg ⁻¹)	118 (+31,11%)	67 (-44,63%)	80 (-43,66%)	103 (+39,19%)	123 (+6,96%)	1 (-99,34%)	398 (+397,50%)
Fe (mg kg ⁻¹)	181 (-24,58%)	184 (-20,35%)	199 (+21,34%)	500 (+96,08%)	1115 (+180,86%)	107 (-75,17%)	972 (+243,46%)
Mn (mg kg ⁻¹)	13 (-31,58%)	16 (-20,00%)	20 (+42,86%)	66 (+200,00%)	51 (+45,71%)	18 (-35,71%)	68 (+142,86%)
Zn (mg kg ⁻¹)	4,1 (-31,67%)	2,8 (-68,18%)	6,0 (-25,00%)	2,2 (-54,17%)	2,0 (-50,00%)	6,3 (+34,04%)	3,0 (-49,15%)
Cu (mg kg ⁻¹)	16,7 (+3,73%)	18,8 (+27,89%)	17,2 (+11,69%)	22,4 (+9,27%)	25,3 (+39,01%)	3,6 (-76,32%)	25,4 (+46,82%)
B (mg kg ⁻¹)	0,28 (0,00%)	0,24 (+4,35%)	0,28 (-24,32%)	0,77 (+413,33%)	0,86 (+100,00%)	0,10 (-87,34%)	2,79 (+830,00%)
S (mg kg ⁻¹)	14,1 (+11,90%)	13,9 (-39,57%)	0,9 (-96,23%)	52,3 (+209,47%)	62,6 (+28,28%)	12,9 (-75,00%)	74,6 (+336,26%)
Arcilla (%)	15 (-31,82%)	15 (-25,00%)	15 (-25,00%)	17 (-15,00%)	17 (-15,00%)	17 (-15,00%)	13 (-18,75%)
Limo (%)	26 (-7,14%)	26 (+8,33%)	28 (0,00%)	28 (+7,69%)	28 (+16,67%)	24 (0,00%)	27 (-10,00%)
Arena (%)	60 (+20,00%)	60 (+7,14%)	58 (+11,54%)	55 (+1,85%)	55 (-1,79%)	60 (+7,14%)	60 (+11,11%)
Textura	F.A	F.A	F.A	F.A	F.A	F.A	F.A

F.A: Franco Arenosa

Continúa...

* Entre paréntesis la variación presentada en cada parámetro del suelo respecto a su valor inicial (antes de la primera aplicación de agua).

...continuación Tabla 35.

Parámetro	FV8	FV9	FV10	FV11	FV12	FV13	FV14	FV15
pH	6,5 (+20,37%)	6,1 (-6,15%)	4,8 (-2,04%)	4,9 (-16,95%)	5,3 (-7,02%)	5,7 (+21,28%)	5,9 (+20,41%)	6,2 (+16,98%)
N (%)	0,23 (+64,29%)	0,52 (+126,09%)	0,23 (+35,29%)	0,56 (+229,41%)	0,23 (+4,55%)	0,19 (-17,39%)	0,20 (-9,09%)	0,23 (-14,81%)
MO (%)	5,2 (+79,31%)	13,8 (+176,00%)	5,1 (+41,67%)	15,5 (+342,86%)	5,1 (+4,08%)	4,1 (-18,00%)	4,2 (-14,29%)	5,0 (-19,35%)
K (cmol kg ⁻¹)	24,52 (+846,72%)	21,14 (+2173%)	19,73 (+2366%)	23,27 (+607,29%)	21,00 (+5576%)	0,27 (+17,39%)	5,80 (+1971%)	0,54 (+350,00%)
Ca (cmol kg ⁻¹)	2,91 (-44,47%)	2,14 (-63,61%)	1,94 (-57,73%)	2,08 (-58,15%)	1,69 (-54,69%)	5,23 (-8,89%)	4,48 (-23,68%)	5,46 (+1,30%)
Mg (cmol kg ⁻¹)	1,30 (-5,80%)	0,91 (-53,33%)	0,83 (-22,43%)	0,79 (-49,36%)	0,87 (-50,85%)	1,68 (+5,00%)	1,57 (-2,48%)	2,58 (+68,63%)
Al (cmol kg ⁻¹)	0,1 (0,00%)	0,1 (0,00%)	0,2 (+100,00%)	0,2 (+100,00%)	0,1 (0,00%)	0,1 (-50,00%)	0,1 (-50,00%)	0,1 (0,00%)
CIC	12 (+9,09%)	16 (-5,88%)	16 (+33,33%)	17 (+41,67%)	15 (+25,00%)	10 (-37,50%)	11 (-26,67%)	15 (-11,76%)
P (mg kg ⁻¹)	663 (+344,97%)	780 (+345,71%)	962 (+537,09%)	861 (+528,47%)	707 (+286,34%)	76 (-49,33%)	85 (-56,19%)	119 (-15,60%)
Fe (mg kg ⁻¹)	855 (+197,91%)	667 (+68,43%)	672 (+110,00%)	678 (+80,80%)	690 (+5,67%)	236 (-21,59%)	268 (-18,29%)	249 (+55,63%)
Mn (mg kg ⁻¹)	42 (+55,56%)	26 (-7,14%)	19 (-26,92%)	19 (-45,71%)	22 (-33,33%)	24 (-7,69%)	19 (-29,63%)	21 (+90,91%)
Zn (mg kg ⁻¹)	5,2 (-14,75%)	4,7 (+4,44%)	5,4 (0,00%)	5,5 (+19,57%)	4,8 (+23,08%)	3,1 (-75,78%)	2,2 (-79,25%)	4,1 (-39,71%)
Cu (mg kg ⁻¹)	23,5 (+19,90%)	20,6 (+27,95%)	26,0 (+34,02%)	23,1 (+12,68%)	23,2 (+17,17%)	20,6 (+21,89%)	20,7 (+18,97%)	18,1 (+48,36%)
B (mg kg ⁻¹)	4,38 (+618,03%)	4,95 (+54,69%)	1,97 (+319,15%)	1,51 (+104,05%)	2,96 (+171,56%)	0,29 (-9,38%)	0,19 (-50,00%)	0,14 (+250,00%)
S (mg kg ⁻¹)	72,3 (+217,11%)	63,8 (+28,89%)	82,8 (+444,74%)	79,6 (+201,52%)	1,2 (-97,34%)	1,4 (-94,53%)	4,6 (-81,60%)	7,8 (-76,44%)
Arcilla (%)	13 (-18,75%)	13 (-27,78%)	13 (-18,75%)	13 (-18,75%)	13 (-27,78%)	13 (-18,75%)	15 (-6,25%)	15 (-6,25%)
Limo (%)	26 (+18,18%)	24 (-7,69%)	24 (0,00%)	22 (0,00%)	26 (+8,33%)	24 (+4,35%)	27 (+28,57%)	27 (+8,00%)
Arena (%)	62 (0,00%)	64 (+14,29%)	64 (+6,67%)	66 (+6,45%)	62 (+6,90%)	64 (+4,92%)	58 (-7,94%)	58 (-1,69%)
Textura	F.A	F.A	F.A	F.A.	F.A	F.A	F.A	F.A

F.A: Franco Arenosa

* Entre paréntesis la variación presentada en cada parámetro del suelo respecto a su valor inicial (antes de la primera aplicación de agua).

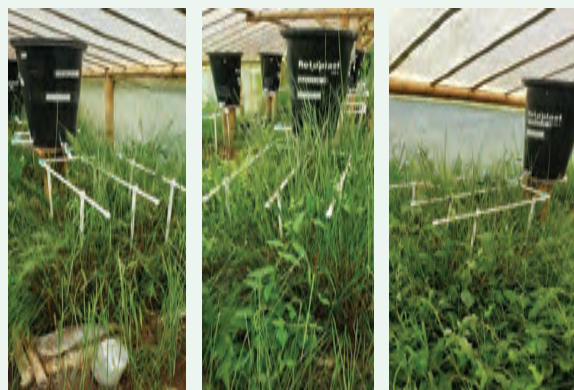


Figura 58. Aspecto de los filtros verdes 1, 2, 3, al final del tercer período de reposo.

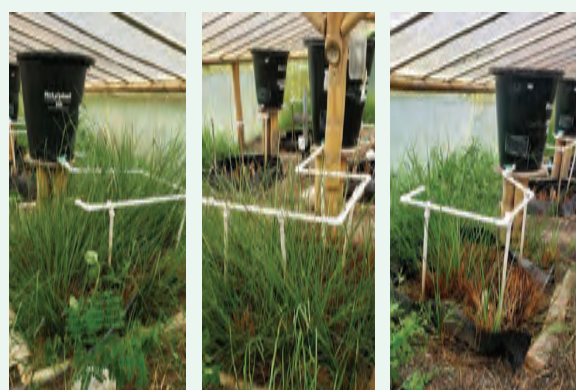


Figura 59. Aspecto de los filtros verdes 4, 5, 6, al final del tercer período de reposo.



Figura 60. Aspecto de los filtros verdes 7, 8, 9, al final del tercer período de reposo.



Figura 61. Aspecto de los filtros verdes 10, 11, 12, al final del tercer período de reposo.

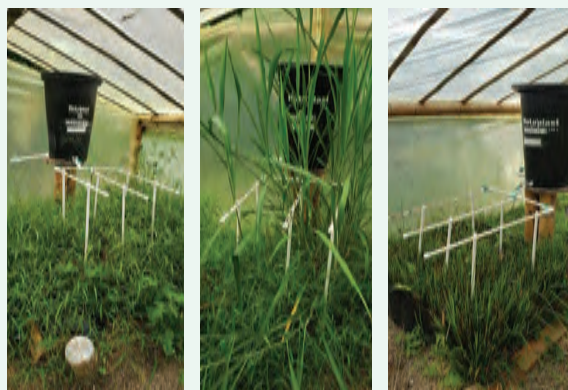


Figura 62. Aspecto de los filtros verdes 13, 14, 15, al final del tercer período de reposo.

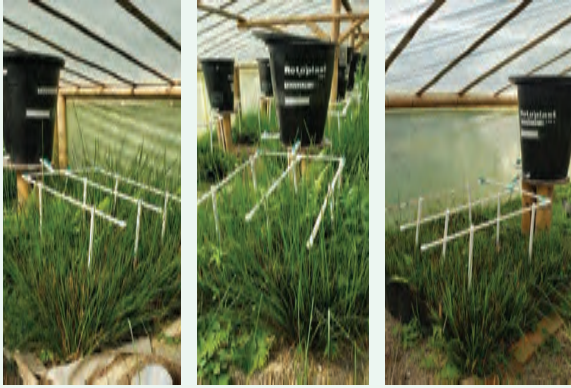


Figura 63. Aspecto de los filtros verdes 1, 2, 3, un año después de la tercera aplicación de agua.

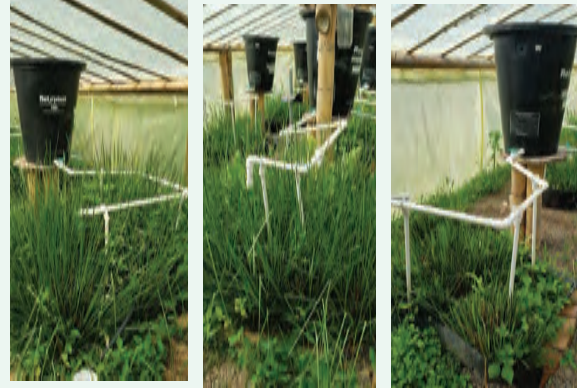


Figura 64. Aspecto de los filtros verdes 4, 5, 6, un año después de la tercera aplicación de agua.

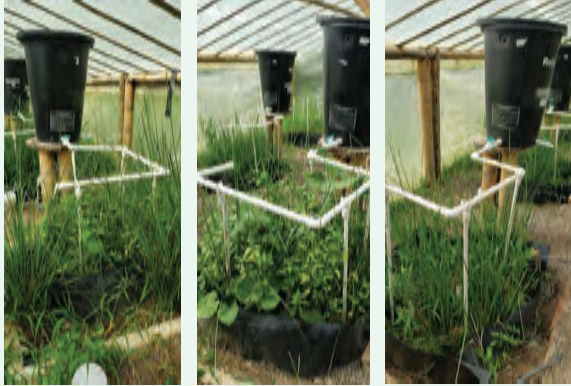


Figura 65. Aspecto de los filtros verdes 7, 8, 9, un año después de la tercera aplicación de agua.

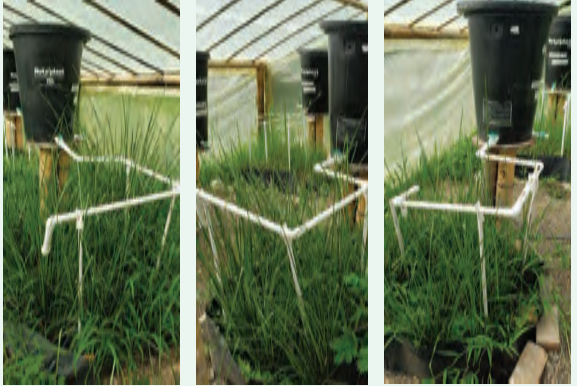


Figura 66. Aspecto de los filtros verdes 10, 11, 12, un año después de la tercera aplicación de agua.

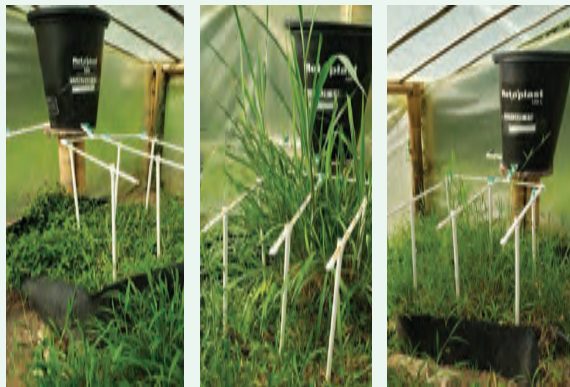


Figura 67. Aspecto de los filtros verdes 13, 14, 15, un año después de la tercera aplicación de agua.

evapotranspirados de agua en los filtros verdes para las tres aplicaciones realizadas, durante 36 semanas, entre el 23 de septiembre del 2019 y el 7 de marzo del 2021.

De acuerdo con los resultados condensados en la Tabla 36, se puede resumir:

- 1.** Los menores valores de volumen retenido y evapotranspirado de agua, expresados en $L m^{-2} \cdot d^{-1}$, se presentaron para los filtros verdes (FV) con cargas hidráulicas de 20 mm, siendo de $8,67 L m^{-2} \cdot d^{-1}$ para el FV13 con aplicación de agua limpia y con vegetación natural y de $9,02 L m^{-2} \cdot d^{-1}$ para el FV1 con aplicación de agua limpia y sembrado con pasto vetiver. Los mayores valores de volumen retenido y evapotranspirado de agua se presentaron para los filtros verdes con cargas hidráulicas de 60 mm, siendo de $36,29 L m^{-2} \cdot d^{-1}$ para el FV6 regado con aguas residuales del tanque tina y sembrado con pasto vetiver y de $35,89 L m^{-2} \cdot d^{-1}$ para el FV9 regado con lixiviados y sembrado con pasto vetiver.
- 2.** Los valores promedio de agua retenida y evapotranspirada, por tipo de agua y tipo de vegetación, variaron entre $20,65 L m^{-2} \cdot d^{-1}$ para los FV con aplicación de agua limpia y con vegetación natural y $24,48 L m^{-2} \cdot d^{-1}$ para los FV sembrados con pasto vetiver y regados con aguas residuales del beneficio del café proveniente del tanque tina.
- 3.** En promedio, el volumen retenido y evapotranspirado de agua en la experimentación fue de $22,72 L m^{-2} \cdot d^{-1}$ (incluyendo todos los FV). Para los FV sembrados con pasto vetiver (con aplicaciones de agua limpia y aguas residuales del café) el volumen promedio de agua retenida y evapotranspirada fue de $23,23 L m^{-2} \cdot d^{-1}$ y para los FV sembrados con pasto vetiver y con aplicaciones de las diferentes aguas residuales del beneficio del café fue de $23,55 L m^{-2} \cdot d^{-1}$.

Eficiencia de remoción de contaminación por parte de los filtros verdes. En la Tabla 37 se presentan los resultados promedio del análisis de carga orgánica, expresada como DQO, ST y SST, además de las variables de pH, turbidez y conductividad eléctrica realizados a las aguas alimentadas a los filtros verdes y a los drenados recolectados, durante las tres aplicaciones y los porcentajes de eliminación de la carga orgánica.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación, se encontró, para filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana, sembrados con pasto vetiver y con aplicación de aguas residuales provenientes del proceso de beneficio del café, un valor de retención - evapotranspiración (RET) de $23,55 L m^{-2} \cdot d^{-1}$.

De acuerdo con los resultados condensados en la Tabla 37 puede resumirse:

Tabla 36. Volúmenes retenidos y evapotranspirados de agua. Promedio de tres aplicaciones.

Filtro verde	Agua semanal (L)	Agua retenida y evapotranspirada (L m ² -d ⁻¹)				
		Promedio Aplicación 1	Promedio Aplicación 2	Promedio Aplicación 3	Promedio Tres aplicaciones	Promedio agrupado
FV1	100	9,93	8,26	8,86	9,02	22,27
FV2	200	23,44	21,93	22,32	22,56	
FV3	300	35,38	35,62	34,73	35,24	
FV4	100	13,11	12,64	12,50	12,75	24,48
FV5	200	25,37	23,53	24,29	24,40	
FV6	300	37,25	35,36	36,27	36,29	
FV7	100	11,06	10,96	11,02	11,01	23,78
FV8	200	26,16	22,88	24,24	24,43	
FV9	300	37,39	34,08	36,21	35,89	
FV10	100	12,66	8,75	12,11	11,17	22,40
FV11	200	22,94	20,52	21,98	21,81	
FV12	300	34,81	33,54	34,28	34,21	
FV13	100	8,95	8,34	8,71	8,67	20,65
FV14	200	24,25	18,42	19,12	20,60	
FV15	300	34,72	31,53	31,83	32,69	
Promedio general					22,72	

1. En promedio el agua limpia utilizada para el beneficio del café y que se utilizó como testigo en los FV mostró valores de pH de 6,66, turbidez de 12 FTU, conductividad eléctrica de 0,174 mS cm⁻¹, DQO de 96 mg L⁻¹, ST de 208 mg L⁻¹ y SST de 20 mg L⁻¹.

2. En promedio, las aguas residuales del café aplicadas a los filtros verdes presentaron valores de pH en el rango entre 3,94 (mieles del Ecomill®) y 4,41 (lixiviados de la mezcla pulpa + mucílago de café), valores de turbidez > a 500 FTU, valores de conductividad eléctrica en el rango entre 4,95 mS cm⁻¹ (aguas residuales provenientes del tanque tina) y 10,64 mS cm⁻¹ (lixiviados), valores de carga orgánica, expresada como DQO, en el rango entre 27.832 mg L⁻¹ (aguas residuales provenientes del tanque tina) y 68.774 mg L⁻¹ (mieles del Ecomill®), valores de ST en el rango entre 8.646 mg L⁻¹ (aguas residuales provenientes del tanque tina) y 23.483 mg L⁻¹ (lixiviados) y valores de SST en el rango entre 1.947 mg L⁻¹ (aguas residuales provenientes del tanque tina) y 4.528 mg L⁻¹ (mieles del Ecomill®).

3. El valor promedio de eliminación de la DQO, ST y SST en los FV regados con aguas provenientes del tanque tina fue de 77,90%, 54,55% y 76,30% respectivamente; para los FV con aplicación de lixiviados fue del 63,17%, 40,20% y 80,05%, respectivamente, y para los FV regados con mieles del Ecomill® fue de 67,28%, 48,00% y 85,42,% respectivamente.

4. En promedio, se determinó un valor experimental de eliminación de la contaminación orgánica por parte de los filtros verdes sembrados con pasto vetiver, para las distintas aguas

Tabla 37. Caracterización de las aguas residuales alimentadas a los filtros verdes y de sus drenados. Promedio de tres aplicaciones* .

Filtro verde	pH (unidades)		Turbidez (FTU)		Conductividad eléctrica (ms cm ⁻¹)		DQO (mg L ⁻¹)		ST (mg L ⁻¹)		SST (mg L ⁻¹)		Remoción DQO (%)		Remoción ST (%)		Remoción SST (%)		
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Por FV	Agrupado	Por FV	Agrupado	Por FV	Agrupado	
FV1	5,63	27	0,072	145	442	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FV2	6,66	38	0,174	136	250	43	208	20	43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FV3	5,44	12	0,123	183	479	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FV4	5,14	209	3,446	7159	4320	460	73,41	50,81	460	73,41	50,81	76,08	50,81	76,08	50,81	76,08	76,08	76,08	76,08
FV5	4,09	>500	4,946	4747	3528	432	8,646	1,947	432	82,53	77,90	77,07	57,49	54,55	57,49	77,07	75,76	75,76	76,30
FV6	5,57	199	3,777	5860	3626	455	-	-	455	77,78	-	75,76	55,34	55,34	55,34	75,76	75,76	75,76	75,76
FV7	5,74	>500	8,262	20881	11764	555	-	-	555	69,71	-	80,75	48,08	48,08	48,08	80,75	80,75	80,75	80,75
FV8	4,41	>500	10,64	25431	14562	552	23,483	3,206	552	62,26	63,17	80,01	36,41	40,20	36,41	80,01	80,01	80,01	80,05
FV9	5,32	>500	9,560	28614	14880	534	-	-	534	57,55	-	79,38	36,10	36,10	36,10	79,38	79,38	79,38	79,38
FV10	5,33	>500	5,770	15264	7038	552	-	-	552	77,88	-	85,08	59,08	59,08	59,08	85,08	85,08	85,08	85,08
FV11	3,94	>500	6,428	24136	9696	534	18,735	4,528	534	64,94	67,28	84,67	45,29	48,00	45,29	84,67	84,67	84,67	85,42
FV12	4,91	>500	6,793	28393	10678	450	-	-	450	59,02	-	86,51	39,63	39,63	39,63	86,51	86,51	86,51	86,51
FV13	5,55	69	0,153	278	482	52	-	-	52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FV14	6,66	53	0,174	266	330	46	208	20	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FV15	5,62	25	0,112	153	376	27	-	-	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Promedio general												69,45	47,58	80,59					

(*) Todos los valores corresponden al promedio de 36 muestras. Entrada (Agua aplicada). Salida (Agua drenada).

residuales del café aplicadas, del 69,45% para la DQO, del 47,58% para los ST y del 80,59% para los SST.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación, se obtuvieron unas eficiencias de remoción del orden del 69,45% para la Demanda Química de Oxígeno, del 47,58% para los Sólidos Totales y del 80,59% para los Sólidos Suspendidos Totales, en filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana y sembrados con pasto vetiver, cuando se aplicaron aguas residuales del beneficio del café con una carga contaminante mayor a 27.000 mg L⁻¹, expresada como DQO.

Volúmenes de agua retenidos por el suelo de los filtros verdes. El volumen de agua retenido en el suelo de los 15 FV experimentales, varió en función de las propiedades físicas del mismo y de su contenido de humedad en el campo. En la Tabla 38 se presentan los valores iniciales (antes de la aplicación del agua) de las propiedades físicas del suelo evaluadas.

De acuerdo con los datos de las propiedades físicas iniciales del suelo de los filtros verdes presentada en la Tabla 38 se puede resumir:

La densidad aparente del suelo (relación entre la masa del suelo seco y el volumen total del mismo), presentó un valor promedio, para los 15 FV, de 1,245 g mL⁻¹, variando entre 1,056 g mL⁻¹ (FV1) y 1,474 g mL⁻¹ (FV9).

La densidad real (relación entre la masa del suelo seco y el volumen, sin poros, del mismo), presentó un valor promedio de 2,622 g mL⁻¹, variando entre 2,538 g mL⁻¹ (FV1) y 2,673 g mL⁻¹ (FV6).

La porosidad (volumen de suelo no ocupado por sólidos), presentó un valor promedio de 52,55%, variando entre 44,76% (FV9) y 58,38% (FV1).

La capacidad de campo (cantidad de agua que contiene un suelo saturado), expresada como humedad volumétrica (volumen de agua contenido en 100 unidades de volumen del suelo), presentó un valor promedio de 46,43%, variando entre 42,78% (FV9) y 50,32% (FV1).

El punto de marchitez permanente (cantidad de agua en el suelo no disponible para las plantas) expresado como humedad volumétrica, presentó un valor promedio de 22,70%, variando entre 21,19% (FV9) y 25,67% (FV2).

Tabla 38. Características físicas iniciales del suelo de los filtros verdes (antes de la aplicación de agua).

Filtro	Densidad (g mL ⁻¹)		Porosidad (%)	Humedad gravimétrica (%)		Humedad volumétrica (%)	
	Aparente	Real		Capacidad de campo	Punto de marchitez	Capacidad de campo	Punto de marchitez
FV1	1,056	2,538	58,38	47,64	21,79	50,32	23,02
FV2	1,428	2,656	46,23	30,88	17,97	44,10	25,67
FV3	1,140	2,578	55,79	43,79	21,09	49,91	24,04
FV4	1,326	2,621	49,40	33,33	17,97	44,21	23,83
FV5	1,297	2,652	51,11	34,33	16,42	44,51	21,29
FV6	1,319	2,673	50,65	34,05	17,14	44,92	22,61
FV7	1,116	2,615	57,31	44,71	19,53	49,91	21,80
FV8	1,175	2,601	54,81	39,69	18,46	46,65	21,70
FV9	1,474	2,668	44,76	29,03	14,37	42,78	21,19
FV10	1,278	2,625	51,30	34,82	16,81	44,51	21,49
FV11	1,314	2,641	50,25	34,81	16,20	45,73	21,29
FV12	1,149	2,589	55,62	41,40	19,95	47,57	22,92
FV13	1,143	2,611	56,23	42,87	20,86	48,99	23,83
FV14	1,332	2,649	49,70	33,26	16,90	44,31	22,51
FV15	1,134	2,618	56,70	42,32	20,58	47,98	23,33

La capacidad de campo, expresada como humedad gravimétrica (volumen de agua contenido en 100 g de suelo seco), presentó un valor promedio de 37,79%, variando entre 29,03% (FV9) y 47,64% (FV1).

El punto de marchitez permanente, expresado como humedad gravimétrica, presentó un valor promedio de 18,40%, variando entre 14,37% (FV9) y 21,79% (FV1).

En la Tabla 39 se presentan los valores de la humedad del suelo de los filtros verdes al inicio de cada período de aplicación y su capacidad de retención de agua.

De acuerdo con los datos de la humedad del suelo, al inicio de cada período de aplicación, presentada en la Tabla 39 se puede resumir:

La humedad de campo (humedad de las muestras frescas de suelo), expresada como humedad volumétrica (volumen de agua contenido en 100 unidades de volumen del suelo), presentó un valor promedio para el suelo de los 15 FV de 37,13% al inicio de la primera aplicación de agua, variando entre 28,47% (FV9) y 47,93% (FV1). Para el inicio de la segunda aplicación, el valor promedio fue de 25,35%, variando entre 12,50% (FV10) y 42,30% (FV11). Finalmente, para el inicio de la tercera aplicación, el valor promedio fue de 32,61%, variando entre 12,70% (FV3) y 44,60% (FV8).

Tabla 39. Humedad del suelo al inicio de las aplicaciones y su capacidad de retención de agua.

Filtro	Humedad de campo al inicio de las aplicaciones (%)			Volumen de agua retenido por el filtro verde al final de la aplicación (L)			Volumen promedio retenido (L)	
	Aplicación 1	Aplicación 2	Aplicación 3	Aplicación 1	Aplicación 2	Aplicación 3	Tres aplicaciones	
							Todos los filtros verdes	Filtros con vetiver
FV1	47,93	25,00	24,70	14,35	25,32	25,62	21,76	21,76
FV2	29,24	35,20	31,90	89,17	8,90	12,20	36,76	36,76
FV3	41,20	40,80	12,70	52,28	9,11	37,21	32,87	32,87
FV4	30,80	19,90	30,30	80,45	24,31	13,91	39,55	39,55
FV5	32,91	24,80	33,00	69,59	19,71	11,51	33,60	33,60
FV6	33,51	13,80	37,90	68,44	31,12	7,02	35,53	35,53
FV7	43,89	23,40	37,80	36,14	26,51	12,11	24,92	24,92
FV8	40,99	29,90	44,60	33,98	16,75	2,05	17,59	17,59
FV9	28,47	12,90	41,90	85,85	29,88	0,88	38,87	38,87
FV10	34,26	12,50	36,40	61,50	32,01	8,11	33,87	33,87
FV11	34,11	42,30	41,40	69,76	3,43	4,33	25,84	25,84
FV12	40,25	34,80	39,10	43,92	12,77	8,47	21,72	21,72
FV13	43,76	26,70	23,80	31,40	22,29	25,19	26,30	
FV14	34,33	24,10	25,90	59,89	20,21	18,41	32,84	—
FV15	41,24	14,20	27,70	40,41	33,78	20,28	31,49	
Promedio	37,13	25,35	32,61	55,81	21,07	13,82	30,23	30,24
Máximo	47,93	42,30	44,60	89,17	33,78	37,21	39,55	39,55
Mínimo	28,47	12,50	12,70	14,35	3,43	0,88	17,59	17,59

La capacidad de retención de agua del suelo de los filtros verdes, hasta llegar a capacidad de campo, presentó un valor promedio para las tres aplicaciones, en los 15 FV, de 30,23 L, variando entre 17,59 L (FV8) y 39,55 L (FV4). Para los filtros verdes sembrados con pasto vetiver y con aplicación de los diferentes tipos de agua, el valor promedio de agua retenida fue de 30,24 L y para los filtros verdes sembrados con pasto vetiver y con aplicación de los diferentes tipos de aguas residuales del café, el valor promedio fue de 30,17 L.

Dado que la aplicación de las aguas se realizó, para cada período, durante 12 semanas (84 días), el agua residual de café retenida en el suelo de los filtros verdes alcanzó el valor de 0,36 mm d⁻¹.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación, se encontró para filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana, sembrados con pasto vetiver y con aplicación de aguas residuales provenientes del proceso de beneficio del café un valor de retención de agua por parte del suelo de los filtros verdes de $0,36 \text{ L m}^2\text{-d}^{-1}$.

Tasas de evapotranspiración (ET) de los filtros verdes. Todos los filtros verdes estuvieron instrumentados mediante la incorporación de sensores Decagon 5TE ubicados en el centro del filtro verde, a 30 cm de profundidad, que permitían generar cada 15 minutos información relacionada con el contenido de humedad del suelo, su temperatura y su conductividad eléctrica, la cual se almacenó en tres datalogger a los cuales estuvieron conectadas las sondas (cinco sondas por datalogger) y que permitieron obtener información de los 15 filtros verdes.

Periódicamente, se realizó la descarga de los datos de los datalogger a un computador portátil al cual se le instaló el software del fabricante para facilitar esta labor (Figura 68).

Una vez descargados los datos, se realizó su corrección utilizando la **Ecuación <3>** de calibración obtenida experimentalmente y que correspondió a:

$$\text{Valores de humedad ajustados} = 0,0977 + 3 \times 10^{-4} \times (\text{datos sin ajustar registrados por el sensor}) \text{ <3>}$$



Figura 68. Aspecto de la descarga de datos almacenados en los datalogger.

A los valores corregidos de humedad del suelo de cada filtro verde se les restó el valor de la capacidad de campo del mismo (Tabla 38), y se tuvieron en cuenta sólo los valores positivos. Luego se calculó la pérdida de humedad, cada 15 minutos, mediante la diferencia entre estos valores obtenidos para el intervalo de tiempo de registro de la variable. Para obtener el valor de ET, en mm d^{-1} , se sumaron los valores positivos de los 96 datos analizados por día y el resultado obtenido se multiplicó por el volumen de suelo. En la Tabla 40 se presentan los valores obtenidos para los 15 filtros verdes evaluados.

La Tabla 40 contiene los parámetros estadísticos del promedio, el valor máximo, el valor mínimo, el número de datos, la desviación estándar (DE), el coeficiente de variación (CV) y el intervalo de confianza (IC) a un nivel de significancia del 95%, para las variables evapotranspiración (ET) en mm d^{-1} y temperatura del suelo (T) en $^{\circ}\text{C}$.

Los FV (1, 2, 3) con aplicaciones de agua limpia y sembrados con pasto vetiver presentaron un valor de ET promedio que varió entre $18,4 \text{ mm d}^{-1} \pm 0,90$ (FV2) y $23,9 \text{ mm d}^{-1} \pm 1,61$ (FV3) y un valor de T promedio que varió entre $23,1^{\circ}\text{C} \pm 0,07$ (FV3) y $23,4^{\circ}\text{C} \pm 0,07$ (FV2).

Los FV (13, 14, 15) con aplicaciones de agua limpia y vegetación natural presentaron un valor de ET promedio que varió entre $18,2 \text{ mm d}^{-1} \pm 0,90$ (FV15) y $19,6 \text{ mm d}^{-1} \pm 0,90$ (FV13) y un valor de T promedio que varió entre $23,4^{\circ}\text{C} \pm 0,09$ (FV15) y $23,7^{\circ}\text{C} \pm 0,10$ (FV13).

Al comparar los dos tipos de filtros verdes operados con aplicación de agua limpia a diferentes cargas hidráulicas pueden evidenciarse mayores tasas de evapotranspiración en los filtros verdes sembrados con pasto vetiver con respecto a los que contenían vegetación natural.

Los FV (4, 5, 6) con aplicaciones de agua residual del café proveniente de la tecnología del tanque tina y sembrados con pasto vetiver presentaron un valor de ET promedio que varió entre $17,3 \text{ mm d}^{-1} \pm 0,05$ (FV4) y $21,7 \text{ mm d}^{-1} \pm 0,95$ (FV5) y un valor de T promedio que varió entre $24,3^{\circ}\text{C} \pm 0,09$ (FV4) y $24,6^{\circ}\text{C} \pm 0,08$ (FV5).

Los FV (7, 8, 9) con aplicaciones de lixiviados provenientes de la mezcla pulpa + mucílago de café de la tecnología Becolsub y sembrados con pasto vetiver presentaron un valor de ET promedio que varió entre $23,8 \text{ mm d}^{-1} \pm 2,35$ (FV9) y $33,2 \text{ mm d}^{-1} \pm 4,45$ (FV7) y un valor de T promedio que varió entre $25,3^{\circ}\text{C} \pm 0,10$ (FV7) y $25,6^{\circ}\text{C} \pm 0,13$ (FV8).

Los FV (10, 11, 12) con aplicación de mieles provenientes de tecnología Ecomill®, y sembrados con pasto vetiver presentaron un valor de ET promedio que varió entre $20,8 \text{ mm d}^{-1} \pm 1,37$ (FV11) y $32,2 \text{ mm d}^{-1} \pm 6,05$ (FV10) y un valor de T promedio que varió entre $25,2^{\circ}\text{C} \pm 0,13$ (FV10) y $25,4^{\circ}\text{C} \pm 0,10$ (FV11).

Tabla 40. Valores promedio de evapotranspiración (ET) y temperatura (T) del suelo en los filtros verdes experimentales.

Variable	FV1	FV2	FV3	FV4	FV5	FV6	FV7	FV8	FV9	FV10	FV11	FV12	FV13	FV14	FV15		
ET (mm d ⁻¹)	Promedio	21,6	18,4	23,9	17,3	21,7	21,0	33,2	25,4	23,8	32,2	20,8	21,3	19,6	19,5	18,2	
	Máximo	152,4	79,8	109,2	20,7	46,2	53,7	158,4	129,0	155,5	192,5	112,7	71,6	69,5	117,0	95,0	
	Mínimo	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3
	Datos	205	196	203	185	201	201	137	114	199	172	194	135	178	201	197	
	DE	14,52	6,42	11,74	0,36	6,84	7,15	26,59	16,40	16,95	40,50	9,72	9,16	6,11	9,90	6,43	
	CV	67,11	34,96	49,15	2,07	31,45	34,02	79,97	64,68	71,22	125,71	46,72	43,08	31,20	50,74	35,27	
	IC	1,99	0,90	1,61	0,05	0,95	0,99	4,45	3,01	2,35	6,05	1,37	1,55	0,90	1,37	0,90	
	Promedio	23,2	23,4	23,1	24,3	24,6	24,6	25,3	25,6	25,3	25,2	25,4	25,2	23,7	23,6	23,4	
	Máximo	24,9	24,9	24,6	25,8	25,8	25,8	26,6	28,2	27,7	27,4	27,8	27,7	25,6	25,4	25,0	
	Mínimo	22,1	22,5	22,2	22,9	23,4	23,4	23,8	24,4	23,9	23,3	23,8	23,8	22,5	22,8	22,4	
Datos	205	196	203	185	201	201	137	114	199	172	194	135	178	201	197		
DE	0,58	0,53	0,52	0,65	0,57	0,58	0,62	0,73	0,77	0,84	0,72	0,84	0,71	0,60	0,61		
CV	2,51	2,28	2,24	2,67	2,34	2,37	2,47	2,84	3,03	3,32	2,85	3,33	2,97	2,55	2,63		
IC	0,08	0,07	0,07	0,09	0,08	0,08	0,10	0,13	0,11	0,13	0,10	0,14	0,10	0,08	0,09		

Para los filtros verdes sembrados con pasto vetiver y con aplicaciones de los diferentes tipos de aguas residuales del café se evidencia una mayor tasa de evapotranspiración en aquellos con aplicaciones de agua con mayor carga orgánica, como los lixiviados con una carga orgánica media, medida como DQO, de 66.090 mg L⁻¹ (FV 7, 8, 9) y las mieles del Ecomill® con una DQO media de 68.774 mg L⁻¹ (FV 10, 11, 12), con respecto a los FV 4, 5, 6 a los cuales se les aplicó agua residual proveniente de la tecnología del tanque tina (DQO de 27.832 mg L⁻¹).

En la Tabla 41 se presentan los valores promedio de evapotranspiración y temperatura del suelo agrupados para los filtros verdes sembrados con pasto vetiver y con aplicación de diferentes tipos de agua y para aquellos a los cuales sólo se les aplicó los diferentes tipos de aguas residuales del café.

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 41, se observa que para los FV (1 a 12), a los cuales se les aplicó agua limpia (FV 1, 2, 3) y aguas residuales del café (FV 4 a 12), sembrados con pasto vetiver, el valor de ET promedio fue de 23,02 mm d⁻¹ ± 0,73, variando entre 17,28 mm d⁻¹ y 192,45 mm d⁻¹ y un valor de T promedio del suelo de 24,52°C ± 0,05 y que varió entre 22,13°C y 28,20 °C.

Tabla 41. Valores promedio de evapotranspiración y temperatura del suelo en filtros verdes agrupados por el tipo de vegetación sembrada y el tipo de agua aplicada.

Variable	Parámetro	Filtros verdes con vetiver y aplicación de diferentes tipos de agua (limpia y de café)	Filtros verdes con vetiver y aplicación de aguas residuales del café
ET (mm d ⁻¹)	Promedio	23,02	23,69
	Máximo	192,45	192,45
	Mínimo	17,28	17,28
	Datos	2142	1538
	DE	17,26	18,97
	CV	74,98	80,09
	IC	0,73	0,95
T (°C)	Promedio	24,52	25,02
	Máximo	28,20	28,20
	Mínimo	22,13	22,90
	Datos	2142	1538
	DE	1,09	0,82
	CV	4,46	3,28
	IC	0,05	0,04

Para los FV sembrados con pasto vetiver y aplicaciones de agua limpia (FV 1, 2, 3), el valor de ET promedio fue de $21,33 \text{ mm d}^{-1} \pm 0,93$, variando entre $17,28$ y $152,43 \text{ mm d}^{-1}$ y un valor de T promedio del suelo de $23,26^{\circ}\text{C} \pm 0,04$ que varió entre $22,13^{\circ}\text{C}$ y $24,90^{\circ}\text{C}$.

Para los FV a los cuales se les aplicó aguas residuales del café (FV 4 a 12) y que estaban sembrados con pasto vetiver, el valor de ET promedio fue de $23,69 \text{ mm d}^{-1} \pm 0,95$, el cual varió entre $17,28 \text{ mm d}^{-1}$ y $192,45 \text{ mm d}^{-1}$ y un valor de T promedio del suelo de $25,02^{\circ}\text{C} \pm 0,04$ y que varió entre $22,90^{\circ}\text{C}$ y $28,20^{\circ}\text{C}$.

Para los FV que contenían vegetación natural y aplicaciones de agua limpia (FV 13, 14, 15), el valor de ET promedio fue de $19,10 \text{ mm d}^{-1} \pm 0,63$, variando entre $17,28 \text{ mm d}^{-1}$ y $116,97 \text{ mm d}^{-1}$ y un valor de T promedio del suelo de $23,54^{\circ}\text{C} \pm 0,05$ y que varió entre $22,37^{\circ}\text{C}$ y $25,64^{\circ}\text{C}$.

Los valores máximos de ET encontrados, en esta investigación, para filtros verdes sembrados con pasto vetiver bajo invernadero y que correspondieron a $192,45 \text{ mm d}^{-1}$, están cercanos a los máximos registrados por Guidi et al. (2008) quienes reportan valores de ET de sauces y álamos utilizados como vegetación en filtros verdes a campo abierto y cultivados en condiciones de fertilización (F) y sin fertilización (NF), para la primera temporada de crecimiento, de 62 (NF) y 119 mm d^{-1} (F) en sauce y 59 (NF) y $72,5 \text{ mm d}^{-1}$ (F) en álamo, y durante la segunda temporada de crecimiento de 89 (NF) y 179 mm d^{-1} (F) en sauce y 71 (NF) y 110 mm d^{-1} (F) en álamo.

Los valores promedio de ET encontrados en la presente investigación para filtros verdes sembrados con pasto vetiver bajo invernadero y que correspondieron a $23,69 \text{ mm d}^{-1}$, son menores a los reportados por McIntyre and Riha (1991), citados por Rodríguez (2009), quienes reportan para humedales bajo invernadero sembrados con las especies *Typha* y *Scirpus*, pérdidas medias por evapotranspiración de 32 mm d^{-1} .

La temperatura promedio de $25,02^{\circ}\text{C}$ registrada en el suelo de los FV sembrados con pasto vetiver y con aplicación de aguas residuales del café, fue superior a la encontrada en el suelo de los filtros verdes sembrados con pasto vetiver y con aplicación de agua limpia que fue de $23,26^{\circ}\text{C}$, y superior a la encontrada en el suelo de los filtros verdes con vegetación natural y con aplicación de agua limpia que fue de $23,54^{\circ}\text{C}$.

Para el período de duración de la experimentación (654 días), el promedio de la temperatura ambiente de Cenicafé (Sede La Granja) registrada por la estación meteorológica correspondiente fue de $22,16^{\circ}\text{C}$ (variando en el rango entre $18,96$ y $25,67^{\circ}\text{C}$), con un valor promedio de temperatura máxima de $30,37^{\circ}\text{C}$ (variando en el rango entre $22,75$ y $36,30^{\circ}\text{C}$) y con un valor promedio de temperatura mínima de $17,86^{\circ}\text{C}$ (variando en el rango entre $15,09$ y $20,31^{\circ}\text{C}$) (Cenicafé, 2020, 2021).

Los resultados anteriores reflejan la ventaja de instalar filtros verdes tipo invernadero, dado que la temperatura promedio del suelo permanece por encima de la temperatura promedio del ambiente y favorece las tasas de evapotranspiración.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se encontró para filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana, sembrados con pasto vetiver y con aplicación de aguas residuales provenientes del proceso de beneficio del café, una tasa de evapotranspiración (ET) de 23,69 L m²-d⁻¹.

Volúmenes retenidos y evapotranspirados de agua en los filtros verdes, calculados por la suma de las tasas de ET y retención de humedad en el suelo. En la Tabla 42 se presentan los resultados promedio, para las tres aplicaciones, de los volúmenes de agua retenidos y evapotranspirados en los 15 FV agrupados por tipo de vegetación y tipo de agua utilizada en la aplicación.

De acuerdo con los datos condensados en la Tabla 42, se puede apreciar que los mayores valores de tasas de evapotranspiración y retención se alcanzaron para los filtros verdes sembrados con pasto vetiver y con aplicación de aguas residuales del café, con un valor de 24,05 mm d⁻¹ y los menores valores de tasas de evapotranspiración y retención se obtuvieron para los filtros verdes con vegetación natural y aplicación de agua limpia, con un valor de 19,46 mm d⁻¹.

En la Tabla 43 se presentan los datos de las tasas de evapotranspiración y retención alcanzadas en los filtros verdes experimentales calculadas mediante la metodología de lisimetría de

Tabla 42. Volúmenes de agua retenidos y evapotranspirados (RET) calculados a partir de la suma de las tasas de retención y evapotranspiración obtenidas experimentalmente.

Descripción del FV	FV	Volumen de agua retenido en el suelo (mm d ⁻¹)	Tasa ET (mm d ⁻¹)	Tasa RET (mm d ⁻¹)
Vegetación natural y aplicación de agua limpia.	13, 14, 15	0,36	19,10	19,46
Pasto vetiver y aplicación de agua limpia.	1, 2, 3	0,36	21,33	21,69
Pasto vetiver y aplicación de agua (incluye agua limpia y aguas residuales del café).	Del 1 al 12	0,36	23,02	23,38
Pasto vetiver y aplicación de aguas residuales del café.	Del 4 al 12	0,36	23,69	24,05

Tabla 43. Comparación de los volúmenes de agua retenidos y evapotranspirados (RET) calculados a partir de lisimetría de drenaje y mediante la suma de las tasas de retención y evapotranspiración obtenidas experimentalmente.

Descripción del FV	FV	Tasa RET (Lisimetría de drenaje) (mm d ⁻¹)	Tasa RET (R + ET) (mm d ⁻¹)	Tasa RET Promedio (mm d ⁻¹)
Vegetación natural y aplicación de agua limpia.	13, 14, 15	20,65	19,46	20,06
Pasto vetiver y aplicación de agua limpia.	1, 2, 3	22,27	21,69	21,98
Pasto vetiver y aplicación de agua (incluye agua limpia y aguas residuales del café).	Del 1 al 12	23,23	23,38	23,31
Pasto vetiver y aplicación de aguas residuales del café.	Del 4 al 12	23,55	24,05	23,80

drenaje y mediante la suma de las tasas de retención y evapotranspiración encontradas experimentalmente.

De los datos presentados en la Tabla 43 puede apreciarse que las tasas de retención y evapotranspiración (RET) encontradas en los filtros verdes con aplicación de agua limpia fueron mayores en el 6,12% para los FV sembrados con pasto vetiver y en el 2,67% para los FV con vegetación natural, por el método de lisimetría de drenaje respecto al valor obtenido de la suma de las tasas de retención y evapotranspiración.

Para el caso de los FV sembrados con pasto vetiver y con aplicación de aguas residuales del café, el valor de la tasa de retención y evapotranspiración encontradas por el método de lisimetría de drenaje fue un 2,08% menor respecto al valor obtenido de la suma de las tasas de retención y evapotranspiración.

En la última columna de la Tabla 43 se muestran los promedios de los valores de las tasas de retención y evapotranspiración obtenidos a partir de los valores encontrados por los dos métodos, con el fin de utilizar este valor en el dimensionamiento de los filtros verdes.

De acuerdo con los resultados obtenidos puede utilizarse como parámetro de diseño para filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana, sembrados con pasto vetiver y con aplicación de aguas residuales provenientes del proceso de beneficio del café, un valor de retención + evapotranspiración (RET) de 23,80 L m⁻²-d⁻¹.

Comparación de las características químicas del suelo de los filtros verdes antes y después de la aplicación del agua.

En la Tabla 44 se presentan los valores iniciales promedio del suelo (antes de la aplicación del agua) para los filtros verdes experimentales, agrupados por el tipo de vegetación establecida y el tipo de agua aplicada, así: FV (1, 2, 3) sembrados con pasto vetiver y con aplicación de agua limpia, FV (4, 5, 6) sembrados con pasto vetiver y con aplicación de aguas - mieles del café provenientes de la tecnología del tanque tina, FV (7, 8, 9) sembrados con pasto vetiver y con aplicación de lixiviados provenientes de la mezcla pulpa + mucílago de café (tecnología Becolsub), FV (10, 11, 12) sembrados con pasto vetiver y con aplicación de mieles provenientes de tecnología Ecomill®, FV (13, 14, 15) establecidos con vegetación natural y aplicación de agua limpia.

De acuerdo con los datos condensados en la Tabla 44, puede resumirse:

El valor promedio de pH en el suelo varió entre 4,80 (FV 1, 2, 3) y 5,60 (FV 7, 8, 9); el contenido de materia orgánica varió entre 3,73% (FV 7, 8, 9) y 5,37% (FV 13, 14, 15); el contenido de N varió entre 0,18% (FV 7, 8, 9) y 0,24% (FV 13, 14, 15); el contenido de P varió entre 114 mg kg⁻¹ (FV 4, 5, 6) y 162 mg kg⁻¹ (FV 13, 14, 15); el contenido de K varió entre 0,21 cmol kg⁻¹ (FV 13, 14, 15) y 3,04

Tabla 44. Características químicas iniciales promedio del suelo de los filtros verdes (antes del primer período de aplicación del agua).

Parámetro	FV (1, 2, 3)	FV (4, 5, 6)	FV (7, 8, 9)	FV (10, 11, 12)	FV (13, 14, 15)
pH	4,80	5,33	5,60	5,50	4,97
CE (mS cm ⁻¹)	0,050	0,093	0,027	0,010	0,043
N (%)	0,23	0,21	0,18	0,19	0,24
MO (%)	5,17	4,50	3,73	4,00	5,37
K (cmol kg ⁻¹)	0,59	3,04	1,76	1,49	0,21
Ca (cmol kg ⁻¹)	5,73	5,14	5,10	4,43	5,67
Mg (cmol kg ⁻¹)	1,11	1,42	1,43	1,47	1,58
Al (cmol kg ⁻¹)	0,20	0,17	0,13	0,10	0,17
CIC	16	14	13	12	16
P (mg kg ⁻¹)	118	114	135	157	162
Fe (mg kg ⁻¹)	212	361	322	449	263
Mn (mg kg ⁻¹)	18	28	28	31	21
Zn (mg kg ⁻¹)	7,60	4,50	5,50	4,63	10,07
Cu (mg kg ⁻¹)	15,40	17,97	17,67	19,90	15,50
B (mg kg ⁻¹)	0,29	0,46	1,37	0,77	0,25
S (mg kg ⁻¹)	19,83	39,10	29,80	28,90	27,90
Arcilla (%)	21	20	17	17	16
Limo (%)	27	25	26	23	23
Arena (%)	53	55	57	60	61

cmol kg⁻¹ (FV 4, 5, 6) y la conductividad eléctrica varió entre 0,010 mS cm⁻¹ (FV 10, 11, 12) y 0,093 mS cm⁻¹ (FV 4, 5, 6).

Al final de la experimentación (después de tres aplicaciones de agua realizadas durante 36 semanas, entre el 23 de septiembre del 2019 y el 7 de marzo del 2021), se realizó el muestreo del suelo de los diferentes filtros verdes (agrupados por el tipo de vegetación establecida y el tipo de agua aplicada), cuyos resultados se presentan en la Tabla 45, en la cual se resaltan en color verde los parámetros del suelo que presentaron un incremento mayor al 5% con relación a su valor inicial (antes de iniciar la primera aplicación), en color amarillo los parámetros del suelo cuya variación no fue superior al 5% respecto a su valor inicial y en color rojo los parámetros del suelo que presentaron una disminución mayor al 5% respecto a su valor inicial.

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 45, puede resumirse:

En promedio, los FV (4, 5, 6) con aplicaciones de agua residual del café proveniente de la tecnología del tanque tina (con valores medios de pH de 4,09, de CE de 4,95 mS cm⁻¹ y DQO de 27.832 mg L⁻¹) y sembrados con pasto vetiver, presentaron un incremento superior al 5% respecto a sus condiciones iniciales (antes del primer período de aplicación del agua residual) en los parámetros pH, CE, N, MO, K, P, Fe, Mn, Cu, B, S y contenidos de limo y arena y decrementos superiores al 5% en los parámetros Ca, Mg, Al, Zn y contenidos de arcilla. Parámetros como la CIC se mantuvieron constantes.

En promedio, los FV (7, 8, 9) con aplicaciones de lixiviados provenientes de la mezcla pulpa + mucílago de café de la tecnología Becolsub (con valores medios de pH de 4,41, de CE de 10,64 mS cm⁻¹ y DQO de 66.090 mg L⁻¹) y sembrados con pasto vetiver, presentaron un incremento superior al 5% respecto a sus condiciones iniciales (antes del primer período de aplicación del agua residual) en los parámetros pH, CE, N, MO, K, P, Fe, Mn, Cu, B, S y contenidos de arena y decrementos superiores al 5% en los parámetros Ca, Mg, Al, Zn y contenidos de arcilla. Parámetros como la CIC y contenidos de limo se mantuvieron constantes.

En promedio; los FV (10, 11, 12) con aplicaciones de mieles provenientes de tecnología Ecomill®, (con valores medios de pH de 3,94, de CE de 6,43 mS cm⁻¹ y DQO de 68.774 mg L⁻¹) y sembrados con pasto vetiver, presentaron un incremento superior al 5% respecto a sus condiciones iniciales (antes del primer período de aplicación del agua residual) en los parámetros pH, CE, N, MO, K, CIC, P, Fe, Mn, Zn, Cu, B, S y contenidos de limo y arena y decrementos superiores al 5% en los parámetros Ca, Mg y contenidos de arcilla. Parámetros como el Al se mantuvieron constantes.

Se deduce, de la información condensada en la Tabla 45, que la aplicación de los diferentes tipos de aguas residuales del café, durante tres períodos de 12 semanas cada uno, permitió un incremento del valor inicial de los parámetros del suelo: pH, CE, N, MO, K, P, Fe, Mn, Cu, B y S. Adicionalmente, se observó que la aplicación de las mieles de la tecnología Ecomill® (que

Tabla 45. Características químicas finales promedio del suelo de los filtros verdes (después de tres períodos de aplicación de agua).

Parámetro	FV (1, 2, 3)	FV (4, 5, 6)	FV (7, 8, 9)	FV (10, 11, 12)	FV (13, 14, 15)
pH	5,87 (+22,22%)	6,60 (+23,75%)	8,77 (+56,55%)	6,17 (+12,12%)	6,13 (+23,49%)
CE (mS cm ⁻¹)	0,073 (+46,67%)	8,263 (+8754%)	5,420 (+20225%)	8,230 (+82200%)	0,107 (+146,15%)
N (%)	0,26 (+10,00%)	0,23 (+9,52%)	0,19 (+7,55%)	0,25 (+35,71%)	0,23 (-2,78%)
MO (%)	5,80 (+12,26%)	5,10 (+13,33%)	4,10 (+9,82%)	5,63 (+40,83%)	5,17 (-3,73%)
K (cmol kg ⁻¹)	0,41 (-30,51%)	12,39 (+308,01%)	26,43 (+1399%)	10,50 (+606,50%)	0,46 (+120,63%)
Ca (cmol kg ⁻¹)	5,53 (-3,43%)	3,88 (-24,53%)	1,93 (-62,09%)	2,21 (-50,11%)	4,24 (-25,18%)
Mg (cmol kg ⁻¹)	1,92 (+73,49%)	1,26 (-11,48%)	0,96 (-32,63%)	0,95 (-35,45%)	1,59 (+0,63%)
Al (cmol kg ⁻¹)	0,10 (-50,00%)	0,10 (-40,00%)	0,10 (-25,00%)	0,10 (0,00%)	0,10 (-40,00%)
CIC	15 (-2,13%)	13 (-4,76%)	13 (0,00%)	13 (+8,53%)	13 (-20,83%)
P (mg kg ⁻¹)	80 (-31,73%)	195 (+71,26%)	429 (+218,81%)	364 (+131,85%)	118 (-26,80%)
Fe (mg kg ⁻¹)	175 (-17,17%)	924 (+156,05%)	751 (+133,13%)	1016 (+126,11%)	238 (-9,51%)
Mn (mg kg ⁻¹)	15 (-15,09%)	65 (+129,41%)	64 (+131,33%)	49 (+57,45%)	24 (+10,94%)
Zn (mg kg ⁻¹)	5,50 (-27,63%)	3,20 (-28,89%)	4,13 (-28,45%)	5,07 (+9,35%)	4,60 (-54,30%)
Cu (mg kg ⁻¹)	15,73 (+2,16%)	21,10 (+17,44%)	20,67 (+16,68%)	21,70 (+9,05%)	16,70 (+7,74%)
B (mg kg ⁻¹)	0,18 (-39,77%)	1,50 (+229,20%)	17,16 (+1152,80%)	1,65 (+115,22%)	0,25 (+1,35%)
S (mg kg ⁻¹)	14,47 (-27,06%)	65,37 (+67,18%)	60,57 (+103,24%)	60,83 (+110,50%)	17,37 (-37,75%)
Arcilla (%)	13 (-35,48%)	12 (-40,00%)	8 (-52,00%)	9 (-48,00%)	11 (-33,33%)
Limo (%)	30 (+12,50%)	29 (+18,92%)	26 (0,00%)	27 (+15,71%)	28 (+23,19%)
Arena (%)	57 (+7,59%)	59 (+6,02%)	66 (+15,12%)	65 (+7,78%)	61 (0,00%)

* Entre paréntesis la variación presentada en cada parámetro del suelo respecto a su valor inicial (antes de la primera aplicación de agua).

presentó los mayores valores de carga orgánica), permitió un incremento en los parámetros CIC y Zn. Para todos los tipos de aguas residuales del café aplicadas a los filtros verdes, se observó un decremento en el valor inicial de los parámetros del suelo: Ca y Mg.

Para los FV con aplicación de agua limpia (FV 1, 2, 3, 13 14, 15) se observó un incremento en los valores iniciales de los parámetros del suelo (pH, CE) y un decremento en los parámetros Al, P, Fe y Zn después de los tres períodos de aplicación de agua. Para los demás parámetros evaluados, su variación fue diferente en los filtros verdes sembrados con pasto vetiver y en los que contenían la vegetación natural de la zona.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se logró determinar que la aplicación periódica de las aguas residuales del café sobre filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana y sembrados con pasto vetiver, permite incrementar el valor de los parámetros del suelo: pH, conductividad eléctrica, N, materia orgánica, K, P, Fe, Mn, Cu, B y S.

En la Tabla 46 se presenta la clasificación de las propiedades químicas del suelo para café en la etapa de producción, clasificadas en tres rangos: bajo (de color rojo), medio (de color amarillo) y alto (de color verde). De acuerdo con Sadeghian (2013), cuando el nivel de un nutrimento en el suelo es bajo, es recomendable que su aplicación se realice empleando dosis relativamente altas, con el fin de elevar la fertilidad del suelo y atender las necesidades del cultivo. Si el contenido del elemento es medio, se sugiere aplicar la cantidad requerida para cubrir principalmente las necesidades de la plantación y aumentar parcialmente su contenido en el suelo. Para el caso de la fertilidad alta se aplican menores dosis para mantener los niveles del nutrimento en el suelo y reponer las pérdidas causadas por erosión y lixiviación, y así evitar el agotamiento del mismo, a través del tiempo.

Sadeghian (2013) reporta que un rango de pH entre 5,0 y 5,5 se considera adecuado para el crecimiento del café, en tanto que valores más altos o más bajos son clasificados como limitantes. El mismo autor reporta que a medida que los contenidos de aluminio intercambiable superan $1,0 \text{ cmol kg}^{-1}$, se eleva la probabilidad de ocurrir una mayor toxicidad por este elemento. En contraste, al incrementar los niveles de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre, también aumenta su disponibilidad para las plantas.

Considerando los niveles de nutrimentos en la Tabla 46 para café en la etapa de producción, se analiza el contenido de los mismos en los suelos de los filtros verdes, antes y después de la aplicación de las aguas residuales del café, durante 36 semanas. En la Tabla 47 se presentan

Tabla 46. Clasificación de las propiedades químicas del suelo para café, en la etapa de producción. Adaptado de Sadeghian (2013).

Parámetro del suelo	Nivel		
	Bajo	Medio	Alto
pH (unidades)	< 5,00	5,00 - 5,50	> 5,50
N (%)	< 0,34	0,34 - 0,58	> 0,58
MO (%)	< 8,00	8,00 - 16,00	> 16,00
K (cmol kg ⁻¹)	< 0,20	0,20 - 0,40	> 0,40
Ca (cmol kg ⁻¹)	< 1,50	1,50 - 3,00	> 3,00
Mg (cmol kg ⁻¹)	< 0,60	0,60 - 0,90	> 0,90
Al (cmol kg ⁻¹)	< 1,00	1,00	> 1,00
CIC (cmol kg ⁻¹)	< 3,00	3,00 - 6,00	> 6,00
P (mg kg ⁻¹)	< 10,00	10,00 - 20,00	> 20,00
S (mg kg ⁻¹)	< 6,00	6,00 - 12,00	> 12,00

Tabla 47. Clasificación de las propiedades químicas del suelo para café, en la etapa de producción, de los filtros verdes experimentales, antes y después de la aplicación de las aguas residuales del café.

Parámetro	Antes de la aplicación de aguas residuales			Después de tres aplicaciones de aguas residuales		
	FV (4, 5, 6)	FV (7, 8, 9)	FV (10, 11, 12)	FV (4, 5, 6)	FV (7, 8, 9)	FV (10, 11, 12)
pH (unidades)	5,33	5,60	5,50	6,60	8,77	6,17
N (%)	0,21	0,18	0,19	0,23	0,19	0,25
MO (%)	4,50	3,73	4,00	5,10	4,10	5,63
K (cmol kg ⁻¹)	3,04	1,76	1,49	12,39	26,43	10,50
Ca (cmol kg ⁻¹)	5,14	5,10	4,43	3,88	1,93	2,21
Mg (cmol kg ⁻¹)	1,42	1,43	1,47	1,26	0,96	0,95
Al (cmol kg ⁻¹)	0,17	0,13	0,10	0,10	0,10	0,10
CIC (cmol kg ⁻¹)	14	13	12	13	13	13
P (mg kg ⁻¹)	114	135	157	195	429	364
S (mg kg ⁻¹)	39,10	29,80	28,90	65,37	60,57	60,83

los resultados del análisis, resaltando en color verde los niveles altos de nutrientes, en color amarillo los niveles medios y en color rojo los niveles bajos.

De acuerdo con la información presentada en la Tabla 47, antes de iniciar con la aplicación de las aguas residuales del café, los suelos de los filtros verdes mostraron valores de pH en el nivel medio (adecuados para el cultivo del café), valores en el nivel alto para los parámetros K, Ca, Mg, CIC, P y S y valores en el nivel bajo para N, MO y Al. Después de la aplicación de las aguas residuales del café (durante 36 semanas), los valores de pH del suelo se clasificaron en

el nivel alto y en este nivel se mantuvieron los parámetros K, Mg, CIC, P y S, sólo cambiando al nivel medio el Ca en los filtros verdes con aplicación de lixiviados provenientes de la mezcla de la pulpa + el mucílago de la tecnología Becolsub y en los filtros verdes con aplicación de las mieles provenientes de la tecnología Ecomill®. Para el caso de los filtros verdes en los cuales se aplicaron las aguas - mieles provenientes de la tecnología tanque tina, el Ca se mantuvo en el nivel alto. Los parámetros N, MO y Al se mantuvieron en un nivel bajo.

Crecimiento de la vegetación en los filtros verdes. En la Tabla 48 se presentan los resultados de las tasas de crecimiento (en base húmeda) de la vegetación presente en los 15 filtros verdes experimentales, durante los tres períodos de aplicación de agua y de reposo.

Para los filtros verdes con aplicación de agua limpia y sembrados con pasto vetiver, la tasa de crecimiento, en base húmeda, varió durante las aplicaciones, entre 35,00 g m²-d⁻¹ para el FV1, con una carga hidráulica aplicada de 20 mm, y 41,52 g m²-d⁻¹ para el FV3 con una carga hidráulica aplicada de 60 mm. Para los períodos de reposo, en los cuales sólo se aplicó agua limpia una vez a la semana, la tasa de crecimiento varió entre 20,76 g m²-d⁻¹ para el FV1 y 26,94 g m²-d⁻¹ para el FV3. Para estos filtros verdes, las tasas de crecimiento de la vegetación fueron mayores en los períodos de aplicación respecto a los períodos de reposo.

Para los filtros verdes con aplicación de agua residual del café proveniente de la tecnología

Tabla 48. Tasas de crecimiento, en base húmeda, de la vegetación de los filtros verdes durante el desarrollo de la investigación.

Filtro	Tasa de crecimiento (g m ² -d ⁻¹)							
	Período de aplicación				Período de reposo			
	1	2	3	Promedio	1	2	3	Promedio
FV1	38,39	42,64	23,98	35,00	19,67	26,74	15,88	20,76
FV2	42,49	48,78	21,94	37,73	28,79	22,91	14,12	21,94
FV3	52,07	49,03	23,47	41,52	40,28	24,07	16,47	26,94
FV4	23,55	49,80	7,65	27,00	17,09	31,79	11,18	20,02
FV5	10,12	23,30	6,12	13,18	21,92	18,01	7,65	15,86
FV6	6,49	12,30	2,04	6,94	17,79	8,02	3,25	9,68
FV7	4,28	14,22	3,57	7,36	34,30	3,84	2,81	13,65
FV8	4,09	9,86	0,00	4,65	50,16	3,31	0,00	17,82
FV9	4,30	18,83	0,00	7,71	79,93	1,01	0,00	26,98
FV10	5,18	9,86	1,53	5,52	112,63	6,77	2,81	40,74
FV11	3,70	22,67	0,00	8,79	79,92	1,76	0,00	27,23
FV12	3,08	32,14	0,00	11,74	105,46	0,78	0,00	35,41
FV13	43,64	50,82	23,47	39,31	22,18	19,93	11,18	17,76
FV14	67,13	53,88	18,37	46,46	27,70	41,32	19,41	29,48
FV15	24,25	35,71	12,76	24,24	22,27	14,69	11,18	16,04

del tanque tina y sembrados con pasto vetiver, la tasa de crecimiento, en base húmeda, varió durante las aplicaciones, entre $6,94 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ para el FV6, con una carga hidráulica aplicada de 60 mm, y $27,00 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ para el FV4 con una carga hidráulica aplicada de 20 mm, evidenciando el impacto negativo de la carga orgánica sobre la tasa de crecimiento. Para los períodos de reposo, la tasa de crecimiento varió entre $9,68 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ para el FV6 y $20,02 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ para el FV4, evidenciando la recuperación del pasto vetiver en los períodos de reposo en aquellos filtros verdes sometidos a mayores cargas orgánicas.

Para los filtros verdes con aplicación de lixiviados y sembrados con pasto vetiver, la tasa de crecimiento, en base húmeda, varió durante las aplicaciones, entre $4,65 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ para el FV8, con una carga hidráulica aplicada de 40 mm, y $7,71 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ para el FV9 con una carga hidráulica aplicada de 60 mm, registrando tasas de crecimiento menores a las observadas con la aplicación de las aguas residuales provenientes del tanque tina, las cuales tenían cargas orgánicas menores y evidenciando el impacto negativo de la carga orgánica sobre la tasa de crecimiento. Para los períodos de reposo, la tasa de crecimiento varió entre $13,65 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ para el FV7 y $26,98 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ para el FV9, evidenciando la recuperación del pasto vetiver en los períodos de reposo y el efecto positivo de la carga orgánica que se incorpora al suelo de los filtros verdes, aportando los diferentes nutrimentos, dado que las mayores tasas de crecimiento en los períodos de reposo, se registraron en los filtros verdes a los cuales se les aplicaron mayores cargas orgánicas.

Para los filtros verdes con aplicación de mieles de la tecnología Ecomill® y sembrados con pasto vetiver, la tasa de crecimiento, en base húmeda, varió durante las aplicaciones, entre $5,52 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ para el FV10, con una carga hidráulica aplicada de 20 mm, y $11,74 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ para el FV12 con una carga hidráulica aplicada de 60 mm, encontrando tasas de crecimiento menores a las observadas con la aplicación de las aguas residuales provenientes del tanque tina, las cuales tenían cargas orgánicas menores. Para los períodos de reposo la tasa de crecimiento varió entre $27,23 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ para el FV11 y $40,74 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ para el FV10, evidenciando la recuperación del pasto vetiver en los períodos de reposo y el efecto positivo de la carga orgánica que se incorpora al suelo de los filtros verdes.

Para los filtros verdes con aplicación de agua limpia y con vegetación natural, la tasa de crecimiento en base húmeda varió entre $24,24 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ para el FV15, con una carga hidráulica aplicada de 60 mm, y $46,46 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ para el FV14 con una carga hidráulica de 40 mm. Para los períodos de reposo, la tasa de crecimiento varió entre $16,04 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ para el FV15 y $29,48 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ para el FV14. Para estos filtros verdes, las tasas de crecimiento de la vegetación fueron mayores en los períodos de aplicación respecto a los períodos de reposo.

En la Tabla 49 se presentan los resultados de las tasas de crecimiento en materia seca, de la vegetación presente en los 15 filtros verdes experimentales, durante los tres períodos de aplicación de agua y de reposo.

Tabla 49. Tasas de crecimiento, en materia seca, de la vegetación de los filtros verdes durante el desarrollo de la investigación.

Filtro	Tasa de crecimiento ($\text{g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$)							
	Período de aplicación				Período de reposo			
	1	2	3	Promedio	1	2	3	Promedio
FV1	11,31	13,23	6,28	10,28	11,55	8,81	3,32	7,90
FV2	12,72	13,88	6,17	10,92	16,26	6,78	2,77	8,60
FV3	15,71	14,73	6,38	12,27	21,69	6,43	3,26	10,46
FV4	9,29	14,17	2,17	8,55	8,55	10,45	2,07	7,02
FV5	7,13	7,70	2,06	5,63	7,72	5,81	1,53	5,02
FV6	5,32	6,87	1,34	4,51	7,64	2,64	0,63	3,63
FV7	3,81	8,94	0,45	4,40	27,89	1,39	0,55	9,94
FV8	3,62	6,45	0,00	3,36	38,35	0,82	0,00	13,06
FV9	3,82	10,03	0,00	4,62	68,46	0,24	0,00	22,90
FV10	4,62	7,70	0,36	4,23	77,73	1,19	0,52	26,48
FV11	3,44	13,98	0,00	5,81	56,87	0,52	0,00	19,13
FV12	2,80	15,43	0,00	6,07	89,25	0,22	0,00	29,83
FV13	6,52	14,56	5,15	8,75	12,64	5,59	2,10	6,77
FV14	11,25	13,01	4,97	9,74	14,88	11,18	3,68	9,91
FV15	3,91	10,71	2,79	5,80	11,25	3,89	2,14	5,76

El comportamiento de las tasas de crecimiento de la biomasa en base seca fue muy similar al descrito para la biomasa en base húmeda.

- La humedad promedio de la biomasa de los FV (1, 2, 3) varió entre 71,81% (FV2) y 71,95% (FV3) durante los períodos de aplicación de agua limpia y entre 65,60% (FV1) y 67,81% (FV3) durante los períodos de reposo.
- La humedad promedio de la biomasa de los FV (4, 5, 6) varió entre 32,77% (FV6) y 70,24% (FV4) durante los períodos de aplicación del agua residual y entre 66,18% (FV4) y 68,30% (FV5) durante los períodos de reposo.
- La humedad promedio de la biomasa de los FV (7, 8, 9) varió entre 24,06% (FV8) y 45,93% (FV7) durante los períodos de aplicación del agua residual y entre 53,81% (FV8) y 58,85% (FV7) durante los períodos de reposo.
- La humedad promedio de la biomasa de los FV (10, 11, 12) varió entre 22,65% (FV11) y 37,71% (FV10) durante los períodos de aplicación del agua residual y entre 56,19% (FV12) y 63,83% (FV10) durante los períodos de reposo.
- La humedad promedio de la biomasa de los FV (13, 14, 15) varió entre 77,64% (FV15) y 78,84% (FV13) durante los períodos de aplicación de agua limpia y entre 68,36% (FV13) y 71,29% (FV15) durante los períodos de reposo.

En la Tabla 50 se presentan los resultados promedio de las tasas de crecimiento, tanto en base húmeda como en base seca, expresadas en toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$) y agrupadas por tipo de filtros verdes y tipo de agua residual utilizada en la aplicación.

De la información condensada en la Tabla 50 se puede resumir:

1. Los filtros verdes sembrados con pasto vetiver y con aplicaciones de agua limpia (FV 1, 2, 3) presentaron las mayores tasas de crecimiento, tanto en materia fresca como en materia seca, durante el período de aplicación, con valores promedio de $31,99\ t\ ha^{-1}$ de materia fresca y $9,37\ t\ ha^{-1}$ de materia seca. Para los períodos de reposo las mayores tasas de crecimiento de la biomasa fresca se encontraron para los FV 10, 11 y 12 que operaron con la aplicación de mieles del Ecomill® y en los cuales se realizó la resiembra del material vegetal marchito afectado por las altas cargas orgánicas aplicadas y que presentó valores promedio, de $28,95\ t\ ha^{-1}$ en fresco. El mejoramiento en las condiciones del suelo en parámetros como la materia orgánica, pH y los macronutrientes N, P, K, favorecieron el crecimiento del material de resiembra y del que aún permaneció en los filtros verdes.
2. Los filtros verdes con vegetación natural y con aplicaciones de agua limpia (FV 13, 14, 15) presentaron tasas de crecimiento tanto en materia fresca como en materia seca, durante el período de aplicación, con valores promedio inferiores a los presentados por el pasto vetiver. Si bien, para el caso de la tasa de crecimiento de la materia fresca el valor fue de $30,80\ t\ ha^{-1}$ (sólo inferior en el 3,72% respecto a la presentada por el pasto vetiver), en términos de materia

Tabla 50. Tasas de crecimiento promedio de la vegetación de los filtros verdes durante el desarrollo de la investigación.

Filtro	Tasa crecimiento biomasa fresca ($t\ ha^{-1}$)				Tasa crecimiento biomasa seca ($t\ ha^{-1}$)			
	Promedio aplicaciones		Promedio reposo		Promedio aplicaciones		Promedio reposo	
FV1	29,40		17,44		8,63		6,63	
FV2	31,70	31,99	18,43	19,50	9,18	9,37	7,23	7,55
FV3	34,88		22,63		10,31		8,79	
FV4	22,68		16,82		7,18		5,90	
FV5	11,07	13,19	13,32	12,76	4,73	5,23	4,22	4,39
FV6	5,83		8,14		3,79		3,05	
FV7	6,18		11,47		3,70		8,35	
FV8	3,91	5,52	14,97	16,37	2,82	3,46	10,97	12,85
FV9	6,48		22,66		3,88		19,24	
FV10	4,64		34,22		3,55		22,24	
FV11	7,38	7,30	22,87	28,95	4,88	4,51	16,07	21,12
FV12	9,86		29,75		5,10		25,05	
FV13	33,02		14,92		7,35		5,69	
FV14	39,03	30,80	24,76	17,72	8,18	6,80	8,33	6,29
FV15	20,36		13,48		4,87		4,84	

seca, la tasa de crecimiento fue de $6,80 \text{ t ha}^{-1}$ (27,43% menor a la presentado por el pasto vetiver).

3. Para todos los filtros verdes que operaron con aplicación de agua limpia, las tasas de crecimiento tanto de la biomasa fresca como de la biomasa seca fueron mayores durante el período de aplicación (en el cual se suministraba agua cinco días a la semana) respecto al período de reposo (en el cual se suministraba agua un día a la semana).

4. Las tasas promedio de crecimiento del pasto vetiver, en base húmeda, en períodos de reposo bajo condiciones de invernadero, a las cuales operaron los filtros verdes (ZLD), fueron inferiores en un 10,02% a las encontradas en condiciones de cielo abierto y períodos de reposo para la misma localidad. En investigaciones anteriores se había registrado una tasa promedio de crecimiento de biomasa fresca a cielo abierto, durante los períodos de reposo, en Cenicafé-La granja de $18,06 \text{ t ha}^{-1}$ en 10 semanas ($25,80 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$) vs la registrada en los filtros ZLD de $19,50 \text{ t ha}^{-1}$ en 12 semanas ($23,21 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$). En términos de biomasa seca, la tasa de crecimiento del pasto vetiver bajo condiciones de invernadero fue $7,55 \text{ t ha}^{-1}$ en 12 semanas ($8,99 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$) vs $6,09 \text{ t ha}^{-1}$ en 10 semanas ($8,70 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$) encontrada a cielo abierto, es decir, sólo un 3,31% superior en los filtros verdes ZLD.

5. Las tasas promedio de crecimiento, en base húmeda, del pasto vetiver en los FV con aplicaciones de aguas residuales provenientes de la tecnología del tanque tina y bajo condiciones de invernadero (ZLD) fueron superiores a las encontradas cuando se operó bajo condiciones de cielo abierto en el 96,40% (tasa de crecimiento del $15,70 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ en ZLD vs $8,00 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ a cielo abierto). En términos de base seca, el crecimiento de la biomasa en los filtros ZLD fue superior en un 120,49% (tasa de crecimiento del $6,23 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ en ZLD vs $2,82 \text{ g m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ a cielo abierto).

6. Para los FV que operaron con la aplicación de aguas mieles del café, las menores tasas de crecimiento, tanto en biomasa fresca como en biomasa seca, durante los períodos de aplicación, se presentaron para los filtros verdes con aplicación de lixiviados provenientes de la mezcla pulpa y mucílago de la tecnología Becolsub, evidenciando en este tipo de agua residual un mayor efecto fitotóxico.

Análisis foliares de la biomasa cosechada. En las Tablas 51 a 55 se presentan los resultados de los análisis foliares realizados a la biomasa cosechada de los 15 filtros verdes antes y después de las aplicaciones de agua y al final del tercer período de reposo, agrupados por tipo de filtro verde y tipo de agua de aplicación.

De la información presentada en las Tablas 51 a 55 se puede resumir:

Los análisis foliares de la biomasa cosechada de vetiver de los FV 4, 5, 6 (con aplicación de aguas - mieles del café provenientes de la tecnología del tanque tina) mostraron incrementos superiores al 5% respecto a los valores encontrados en los FV 1, 2, 3 (con aplicación de agua limpia) en los parámetros K, Fe, Mn y Cu, decrementos superiores al 5% en los parámetros P, Ca, Mg y Zn. Mientras que, en los parámetros Cenizas, N y B no se presentaron diferencias superiores al 5%.

Tabla 51. Resultados de los análisis foliares de la biomasa de los filtros verdes (1, 2, 3) durante los períodos de aplicación y reposo.

Etapa	Parámetro										
	Cenizas	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B
	(%)						(mg kg ⁻¹)				
FV1											
Inicio Aplicación 1	8,26	1,22	0,18	1,94	0,29	0,16	163	76	31	14	20
Final Aplicación 1	11,33	1,03	0,18	2,45	0,34	0,13	247	82	22	8	4
Inicio Aplicación 2	7,12	1,43	0,20	1,89	0,34	0,14	62	79	16	6	1
Final Aplicación 2	8,98	1,04	0,21	1,41	0,27	0,16	201	77	20	4	7
Inicio Aplicación 3	8,46	1,39	0,23	1,61	0,34	0,14	67	87	16	7	5
Final Aplicación 3	10,28	1,27	0,22	1,56	0,43	0,19	123	93	18	6	5
Final Reposo 3	9,55	1,33	0,15	1,52	0,40	0,18	122	139	20	7	6
FV2											
Inicio Aplicación 1	9,58	1,40	0,14	2,03	0,30	0,13	174	71	30	16	18
Final Aplicación 1	13,00	1,14	0,19	3,17	0,49	0,18	257	68	26	9	8
Inicio Aplicación 2	11,79	1,83	0,29	2,83	0,71	0,25	196	96	36	12	15
Final Aplicación 2	8,41	1,29	0,14	1,22	0,31	0,16	172	42	14	4	8
Inicio Aplicación 3	10,04	1,56	0,26	1,77	0,51	0,22	102	92	24	6	9
Final Aplicación 3	11,03	1,61	0,24	1,37	0,67	0,29	276	66	21	6	14
Final Reposo 3	9,98	1,51	0,16	1,74	0,43	0,23	234	114	20	6	13
FV3											
Inicio Aplicación 1	9,18	1,18	0,15	2,11	0,34	0,14	129	64	27	16	15
Final Aplicación 1	14,05	1,21	0,23	3,11	0,42	0,17	327	115	31	9	7
Inicio Aplicación 2	9,50	1,23	0,17	2,17	0,36	0,16	90	68	18	5	1
Final Aplicación 2	8,55	1,46	0,14	1,22	0,28	0,21	76	51	15	3	23
Inicio Aplicación 3	9,83	1,49	0,19	1,74	0,44	0,29	119	86	19	6	7
Final Aplicación 3	11,76	1,74	0,27	1,62	0,50	0,45	275	67	21	6	7
Final Reposo 3	10,30	1,39	0,18	1,70	0,43	0,36	173	113	26	6	3

Los análisis foliares de la biomasa cosechada de vetiver de los FV 7, 8, 9 (con aplicación de lixiviados provenientes de la tecnología Becolsub) mostraron incrementos superiores al 5% respecto a los valores encontrados en los FV 1, 2, 3 (con aplicación de agua limpia) en los parámetros Cenizas, N, K, Fe, Mn, Zn, Cu y B y decrementos superiores al 5% en los parámetros P, Ca y Mg.

Los análisis foliares de la biomasa cosechada de vetiver de los FV 10, 11, 12 (con aplicación de mieles provenientes de la tecnología Ecomill®) mostraron incrementos superiores al 5% respecto a los valores encontrados en los FV 1, 2, 3 (con aplicación de agua limpia) en los parámetros Cenizas, N, K, Ca, Fe, Mn, Zn, Cu y B y decrementos superiores al 5% en los parámetros P y Mg. Los análisis foliares de la biomasa cosechada de los FV 13, 14, 15 que contenían vegetación

Tabla 52. Resultados de los análisis foliares de la biomasa de los filtros verdes (4, 5, 6) durante los períodos de aplicación y reposo.

Etapa	Parámetro										
	Cenizas	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B
	(%)						(mg kg ⁻¹)				
FV4											
Inicio Aplicación 1	8,68	1,40	0,16	1,67	0,29	0,11	1137	54	35	26	23
Final Aplicación 1	10,31	1,22	0,12	2,46	0,39	0,13	478	85	18	9	7
Inicio Aplicación 2	12,95	1,73	0,15	3,29	0,51	0,24	660	246	24	9	9
Final Aplicación 2	7,29	1,54	0,09	1,73	0,24	0,10	96	98	12	3	10
Inicio Aplicación 3	7,61	1,09	0,09	2,12	0,26	0,10	135	110	12	6	12
Final Aplicación 3	9,86	1,23	0,13	2,44	0,38	0,14	282	147	14	8	9
Final Reposo 3	9,48	1,29	0,12	2,00	0,17	0,08	218	100	13	8	3
FV5											
Inicio Aplicación 1	9,73	0,95	0,11	1,46	0,36	0,13	1209	119	31	25	21
Final Aplicación 1	14,85	1,30	0,13	2,06	0,51	0,16	1687	135	23	14	16
Inicio Aplicación 2	10,65	1,69	0,14	3,00	0,47	0,16	160	248	21	10	3
Final Aplicación 2	7,27	1,63	0,09	2,24	0,20	0,08	147	94	12	3	11
Inicio Aplicación 3	8,34	1,52	0,12	2,27	0,22	0,08	107	158	12	7	1
Final Aplicación 3	7,64	1,32	0,10	2,14	0,15	0,07	250	95	10	5	4
Final Reposo 3	9,02	1,32	0,12	2,23	0,20	0,07	94	114	12	6	2
FV6											
Inicio Aplicación 1	8,29	1,25	0,14	1,81	0,26	0,11	161	61	28	16	12
Final Aplicación 1	12,56	1,12	0,12	2,36	0,55	0,15	1253	233	22	10	11
Inicio Aplicación 2	9,57	1,48	0,12	2,59	0,40	0,13	99	257	17	8	5
Final Aplicación 2	6,50	1,32	0,08	1,75	0,22	0,08	202	142	10	4	14
Inicio Aplicación 3	8,51	1,78	0,14	2,28	0,22	0,08	144	130	13	7	2
Final Aplicación 3	13,36	1,02	0,12	2,39	0,42	0,17	1435	199	17	12	10
Final Reposo 3	9,49	1,35	0,11	2,55	0,21	0,08	130	121	13	7	7

natural de la zona y aplicación de agua limpia, mostraron incrementos superiores al 5% respecto a los valores encontrados en la biomasa cosechada de vetiver proveniente de los FV 1, 2, 3 (con aplicación de agua limpia) en los parámetros Cenizas, N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu y decrementos superiores al 5% en el parámetro B.

Cargas orgánicas e hidráulicas recomendadas en los filtros verdes para el manejo de las aguas residuales del café. Se logró determinar un efecto fitotóxico de las altas cargas orgánicas aplicadas de las aguas residuales del café sobre el pasto vetiver sembrado en los filtros verdes, lo cual se evidenció por la disminución en las tasas de crecimiento del pasto al compararlo con las tasas de crecimiento obtenidas en los filtros verdes sembrados con pasto vetiver y que operaron con aplicación de agua limpia.

Tabla 53. Resultados de los análisis foliares de la biomasa de los filtros verdes (7, 8, 9) durante los períodos de aplicación y reposo.

Etapa	Parámetro										
	Cenizas	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B
	(%)						(mg kg ⁻¹)				
FV7											
Inicio Aplicación 1	8,91	1,37	0,15	1,97	0,25	0,12	154	70	32	17	19
Final Aplicación 1	15,26	1,42	0,14	3,30	0,59	0,16	1530	258	30	16	15
Inicio Aplicación 2	12,13	1,62	0,18	3,85	0,35	0,19	115	270	22	11	6
Final Aplicación 2	8,16	1,26	0,07	2,28	0,25	0,12	161	114	12	4	7
FV8											
Inicio Aplicación 1	8,97	1,32	0,15	1,94	0,25	0,13	147	62	29	16	14
Final Aplicación 1	15,37	1,58	0,16	3,54	0,60	0,18	1371	186	42	17	15
Inicio Aplicación 2	14,00	1,82	0,20	4,82	0,49	0,19	178	322	23	13	25
Final Aplicación 2	7,85	1,21	0,06	1,85	0,23	0,08	485	155	11	5	17
FV9											
Inicio Aplicación 1	9,39	1,44	0,17	2,02	0,28	0,12	198	75	30	16	16
Final Aplicación 1	13,04	1,40	0,14	2,77	0,58	0,14	1331	223	31	12	13
Inicio Aplicación 2	9,01	1,62	0,13	2,58	0,25	0,10	70	235	14	8	8
Final Aplicación 2	7,18	1,37	0,12	1,29	0,40	0,13	1266	282	21	8	12

Tabla 54. Resultados de los análisis foliares de la biomasa de los filtros verdes (10, 11, 12) durante los períodos de aplicación y reposo.

Etapa	Parámetro										
	Cenizas	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B
	(%)						(mg kg ⁻¹)				
FV10											
Inicio Aplicación 1	8,98	1,23	0,16	1,92	0,31	0,14	227	74	32	19	16
Final Aplicación 1	14,79	1,92	0,20	2,66	0,69	0,16	1761	115	35	22	16
Inicio Aplicación 2	18,09	2,12	0,23	5,32	0,57	0,24	163	251	36	14	22
Final Aplicación 2	7,55	0,87	0,06	1,55	0,26	0,09	510	162	13	5	7
FV11											
Inicio Aplicación 1	9,28	1,26	0,14	1,82	0,40	0,14	338	79	32	16	15
Final Aplicación 1	13,47	1,75	0,21	3,06	0,75	0,17	1546	238	43	17	16
Inicio Aplicación 2	15,11	1,75	0,20	4,47	0,45	0,26	331	252	30	12	2
Final Aplicación 2	9,13	1,19	0,07	0,92	0,34	0,10	1681	156	24	10	15
FV12											
Inicio Aplicación 1	8,99	1,31	0,17	1,94	0,37	0,15	271	81	33	19	18
Final Aplicación 1	11,35	1,35	0,18	2,69	0,67	0,14	1243	165	43	16	5
Inicio Aplicación 2	10,60	1,57	0,15	2,98	0,21	0,11	73	261	17	7	4
Final Aplicación 2	7,91	1,06	0,08	0,75	0,23	0,08	1511	155	41	11	12

Tabla 55. Resultados de los análisis foliares de la biomasa de los filtros verdes (13, 14, 15) durante los períodos de aplicación y reposo.

Etapa	Parámetro										
	Cenizas	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B
	(%)						(mg kg ⁻¹)				
FV13											
Inicio Aplicación 1	17,07	1,65	0,33	3,44	0,57	0,38	314	91	47	13	11
Final Aplicación 1	24,90	1,94	0,59	6,23	0,79	0,46	483	140	54	17	7
Inicio Aplicación 2	15,27	1,54	0,30	3,70	0,56	0,29	591	114	40	12	7
Final Aplicación 2	10,34	1,05	0,18	1,50	0,37	0,21	264	63	30	5	27
Inicio Aplicación 3	12,79	1,80	0,29	3,34	0,49	0,30	145	53	33	11	3
Final Aplicación 3	13,85	1,40	0,33	2,37	0,53	0,42	292	71	48	8	3
Final Reposo 3	13,28	1,58	0,22	2,36	0,49	0,43	466	57	49	11	8
FV14											
Inicio Aplicación 1	16,62	1,42	0,32	3,10	0,59	0,35	292	112	43	11	8
Final Aplicación 1	25,07	1,33	0,48	5,90	0,67	0,35	269	169	39	12	4
Inicio Aplicación 2	13,74	1,27	0,39	2,84	0,48	0,26	270	114	42	9	13
Final Aplicación 2	10,24	1,10	0,19	1,53	0,38	0,19	183	55	30	3	9
Inicio Aplicación 3	15,07	1,43	0,25	2,56	0,64	0,26	160	128	27	7	0,4
Final Aplicación 3	13,11	1,29	0,29	2,16	0,49	0,31	124	66	35	6	3
Final Reposo 3	16,53	1,45	0,29	2,42	0,72	0,40	627	96	45	9	7
FV15											
Inicio Aplicación 1	15,34	1,57	0,35	2,76	0,52	0,32	275	105	42	11	9
Final Aplicación 1	19,66	1,76	0,42	4,41	0,76	0,31	458	136	43	14	7
Inicio Aplicación 2	11,84	1,32	0,44	2,84	0,49	0,28	128	110	49	9	7
Final Aplicación 2	9,54	1,23	0,20	1,38	0,33	0,20	266	65	36	5	1
Inicio Aplicación 3	14,11	1,59	0,37	2,40	0,51	0,32	344	109	39	9	10
Final Aplicación 3	11,96	1,37	0,26	1,77	0,55	0,31	180	84	31	6	10
Final Reposo 3	12,98	1,54	0,38	1,98	0,45	0,34	126	83	36	8	21

En la Figura 69 se graficó la tasa de crecimiento del pasto vetiver, en base seca, en g m²-d⁻¹ vs la carga orgánica aplicada, expresada como DQO, en g m²-d⁻¹ para los filtros verdes sembrados con pasto vetiver y con aplicación de los diferentes tipos de agua (agua limpia y diferentes tipos de aguas residuales del café).

A través de una ecuación polinómica de segundo grado (Ecuación <4>), con un coeficiente de determinación (R²) de 0,84, se pudo determinar que, para cargas orgánicas aplicadas, expresadas como DQO, de 1,20 kg m²-d⁻¹ se presenta una disminución en el 50% de la tasa de crecimiento del pasto vetiver (teniendo como referencia la tasa de crecimiento promedio alcanzada por el pasto vetiver, en filtros verdes con aplicaciones de agua limpia y que fue de 11,16 g secos/m²-d).

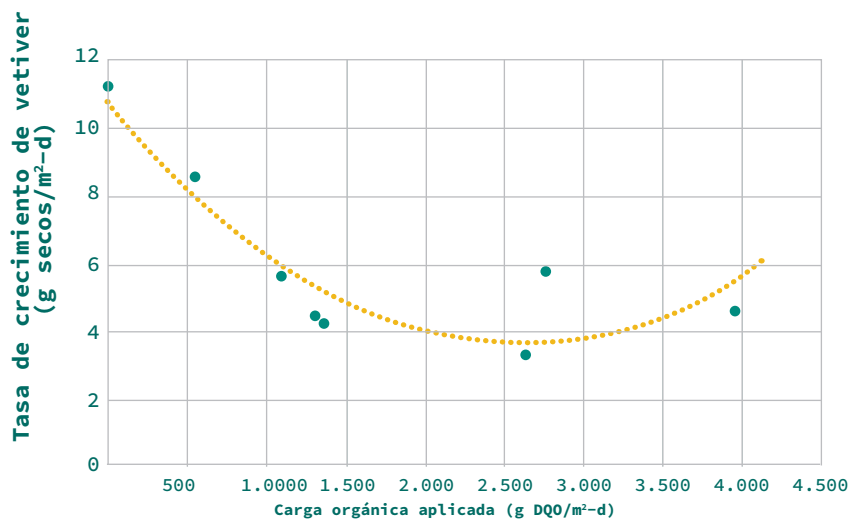


Figura 69. Relación entre la tasa de crecimiento de la biomasa y la carga orgánica aplicada en filtros verdes sembrados con pasto vetiver.

$$TC = 0,000001 * (CO)^2 - 0,0055 * (CO) + 10,769 \quad <4>$$

Donde:

TC = Tasa de crecimiento del pasto vetiver en g secos/m²-d

CO = Carga orgánica aplicada en g DQO/m²-d

Se determinó que puede aplicarse una carga orgánica máxima de aguas residuales del café, expresada como DQO, de hasta 1,20 kg m²-d¹ en filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana y sembrados con pasto vetiver, permitiendo el crecimiento de la vegetación en al menos el 50% respecto a la tasa de crecimiento encontrada utilizando agua limpia.

La carga orgánica encontrada en este estudio, para el diseño de filtros verdes sembrados con pasto vetiver y aplicaciones de aguas residuales del café, de 1,20 kg DQO/m²-d, es equivalente a un valor de 12 t DQO/ha-d. Investigaciones realizadas por Jewell et al. (1978) reportan que la capacidad máxima de asimilación orgánica de un suelo arenoso fue de 2 t DQO/ha-d a 16°C y de 20 toneladas DQO/ha-d a 20°C. Loehr et al. (1979) citados por Mokma (2006), reportan que algunos suelos tienen la capacidad de oxidar hasta 9 toneladas DQO/ha-d.

Para el caso de las cargas hidráulicas evaluadas en la presente investigación no se encontraron problemas de inundación, sobresaturación del suelo ni de lixiviación de sólidos, cuando se utilizaron cargas hidráulicas en el rango entre 20 y 60 mm d⁻¹, en filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana.

Carawan et al. (1979) expresan que el rango de cargas hidráulicas aplicadas a suelos por las aguas residuales generadas en 21 instalaciones de procesamiento de alimentos estuvo en el rango entre 2 a 140 mm d⁻¹. Por lo general, las cargas hidráulicas aplicadas a los filtros verdes oscilan entre 2 y 15 mm d⁻¹ (Mokma, 2006). Fuller y Warrick (1985), citados por Mokma (2006), reportan que un suelo arenoso que recibió una carga hidráulica de 76 mm d⁻¹ se saturó. Por lo tanto, la carga hidráulica y la carga de DQO son importantes en el diseño de un sistema natural de filtros verdes para el tratamiento de aguas residuales.

Se determinó que pueden aplicarse cargas hidráulicas de hasta 60 mm d⁻¹ de aguas residuales del café, en filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana y sembrados con pasto vetiver.

Área necesaria para la instalación de filtros verdes tipo cero descargas (ZLD). El área total necesaria para la instalación de un filtro verde, tipo invernadero, para cero descargas, se calcula en función del volumen de agua residual generada en el día pico de cosecha y en el cual debe incluirse: el agua utilizada en la clasificación hidráulica del fruto, el agua utilizada en el lavado del grano de café, el agua utilizada en el transporte del café lavado a los silos de secado y el agua de lavado de los equipos y en función de las tasas de retención de agua del suelo y de evapotranspiración de la vegetación sembrada en el filtro verde.

Para el caso de filtros verdes sembrados con pasto vetiver y operando con aguas residuales del beneficio del café se ha encontrado un valor promedio de tasas de retención - evapotranspiración de 23,8 mm d⁻¹.

El área necesaria de un filtro verde tipo ZLD para el manejo de las aguas residuales del café, se calcula a partir de la **Ecuación <5>**.

$$A_{FVC} = \frac{V_{ARC}}{23,8} \quad <5>$$

Donde:

A_{FVC} = Área necesaria del filtro verde para aguas residuales del café, en m².

V_{ARC} = Volumen de agua residual del café generada en el día pico, incluida el agua de transporte y clasificación, el agua de lavado del grano y el agua de lavado de equipos, en litros (L).

Es indispensable que el agua residual de café que se aplique a los filtros verdes sea sometida, como mínimo, a un tratamiento primario, con el fin de disminuir la carga orgánica y los sólidos (tanto suspendidos como totales) y evitar el taponamiento de las tuberías de conducción y de riego, durante la aplicación del agua al suelo del filtro verde.

No es recomendable la aplicación, sin tratamiento previo, de las mieles de la tecnología Ecomill® que se generen con volúmenes específicos de agua iguales o menores a 0,35 L kg⁻¹ cps (que son las que presentan las mayores cargas orgánicas, entre los diferentes tipos de aguas residuales generadas en el beneficio), dada su dificultad para realizar el riego por goteo y su alta carga orgánica que generaría fitotoxicidad en la vegetación presente en el filtro verde. La solución para el manejo de las mieles del Ecomill® en filtros verdes tipo ZLD es realizarles un tratamiento primario y adicionarles el agua residual generada en las etapas de clasificación hidráulica y transporte del fruto y del café lavado, así como las aguas residuales provenientes del lavado de equipos, estas adiciones no sólo disminuyen el valor de la carga orgánica, haciéndolas hábiles para el manejo en los filtros verdes, sino también que facilitan el manejo hidráulico y su aplicación como riego.

En caso de utilizar sólo las mieles de la tecnología Ecomill®, generadas con volúmenes específicos de agua iguales o menores a 0,35 L kg⁻¹ cps y sin tratamiento preliminar, estas deberán disponerse directamente sobre el suelo del filtro verde (sin la aplicación de riego), a una tasa hidráulica de máximo 10 mm d⁻¹ con el fin de que no generen fitotoxicidad sobre la vegetación del filtro verde, implicando la necesidad de un área mayor de filtro verde que puede calcularse a través de la [Ecuación <6>](#).

$$A_{FVM} = \frac{V_{ARE}}{10} \quad <6>$$

Donde:

A_{FVM} = Área necesaria del filtro verde para mieles del Ecomill® generadas, utilizando máximo 0,35 L de agua/kg cps, en m².

V_{ARE} = Volumen de mieles del café de la tecnología Ecomill® utilizando máximo 0,35 L de agua/kg cps, sin tratamiento preliminar y sin la adición de aguas de clasificación, transporte del fruto, del grano y del lavado de equipos, en el día pico, en litros (L).

Para el caso de filtros verdes sembrados con pasto vetiver y operando con aguas residuales de baja carga, como es el caso de las aguas residuales domésticas, puede utilizarse para su diseño el valor promedio de tasa de retención-*evapotranspiración* de 21,98 mm d⁻¹ encontrado para aguas limpias.

El área necesaria de un filtro verde tipo ZLD para el manejo de las aguas residuales domésticas, se calcula a partir de la **Ecuación <7>**.

$$A_{FVD} = \frac{V_{ARD}}{21,98} \quad <7>$$

Donde:

A_{FVD} = Área necesaria del filtro verde, en m^2 .

V_{ARD} = Volumen de agua residual doméstica generada en el día, en litros (L).

Consideraciones respecto a los resultados obtenidos en las evaluaciones piloto.

De acuerdo con las investigaciones a escala piloto de filtros verdes, tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana y sembrados con pasto vetiver para el manejo y tratamiento de las aguas residuales del café, se determinaron los parámetros necesarios para su diseño con el objetivo de lograr cero descargas y se determinó la variación de las propiedades químicas del suelo del filtro verde, con la aplicación de las aguas residuales, la tasa de crecimiento de la biomasa y su composición química. A continuación, se detallan los principales resultados:

- 1.** Los volúmenes retenidos y evapotranspirados de agua en los filtros verdes, tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana, sembrados con pasto vetiver y con aplicaciones de diferentes tipos de aguas residuales del beneficio del café (aguas residuales de la tecnología tanque tina, lixiviados de la tecnología Becolsub y mieles de la tecnología Ecomill®), calculados por lisimetría de drenaje, fueron en promedio de $23,55 \text{ L m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$.
- 2.** Los filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana, sembrados con pasto vetiver y con aplicaciones de diferentes tipos de aguas residuales del café, en promedio alcanzaron eficiencias de remoción de la contaminación orgánica del 69,45% para la Demanda Química de Oxígeno, 47,58% para los Sólidos Totales y del 80,59% para los Sólidos Suspendidos Totales.
- 3.** La instrumentación de los filtros verdes tipo invernadero permitió determinar, en aquellos sembrados con pasto vetiver y con aplicación de aguas residuales del café, un valor de evapotranspiración (ET) promedio de $23,69 \text{ mm d}^{-1} \pm 0,95$ y un valor de temperatura promedio del suelo a 30 cm de profundidad, de $25,02^\circ\text{C} \pm 0,04$.
- 4.** Se determinó que la aplicación periódica de las aguas residuales del café sobre filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana y sembrados con pasto vetiver, permite incrementar el valor de los parámetros del suelo: pH, conductividad eléctrica, N, materia orgánica, K, P, Fe, Mn, Cu, B y S. Para los parámetros Ca y Mg se observó un decremento en sus contenidos en el suelo por el efecto de la aplicación de las aguas residuales del café.

5. Se determinó que los filtros verdes tipo invernadero sembrados con pasto vetiver y con aplicaciones de agua limpia presentaron las mayores tasas de crecimiento de la vegetación, tanto en materia fresca como en materia seca, durante el período de aplicación, mientras que para los períodos de reposo las mayores tasas de crecimiento de la biomasa fresca se encontraron para los filtros verdes que operaron con la aplicación de mieles del Ecomill®. El mejoramiento en las condiciones del suelo en parámetros como la materia orgánica, pH y los macronutrientes N, P, K, causados por la adición de las aguas residuales del café, favorecieron el crecimiento del material vegetal.

6. A través de la experimentación se determinó un efecto fitotóxico de las altas cargas orgánicas de las aguas residuales del café aplicadas sobre el pasto vetiver en los filtros verdes, lo cual se evidenció en una disminución en las tasas de crecimiento del pasto al compararlo con la tasa de crecimiento obtenida en los filtros verdes que operaron con la aplicación de agua limpia.

7. Los análisis foliares de la biomasa de pasto vetiver cosechado de los FV con aplicación de aguas residuales del café mostraron incrementos superiores al 5% respecto a los valores encontrados en la biomasa de los filtros verdes con aplicación de agua limpia, en los parámetros K, Fe, Mn y Cu, y decrementos superiores al 5% en los parámetros P y Mg.

8. Se determinó que para cargas orgánicas aplicadas mayores a 1,20 kg de DQO/m²-d se presenta una disminución en más del 50% de la tasa de crecimiento del pasto vetiver, teniendo como referencia la tasa de crecimiento promedio alcanzada por el pasto vetiver en filtros verdes con aplicaciones de agua limpia, que fue de 11,16 g secos/m²-d.

9. Se determinó que pueden aplicarse cargas hidráulicas de hasta 60 mm d⁻¹ de aguas residuales del café, en filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana y sembrados con pasto vetiver, dado que no se encontraron inconvenientes de inundaciones, sobresaturación del suelo ni lixiviación de sólidos del mismo.

10. El área total necesaria para la instalación de un filtro verde tipo invernadero para cero descargas se calcula en función del volumen de agua residual generada en el día pico de cosecha y en el cual debe incluirse el agua utilizada en la clasificación hidráulica del fruto, en el lavado del grano de café, en el transporte del café lavado a los silos de secado y en el lavado de los equipos y en función de las tasas de retención de agua del suelo y de evapotranspiración de la vegetación sembrada en el filtro verde.

11. Es indispensable que el agua residual de café que se aplique a los filtros verdes sea sometida a un tratamiento primario, como mínimo, con el fin de disminuir su carga orgánica y los sólidos (tanto suspendidos como totales) y evitar el taponamiento de las tuberías de conducción y de riego, durante la aplicación del agua al suelo del filtro verde.



Diseño y construcción de un filtro verde con cero descargas (ZLD) para las aguas residuales del beneficio del café

Los filtros verdes con cero descargas se caracterizan por tener los siguientes elementos: 1. Unidad para el tratamiento primario, a la cual llegan las aguas residuales del café; 2. Unidad de aplicación del agua pre-tratada, a la cual llegan las aguas provenientes del tratamiento primario y las aguas provenientes de la unidad de drenados; 3. Área para el desarrollo de la vegetación, la cual debe estar impermeabilizada; 4. Cobertura plástica tipo invernadero, para impedir el ingreso del agua lluvia y favorecer los procesos de evapotranspiración; 5. Sistema de aplicación del agua residual; 6. Unidad de drenados para recibir el agua no evapotranspirada proveniente del área cultivada.

Se recomienda que el filtro verde se instale aguas abajo del beneficiadero, con el fin de poder conducir las aguas residuales por gravedad. A continuación, se describen y dimensionan cada uno de los componentes de un filtro verde con cero descargas (ZLD) para las aguas residuales del café.

Unidad para el tratamiento primario de las aguas residuales del café

Tiene como objetivo eliminar una parte del material particulado presente en las aguas residuales, con el fin de disminuir el valor de la carga orgánica aplicada al área con vegetación y favorecer el manejo del agua residual para la aplicación como riego, disminuyendo los riesgos de taponamiento de las tuberías de aplicación y espaciando más, en el tiempo, su frecuencia de mantenimiento. Su capacidad debe ser el doble del volumen de agua generada en el día pico (para evitar derrames). Por durabilidad y costo se recomienda que sea un tanque en polietileno. En las Figuras 70 y 71 se presenta el aspecto de esta unidad, la cual consta de un alimentador



Figura 70. Aspecto del dispositivo interno para el tratamiento primario de las aguas residuales del café.



Figura 71. Aspecto del agua residual en el tanque de tratamiento primario.

circular de flujo laminar a la entrada de la misma y de un cuello de ganso para la salida del agua tratada. La descripción y elaboración de los dispositivos internos de esta unidad se detallan en el Boletín Técnico de Cenicafé No. 42 (Rodríguez et al., 2019).

Por ejemplo, si en una finca cafetera se determina que la mayor cantidad de agua residual generada en el día (durante la época de cosecha) es de 2.500 L, se recomienda que la capacidad del tanque de tratamiento primario sea de 5 m³.

Unidad de aplicación del agua pre-tratada

Tiene como objetivo recibir el agua pre-tratada (proveniente del tratamiento primario) y las aguas provenientes del tanque de drenados, ubicado en la parte baja del filtro verde, con el fin de realizar la aplicación mediante riego sobre el área cultivada del filtro verde. Su capacidad, como mínimo, debe ser igual al volumen del agua generada en el día pico. Se recomienda que sea un tanque en polietileno. En las Figuras 72 y 73 se presenta el aspecto de esta unidad, la cual consta de un dispositivo flotante de cabeza de presión constante con sistema de filtración. La descripción y elaboración de los dispositivos internos de esta unidad se detallan en el Boletín Técnico de Cenicafé No. 42 (Rodríguez et al., 2019).

Por ejemplo, si en una finca cafetera se determina que la mayor cantidad de agua residual generada en el día (durante la época de cosecha) es de 2.500 L, se recomienda que la capacidad del tanque de aplicación de agua residual pretratada sea de 3 m³.

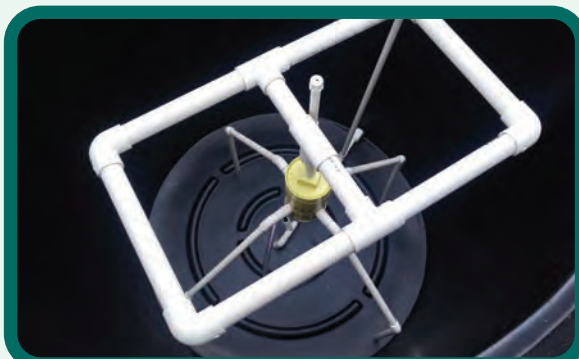


Figura 72. Aspecto del dispositivo interno en la unidad de aplicación del agua pre-tratada.



Figura 73. Aspecto del agua residual pre-tratada presente en el tanque de aplicación.

Área para la aplicación del agua residual y el desarrollo de la vegetación

Tiene como objetivo retener y evapotranspirar el agua residual a través de procesos físicos y biológicos. El área necesaria de un filtro verde tipo ZLD para el manejo de las aguas residuales del café, se calcula a partir de la Ecuación <5>, en función del volumen de agua residual del café generada en el día pico, incluida el agua de transporte y clasificación, de lavado del grano y lavado de equipos y en función de las tasas promedio de retención de humedad del suelo y de evapotranspiración de la vegetación sembrada, que para el caso de suelos de la zona cafetera y pasto vetiver sembrado bajo invernadero tiene un valor de 23,8 mm d⁻¹ y que para efectos prácticos de diseño se puede aproximar al número entero más cercano, es decir, 24.

Para el ejemplo, en el cual se genera un volumen de agua residual de 2.500 L (en el día pico), el área necesaria del filtro verde para el establecimiento de la vegetación y la aplicación del agua residual sería: $A = V/24$, $A = 2.500 L/24$, $A = 105 m^2$.

Para la delimitación del terreno y la profundidad de la excavación se recomienda fijar el ancho del filtro verde en 5,0 m y su profundidad en 0,70 m, con el fin de optimizar el uso de la geomembrana que se requiere para su impermeabilización, que normalmente viene con un ancho comercial de 7,0 m.

Dado que el ancho se fija en 5 m, la longitud (L) del filtro verde sería: $L = \text{Área} / \text{Ancho} = 105 m^2 / 5 m = 21 m$.

Por lo tanto, debe delimitarse y aplanarse un área de 5 m x 21 m y realizar una excavación de 0,7 m de profundidad (Figura 74).



Figura 74. Delimitación y aplanamiento del área para la construcción de un filtro verde.

En el momento de realizar la excavación, se deben separar los perfiles del suelo, dado que después de retirar el suelo e impermeabilizar la excavación, es necesario volver a incorporar el suelo para la siembra de la vegetación, siendo importante mantener el perfil original del suelo. Por lo tanto, se recomienda colocar en uno de los lados de la excavación las primeras capas de suelo y en el lado opuesto las capas más profundas (Figura 75). Una vez instalada la geomembrana, se adiciona primero

el suelo que se retiró de las capas más profundas y luego el suelo que se retiró de las capas superficiales.

Una vez lista la excavación de 0,70 m, debe construirse un canal central, con una pendiente máxima del 1,0% (Figura 75), en el cual debe ubicarse la tubería de aireación y recolección de drenados (tubería PVC-S de 3”), los cuales serán conducidos a un tanque de recolección, para posteriormente ser llevados a la unidad de aplicación (en la cual se mezclan con el agua residual pre-tratada para ser incorporados de nuevo al suelo del filtro verde).

Después de realizado el canal central, se procede a la impermeabilización de la excavación (fondo del filtro verde) con el fin de evitar la infiltración del agua residual aplicada.

Se recomienda (considerando aspectos técnicos y económicos) la utilización de geomembrana de 20 mils, la cual tiene más resistencia mecánica que el plástico agrobblack calibre 6 y menor precio que geomembranas de calibres superiores (geomembranas entre 30 y 80 mils) y que presenta unas propiedades fisico-mecánicas que la hacen apropiada como material impermeabilizante. En la Tabla 56 se presenta una comparación de los diferentes tipos de materiales que se utilizan para impermeabilizar el suelo.

Para la instalación de la geomembrana se recomienda que el suelo de la excavación esté libre de piedras o algún material corto-punzante que pueda ocasionar ruptura a la geomembrana y que el personal que la manipule, al interior de la excavación, lo realice sin calzado (en calcetines) para evitar algún tipo de daño en el material impermeabilizante. En la Figura 76 se detalla la instalación de la geomembrana para la impermeabilización de la excavación.

La tubería PVC-S de 3” que se utiliza para la aireación del filtro verde y la recolección de los drenados debe estar perforada en la mitad superior de su circunferencia con agujeros de



Figura 75. Excavación del área delimitada del filtro verde hasta 0,7 m de profundidad.

5/16” (Figura 77), la otra mitad (que está sin perforaciones) se introduce en el canal central, ya impermeabilizado con la geomembrana, para conducir los drenados generados hacia el tanque instalado para este fin.

Para facilitar la salida de los drenados del área impermeabilizada, en el extremo de descarga del tubo PVC-S de 3”, se coloca una unión PVC-S de 3”, una reducción PVC-P de 3” a 2”, un adaptador macho PVC-P de 2” con una

Tabla 56. Características de algunos materiales impermeabilizantes. *Fuente:* Adaptado de Productos Químicos Andinos [PQA] (2021).

Parámetro	Agroblack Esp 6	Geomembrana				
Descripción	Lámina coextruída estabilizada con níquel y antioxidante.	Lámina soplada estabilizada con antioxidantes que le confieren una alta resistencia a los químicos y una excelente duración (recomendada para reservorios de agua).				
Composición	Polietileno de baja densidad; pigmento.	Polietileno de alta densidad; pigmento, antioxidantes.				
Tonalidad	Negro	Negro				
Coextrusión	Tres y cinco capas	-				
Propiedades ópticas y térmicas						
Termicidad	85%	-				
Bloqueo UV	Total	> 80				
Parámetro	Agroblack Esp 6	Geomembrana (mils)				
		20	30	40	60	80
Ancho	Hasta 12 m	7,0 m				
Propiedades mecánicas (mínimo)						
Espesor promedio	0,15 mm	0,45 mm	0,68 mm	0,90 mm	1,35 mm	1,80 mm
Resistencia al impacto	4,91 N	-	-	-	-	-
Resistencia al rasgado dirección máquina	7,85 N	-	-	-	-	-
Resistencia al rasgado dirección transversal	8,83 N	62 N	93 N	125 N	187 N	250 N
Carga a la rotura dirección máquina	18,0 Mpa					
Carga a la rotura dirección transversal	18,0 Mpa					
Resistencia a la rotura	-	15 KN m ⁻¹	22 KN m ⁻¹	28 KN m ⁻¹	44 KN m ⁻¹	57 KN m ⁻¹
Resistencia en el punto de fluencia	-	8 KN m ⁻¹	11 KN m ⁻¹	15 KN m ⁻¹	22 KN m ⁻¹	29 KN m ⁻¹
Resistencia al punzonado	-	203 N	300 N	375 N	498 N	645 N



Figura 76. Instalación de la geomembrana para impermeabilizar la excavación del filtro verde.



Figura 77. Aspecto de la tubería de aireación y conducción de drenados.

arandela de neolite con agujero interno de 2", se perfora la geomembrana y por la parte exterior de la misma se coloca una arandela de neolite con agujero interno de 2" y un adaptador hembra PVC-P de 2" (Figura 78).

Con el fin de facilitar la aireación del suelo del filtro verde, se recomienda la instalación de tees PVC-S de 3" cada 3 m, en la tubería de aireación y drenaje, y ubicar en ellas tramos de 1,5 m de tubería PVC-S de 3" que permitan el ingreso del aire desde la parte superior del filtro verde. Para el caso del extremo superior del tubo de aireación y drenaje, en lugar de una Tee se coloca un codo PVC-S de 3" (Figura 79).

Con el fin de evitar el taponamiento de la tubería de aireación y conducción de drenados, se recomienda cubrirla (en su base) con polisombra y aplicar (solo en el ancho del canal central) gravilla, tal como se ilustra en la Figura 80.

Posteriormente, se realiza el llenado de la excavación agregando primero las capas de suelo más profundas (las últimas que se retiraron de la excavación) y luego las capas más superficiales (las primeras que se retiraron de la excavación), con el fin de mantener el perfil original del suelo (Figura 81).

Durante el llenado de la excavación deben instalarse las columnas que se consideren necesarias y que sirvan de soporte para la instalación del techo, y que deban estar ubicadas en el área



Figura 78. Accesorios necesarios para la salida de los drenados del área cultivada del filtro verde.



Figura 79. Aspecto de la instalación de los tubos verticales de aireación acoplados a la tubería de aireación y conducción de drenados.

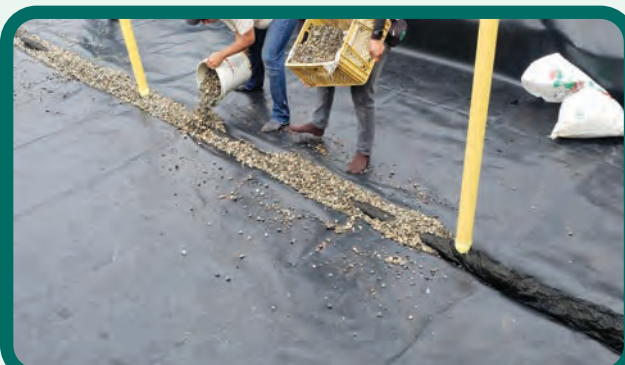


Figura 80. Tubería de aireación y conducción de drenados cubierta con polisombra y gravilla en el canal central.

con vegetación. Para ello, se recomienda utilizar tramos de 1,0 m de longitud de tubería PVC-S de 6" a la cual se le fija en el extremo inferior, con soldadura PVC, un tapón de solo pruebas que descansará sobre el fondo del filtro verde (Figura 82), luego se adicionan dentro del tubo 10 cm de arena y sobre esta base se ubica la guadua, con la longitud requerida para el soporte del techo, adicionando arena para rellenar el espacio vacío entre el tubo y la guadua (Figura 83). De esta forma se evita el pudrimiento de la guadua por la alta humedad del suelo del filtro verde. En la Figura 84 se presenta la estructuración para el soporte del techo del filtro verde.

Una vez llena la excavación, se continúa con la siembra del material vegetal. Para el manejo de las aguas residuales del café se recomienda utilizar esquejes de pasto vetiver (un esqueje es una parte de la planta que tiene 10 cm de tallo y 5 cm de raíz) (Figura 85). Los esquejes se siembran en cuadro, cada 30 cm, tres esquejes por sitio (Figura 86).

Con el fin de facilitar el manejo de la vegetación deben hacerse cortes periódicos a una altura de 50 cm; se recomienda dejar un camino central, de por lo menos 60 cm sin siembra, que sirva para el desplazamiento del personal para realizar la poda del pasto y realizar mantenimiento a la tubería de riego (Figura 87).

Se recomienda sembrar el pasto vetiver por lo menos 6 meses antes de iniciar con la operación del filtro verde, con el



Figura 81. Llenado de la excavación del filtro verde manteniendo el perfil original del suelo.



Figura 82. Aspecto del tubo PVC-S que contiene la guadua de soporte del techo.



Figura 83. Relleno, con arena, del espacio vacío entre la guadua de soporte del techo y el tubo PVC-S que la protege de la humedad.

fin de asegurar su desarrollo y realizar las resiembras del material vegetal que no se haya desarrollado.

Para facilitar los procesos de evapotranspiración en los filtros verdes se recomienda incorporar, en el área de cultivo, tubos de aireación a lo largo del área sembrada (Figura 88). Se recomienda instalar hileras de aireadores a 1,25 m de cada orilla y separados entre sí, a lo largo del filtro verde, cada 3 m, enterrados 60 cm, fabricados en tubería PVC-S de 1 ½", con perforaciones de 5/16" a lo largo de toda el área enterrada y que sobresalgan del suelo 90 cm (altura total del aireador 1,50 m). Los aireadores deben estar cubiertos con polisombra en su área enterrada para evitar el ingreso del suelo al interior del tubo.



Figura 84. Aspecto de la estructura del soporte para el techo del filtro verde.



Figura 87. Aspecto final de la siembra del pasto vetiver con camino central, sin siembra, de 60 cm de ancho, para favorecer las labores de mantenimiento.



Figura 85. Esquejes de pasto vetiver para la siembra en el área de vegetación del filtro verde.



Figura 86. Siembra de los esquejes del pasto vetiver sobre el área del filtro verde.



Figura 88. Aspecto de los aireadores ubicados dentro del área de cultivo del filtro verde.

Cobertura plástica, tipo invernadero

Tiene como objetivo impedir el ingreso del agua lluvia al filtro verde y facilitar el incremento de la temperatura al interior del mismo para favorecer los procesos de evapotranspiración del agua residual. Se recomienda ubicarla a una altura de 2,0 m.

Una vez establecido el pasto vetiver, se realiza el techado del filtro verde en plástico agrolene calibre 7 o superior y se hace el cerramiento completo del área sembrada, en plástico,

dejando una pestaña libre de 20 cm en la parte superior de las paredes para permitir la salida del aire húmedo y caliente presente en el interior del filtro (Figura 89).



Figura 89. Techado y cerramiento del área de siembra del filtro verde utilizando plástico agrolene.

Sistema de aplicación del agua residual

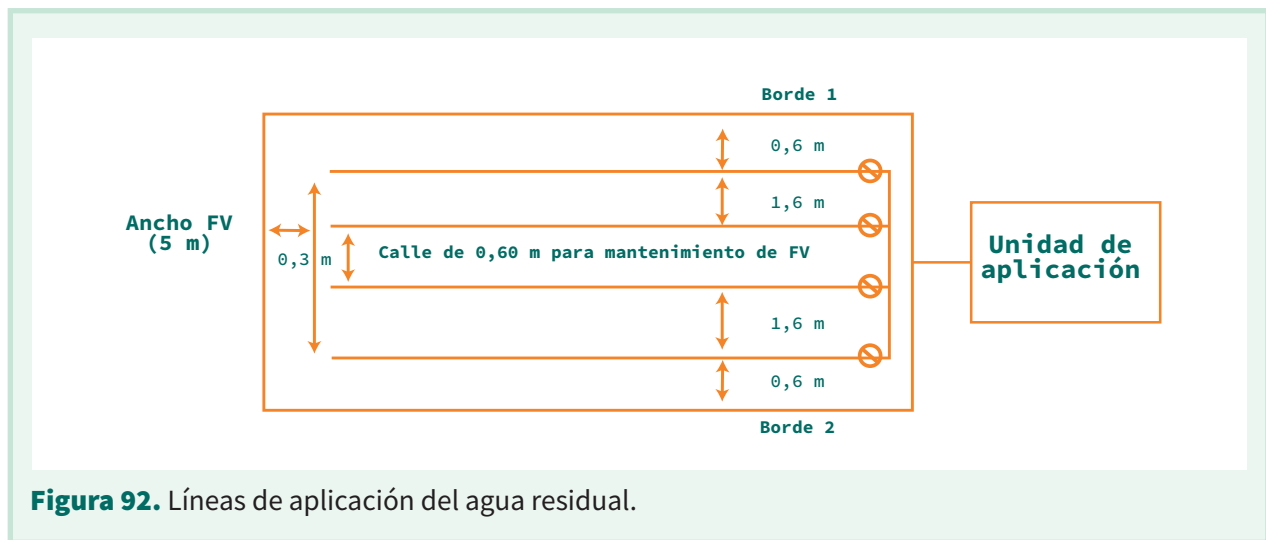
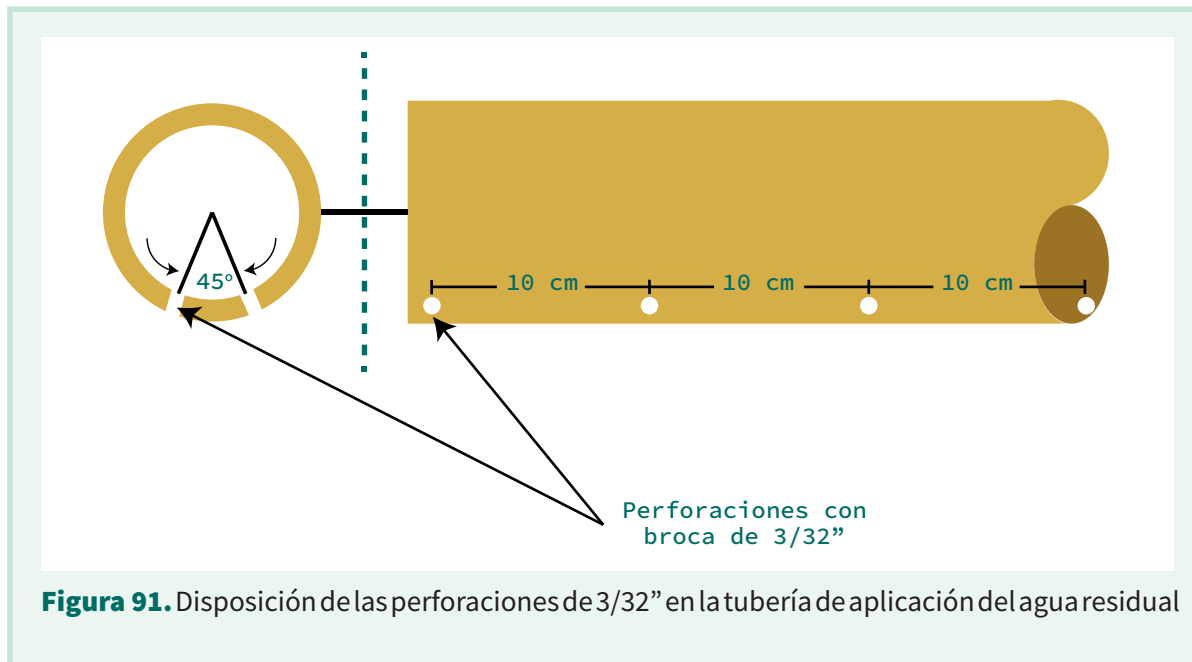
Tiene como objetivo distribuir uniformemente el agua residual sobre el área cultivada del filtro verde. Para la aplicación del agua residual sobre el área cultivada del filtro verde, a partir de la unidad de aplicación debe canalizarse el agua, utilizando tubería PVC-P de $\frac{1}{2}$ " , a la cual se le realizan perforaciones de $\frac{3}{32}$ " (Figura 90) separadas cada 10 cm, dos líneas en la parte inferior de la circunferencia del tubo, en ángulo de 45° y con un traslape de 5 cm entre las dos líneas de perforaciones (Figura 91).



Figura 90. Perforaciones de $\frac{3}{32}$ " realizadas en la tubería de aplicación del agua residual.

Deben instalarse cuatro líneas de riego (Figura 92), levantadas a 25 cm del suelo y fijadas al mismo utilizando soportes para asegurar su nivelación (Figura 93). Al principio de cada línea debe colocarse una llave de paso PVC-P de $\frac{1}{2}$ " con el fin de controlar el caudal de salida hacia el área con vegetación.

Como complemento a las perforaciones de $\frac{3}{32}$ " en la tubería de riego, se recomienda elaborar canales de riego en la parte superior de la tubería PVC-P de $\frac{1}{2}$ " de 2 cm de ancho y 5 cm de largo, espaciados cada 20 cm, para



cuando se presenten obstrucciones en las perforaciones, por lo que el agua residual aplicada pueda fluir por rebose (Figura 94).

El filtro verde debe permanecer inundado para favorecer los procesos de evapotranspiración. Por lo tanto, a la salida de la tubería de aireación y drenaje (una vez perforada la geomembrana), se acopla al adaptador hembra PVC-P de 2", un tramo de 15 cm de longitud de tubo PVC-S de



Figura 93. Aspectos de los soportes para la nivelación de la tubería de riego.



Figura 94. Canales de descarga, por rebose, de la tubería de riego.

2", un codo PVC-S de 2", un tramo de 50 cm de longitud de tubo PVC-S de 2", una unión PVC-S de 2" y una reducción de PVC de 2" a 1 1/2" y allí se instala la unidad de control de inundación que está conformada por dos llaves PVC-P de 1 1/2", una instalada a nivel de piso y otra a 60 cm de altura. La primera sirve para realizar mantenimiento y eliminar lodos adheridos en la tubería de descarga de drenados y la segunda sirve para mantener el nivel de inundación dentro del filtro verde a 60 cm de altura (Figura 95). El agua drenada que supera el nivel de inundación se conduce a un tanque de drenados para ser incorporada a la unidad de aplicación. Durante la operación del filtro verde la primera llave debe permanecer cerrada y la segunda llave debe permanecer abierta.



Figura 95. Esquema del sistema de control de inundación del filtro verde.

Unidad de drenados

Tiene como objetivo recibir los drenados que puedan generarse en el área cultivada. Aunque, el diseño del filtro verde se realiza considerando la evapotranspiración completa del agua residual aplicada, este proceso está influenciado por la temperatura ambiente. Para días fríos, lluviosos o con poco sol, es probable que no se pueda evapotranspirar toda el agua aplicada y que una parte sea drenada, por lo que es necesario recogerla para volverla a aplicar al área cultivada del filtro verde y así alcanzar el objetivo de cero descargas.

Se recomienda que su capacidad de almacenamiento sea igual al volumen de agua generado en el día pico. Puede disponerse de un solo tanque con esta capacidad o de varios tanques más pequeños, conectados en serie, cuyos volúmenes sumados sean equivalentes. Se recomienda utilizar tanques en polietileno, por costos y durabilidad.

Por ejemplo, si en una finca cafetera se determina que la mayor cantidad de agua residual generada en el día (durante la época de cosecha) es de 2.500 L, se recomienda que la capacidad del tanque de la unidad de drenados sea de 3 m³.

En la Figura 96 se presenta el aspecto de la unidad de drenados.

El agua recolectada en la unidad de drenados deberá ser llevada por acarreo o mediante bombeo a la unidad de aplicación para ser incorporada nuevamente al área con vegetación del filtro verde, hasta agotamiento total.



Figura 96. Aspecto y localización de la unidad de drenados.

Diseños alternativos y complementarios para minimizar el tamaño de los filtros verdes

A continuación, se presentan algunas alternativas de manejo de las aguas residuales del beneficio del café que permiten implementar filtros verdes (ZLD) de menor tamaño.

Diseño alternativo para usuarios de las tecnologías Becolsub y Ecomill®. Los productores que realicen el beneficio ecológico del café utilizando las tecnologías Becolsub y Ecomill®, pueden adicionar el mucílago del café o las mieles del Ecomill® en el procesador de pulpa, buscando retener los sólidos suspendidos y parte del volumen de la solución mucílago-agua o mieles en la pulpa. Los lixiviados generados pueden adicionarse nuevamente sobre la pulpa hasta agotamiento, o llevarlos a la unidad de tratamiento primario (a esta unidad de aplicación también deben conducirse las aguas de la clasificación y transporte del fruto y del café lavado y el agua de lavado de equipos) y luego llevarlos a la unidad de aplicación de un sistema de filtros verdes para ser incorporados al área sembrada. (Figura 97). El tamaño del filtro verde se calcula con base a los volúmenes de lixiviados y aguas de clasificación y transporte del fruto y del café lavado y el agua de lavado de equipos generadas en el día pico.

Tener en cuenta que los lixiviados generados durante el proceso de descomposición de la pulpa mezclada con mucílago o con mieles, deben incorporarse al procesador conteniendo pulpa fresca o en su defecto llevarlos al tanque de tratamiento primario del filtro verde.

Diseño alternativo para usuarios de la tecnología tanque tina. Los productores que realicen el beneficio ecológico del café utilizando la tecnología del tanque tina pueden adicionar en el procesador de pulpa los dos primeros enjuagues (con un volumen de 2,2 L y que representan aproximadamente el 89% de la contaminación total de las aguas mieles), buscando

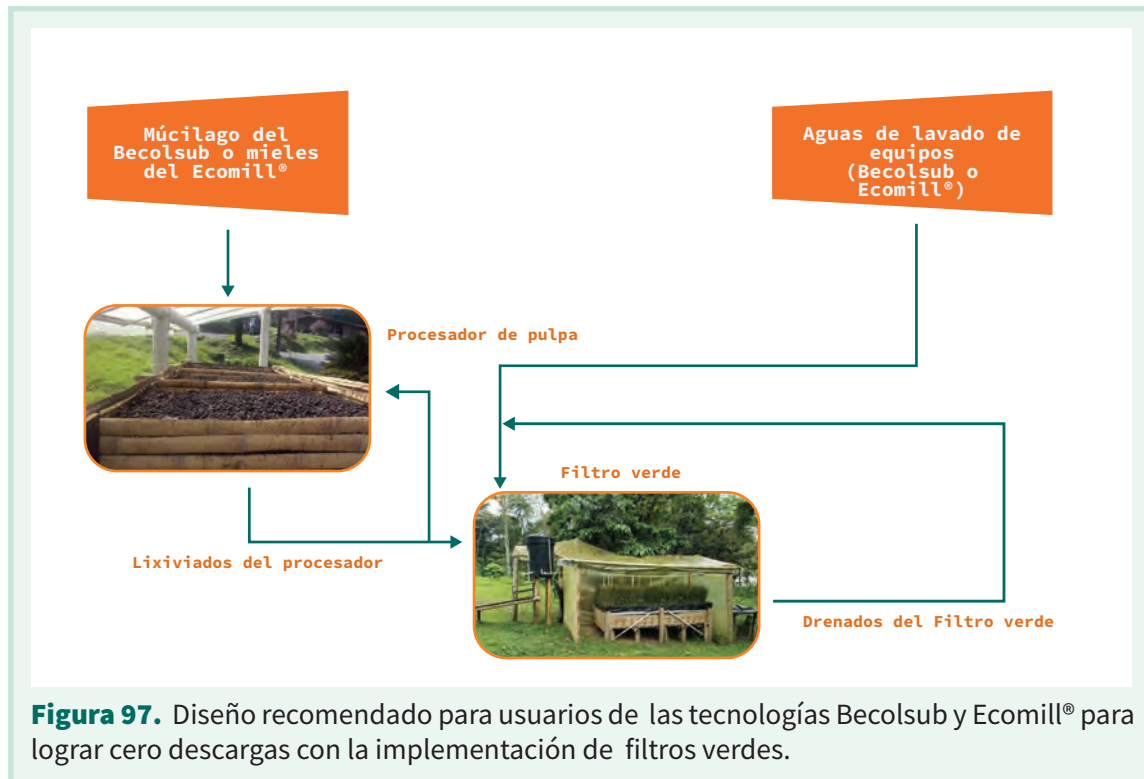


Figura 97. Diseño recomendado para usuarios de las tecnologías Becolsub y Ecomill® para lograr cero descargas con la implementación de filtros verdes.

retener los sólidos suspendidos y parte del volumen del agua residual. Los lixiviados generados pueden adicionarse nuevamente sobre la pulpa hasta agotamiento, o llevarlos a la unidad de tratamiento primario (a esta unidad también deben conducirse los dos últimos enjuagues, las aguas de la clasificación y transporte del fruto y del café lavado y el agua de lavado de equipos) y luego llevarlos a la unidad de aplicación de un sistema de filtros verdes para ser incorporados al área sembrada (Figura 98). El tamaño del filtro verde se calcula con base a los volúmenes de lixiviados y los dos últimos enjuagues y las aguas de la clasificación y transporte del fruto y del café lavado y el agua de lavado de equipos generadas en el día pico.

Diseño complementario para productores con sistemas de tratamiento. Los productores que ya tengan instalados sistemas de tratamiento de las aguas residuales del café y deseen eliminar los costos legales ambientales implementando un filtro verde con cero descargas (ZLD), pueden llevar directamente las aguas tratadas al filtro verde. Las aguas de la clasificación y transporte del fruto y del café lavado y del lavado de equipos deberán ser conducidas a la unidad de aplicación para ser incorporados al área sembrada (Figura 99). El tamaño del filtro verde se calcula con base a los volúmenes de agua tratada y de agua de clasificación y transporte del fruto y del café lavado y del lavado de equipos generadas en el día pico.



Figura 98. Diseño recomendado para usuarios de la tecnología del tanque tina para lograr cero descargas con la implementación de filtros verdes.



Figura 99. Diseño recomendado para productores con planta de tratamiento, con el fin de lograr cero descargas con la implementación de filtros verdes.



Implementaciones a escala de campo de filtros verdes con cero descargas (ZLD)

Cenicafé, sede La Granja

Objetivo: Instalar un filtro verde tipo ZLD a continuación del sistema anaerobio de tratamiento de aguas residuales del café con el objetivo de tener cero descargas.

El filtro verde se instaló en Cenicafé sede La Granja, ubicada en el municipio de Manizales (Caldas), a 1.310 m de altitud, temperatura media de 21,6°C, humedad relativa media de 80,3%, precipitación anual de 2.470,9 mm y brillo solar de 1.440,9 h (Cenicafé, 2021).

En Cenicafé sede La Granja, el beneficio del café se realiza mediante la utilización de un lavador mecánico, tecnología Ecomill®, desarrollada por Cenicafé (Oliveros et al., 2013) que utiliza entre 0,3 y 0,5 L agua/kg cps.

Este beneficio ecológico del café utilizando la tecnología Ecomill® presenta entre otras las siguientes características (Rodríguez et al., 2015): A. El despulpado y transporte de la pulpa se realiza sin agua; B. La eliminación del mucílago fermentado se realiza de forma mecánica, utilizando lavadores mecánicos; C. Permite lavar y clasificar el café, con consumo específico de agua inferior a 0,5 L kg⁻¹ de cps; D. La descomposición de la pulpa se realiza en un procesador, con el área correspondiente a la producción y debidamente techado; E. Al procesador de pulpa se adicionan las mieles provenientes del Ecomill®, en el cual se retiene aproximadamente el 50% de las mieles, el 50% restante se lleva a tratamiento en un Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA).

Los volúmenes de café beneficiado y de agua utilizada se detallan a continuación:

- Producción anual: 12.000 @ de cps al año.
- Día de máxima producción (día pico): 3,0% de la producción anual.
- Agua utilizada en el beneficio: 0,5 L kg⁻¹ de cps.
- Volumen de agua generada/kg de cps: 1,22 L.
- Volumen de agua residual a tratar/kg de cps: 0,61 L.
- Volumen de agua residual a tratar en el día de máxima producción: 2.745 L.

Con el fin de evitar vertimientos al suelo o a cuerpos de agua del efluente del SMTA instalado en Cenicafé La Granja, se implementaron a continuación de la etapa de metanogénesis, dos tanques de almacenamiento (unidad de aplicación del filtro verde) de 5 m³, cada uno, para las aguas tratadas del SMTA y a continuación de los tanques se construyeron dos filtros verdes, de 100 m² cada uno, tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana de 20 mils (para asegurar que no se presentara infiltración en el suelo del agua tratada) y sembrados con pasto vetiver.

Para la recolección de los drenados, se realizó una canalización desde el área cultivada del filtro verde hasta un tanque final con capacidad de 5 m³. El agua recolectada se bombeó, utilizando

una bomba sumergible hasta un tanque de almacenamiento de 5 m³ ubicado junto a los dos tanques de 5 m³ que alimentan los filtros verdes, para ser incorporada de nuevo.

Los pasos que se siguieron para la adecuación de la infraestructura existente y para la construcción de los filtros verdes se presentan a continuación:

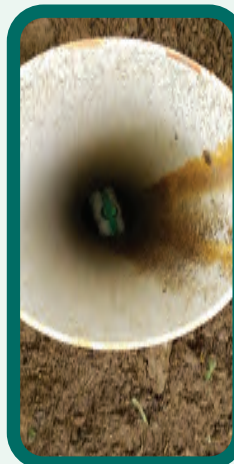
- 1. Cambio y acondicionamiento de los tanques de recibo de los lixiviados de la mezcla pulpa + mieles del Ecomill®.** Se cambió el tanque en mampostería por tanques en polietileno, que tienen mayor resistencia química al contacto con sustancias ácidas (Figura 100).
- 2. Válvula desaireadora de los lixiviados que llegan a los reactores hidrolíticos -acidogénicos del SMTA.** Tuvo como objetivo eliminar el aire de las tuberías de conducción del agua residual para permitir su flujo normal por gravedad (Figura 101).



Figura 100. Tanques en polietileno que recolectan los lixiviados de la mezcla pulpa + mieles del Ecomill®.



Figura 101. Válvula desaireadora a la entrada de los reactores hidrolíticos del SMTA.



3. Canalización de las aguas residuales tratadas a dos tanques de 5 m³ para alimentación de los filtros verdes (unidad de aplicación). Tuvo como objetivo homogenizar el agua residual de ingreso a los filtros verdes y facilitar su manejo para realizar la aplicación mediante riego por goteo, al área sembrada del filtro verde (Figura 102).

4. Construcción de los filtros verdes. En las Figuras 103 a 107 se detalla el proceso de construcción de los filtros verdes.

En la Figura 108 se presenta una panorámica de los filtros verdes instalados en Cenicafé sede La Granja y en la Figura 109 su respectivo plano.

A partir del mes de agosto del 2019, los filtros verdes iniciaron operación evapotranspirando toda el agua tratada en el SMTA. El agua drenada recolectada en el tanque de drenados fue bombeada hasta un tanque de 5 m³ para ser nuevamente aplicada a los filtros verdes (Figura 110).

En la Figura 111 se presenta un aspecto del muestreo de suelos realizado a los filtros verdes para determinar la variación en su composición química, en el tiempo, considerando la adición de las aguas residuales del café tratadas anaerobiamente.

En las Tablas 57 y 58 se presenta la caracterización química de suelos, para el año 2020 y 2021, respectivamente, realizada a los filtros verdes instalados para cero descargas de las aguas residuales del café provenientes del beneficiadero de Cenicafé sede La Granja, en las cuales se resalta en color verde los parámetros del suelo que presentaron un incremento mayor al 5% con relación a su testigo (sin aplicación de agua), en color amarillo los parámetros del suelo



Figura 102. Canalización de los efluentes del SMTA hacia la unidad de aplicación de los filtros verdes.



Figura 103. Excavación de 5 m x 20 m x 0,70 m para la construcción de cada uno de los filtros verdes.



Figura 104. Impermeabilización de la excavación con geomembrana de 20 mils y llenado con suelo.



Figura 105. Construcción del techo de los dos filtros verdes.



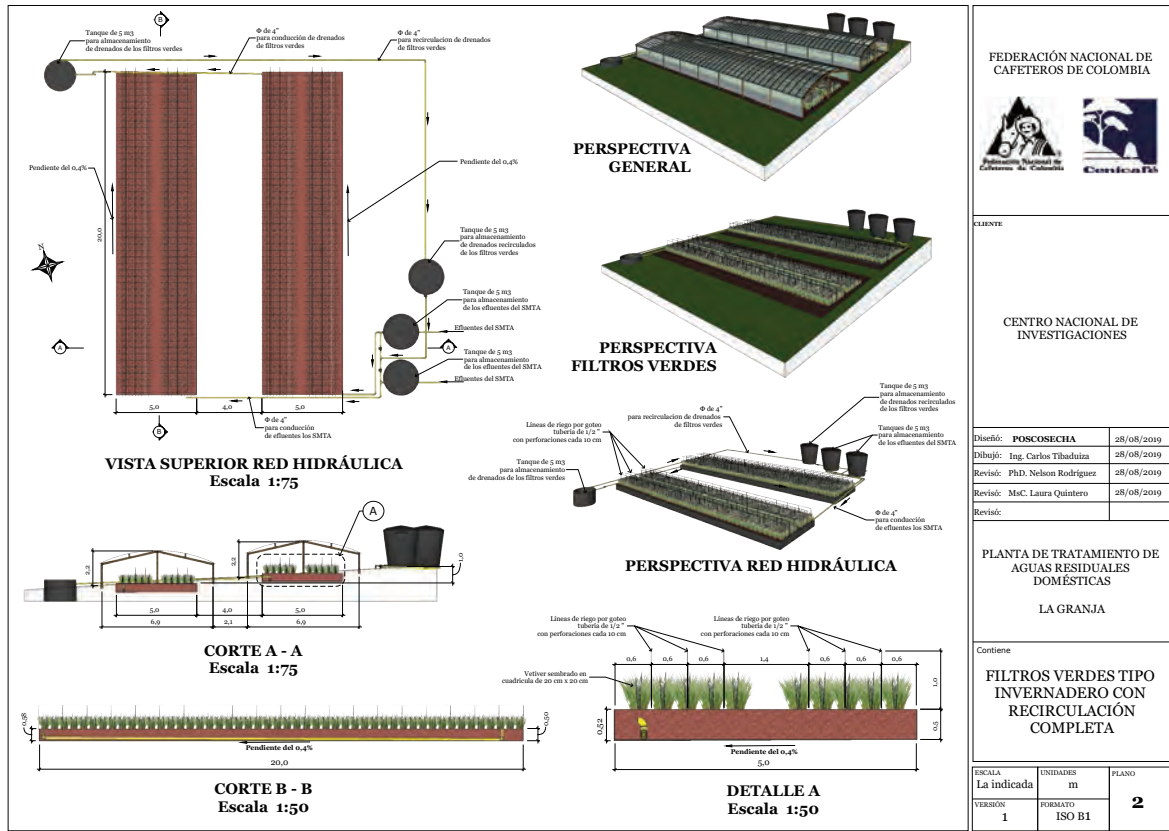
Figura 106. Instalación del sistema de riego.



Figura 107. Instalación del tanque de recolección de drenados.



Figura 108. Vista aérea de los filtros verdes instalados en Cenicafé sede La Granja.



FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA



CLIENTE
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES

Diseño:	POSCOSECHA	28/08/2010
Dibujó:	Ing. Carlos Tibaduzza	28/08/2010
Revisó:	PhD. Nelson Rodríguez	28/08/2010
Revisó:	M.Sc. Laura Quintero	28/08/2010

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS
LA GRANJA

Contiene
FILTROS VERDES TIPO INVERNADERO CON RECIRCULACIÓN COMPLETA

ESCALA	UNIDADES	PLANO
La indicada	m	2
VERSION 1	FORMATO ISO B1	

Figura 109. Planos de los filtros verdes instalados en Cenicafé sede La Granja.



Figura 110. Utilización de una bomba sumergible para llevar nuevamente los drenados a la unidad de aplicación de los filtros verdes.



Figura 111. Aspecto del muestreo de suelos en los filtros verdes tipo ZLD.

cuya variación no fue superior al 5% respecto a su testigo y en color rojo los parámetros del suelo que presentaron una disminución mayor al 5% respecto a su testigo.

De acuerdo con lo condensado en la Tabla 57 (diciembre del año 2020) puede resumirse:

Al comparar la composición química del suelo de los filtros verdes regados con las aguas residuales del café tratadas anaerobiamente, con el testigo (suelo sin riego dentro del filtro verde), puede observarse que para el filtro verde 1 se presentó un incremento en más del 5% en los parámetros pH, N, MO, K, P, Fe, Mn, Zn y B, un decremento mayor al 5% en los parámetros Mg, Al, mientras que los parámetros Ca, CIC, Cu y S, tuvieron variaciones menores al 5%. Para el filtro verde 2 se presentó un incrementó mayor al 5% en los parámetros pH, N, MO, K, Mg, CIC, P, Fe, Mn, B y S, un decremento mayor al 5% en los parámetros Ca, Al, Zn y Cu.

De acuerdo con lo condensado en la Tabla 58 (septiembre 2021) puede resumirse:

Al comparar la composición química del suelo de los filtros verdes regados con las aguas residuales del café tratadas anaerobiamente, con el testigo (suelo sin riego dentro del filtro verde), puede observarse que para el filtro verde 1 se presentó un incremento en más del 5%, en los parámetros pH, K, Ca, Mg, P, Mn, Cu y B, un decremento mayor al 5% en los parámetros Al, CIC, Zn y S; mientras que los parámetros N, MO, Fe, tuvieron variaciones menores al 5%. Para el filtro verde 2 se presentó un incrementó mayor al 5% en los parámetros pH, N, MO, K, CIC y P, un decremento mayor al 5% en los parámetros Ca, Mg, Al, Zn, Cu y S; mientras los parámetros Fe y B, tuvieron variaciones menores al 5%.

Tabla 57. Caracterización química de los suelos de los filtros verdes de Cenicafé sede La Granja. Diciembre - 2020*.

Parámetro	Testigo filtro verde 1	Testigo filtro verde 2	Filtro verde 1 (regado con aguas residuales tratadas)	Filtro verde 2 (regado con aguas residuales tratadas)
pH	4,6	4,5	5,1 (+10,87%)	5,1 (+13,33%)
N (%)	0,12	0,44	0,17 (+41,67%)	0,47 (+6,82%)
MO (%)	2,4	11,2	3,60 (+50,00%)	12,1 (+8,04%)
K (cmol kg ⁻¹)	0,69	1,95	7,05 (+921,74%)	8,88 (+355,38%)
Ca (cmol kg ⁻¹)	3,95	4,84	3,78 (-4,30%)	3,44 (-28,93%)
Mg (cmol kg ⁻¹)	1,22	1,42	1,10 (-9,84%)	1,73 (+21,83%)
Al (cmol kg ⁻¹)	0,40	0,20	0,10 (-75,00%)	0,10 (-50,00%)
CIC	12	12	12 (0,00%)	16 (+33,33%)
P (mg kg ⁻¹)	57	103	169 (+196,49%)	245 (+137,86%)
Fe (mg kg ⁻¹)	278	268	444 (+59,71%)	574 (+114,18%)
Mn (mg kg ⁻¹)	28	34	47 (+67,86%)	43 (+26,47%)
Zn (mg kg ⁻¹)	2,6	5,0	3,2 (+23,08%)	3,1 (-38,00%)
Cu (mg kg ⁻¹)	17,9	18,9	17,8 (-0,56%)	15,3 (-19,05%)
B (mg kg ⁻¹)	0,21	0,26	0,36 (+71,43%)	0,70 (+169,23%)
S (mg kg ⁻¹)	13,3	25,3	13,3 (0,00)	36,3 (+43,48%)
Arcilla (%)	19	19	19 (0,00%)	21 (+10,53%)
Limo (%)	29	29	29 (0,00%)	30 (+3,45%)
Arena (%)	52	51	51 (-1,92%)	49 (-3,92%)
Textura	Franco	Franco	Franco	Franco

* Entre paréntesis la variación presentada en cada parámetro del suelo respecto a su testigo.

Tabla 58. Caracterización química de los suelos de los filtros verdes de Cenicafé sede La Granja. Septiembre - 2021*.

Parámetro	Testigo filtro verde 1	Testigo filtro verde 2	Filtro verde 1 (regado con aguas residuales)	Filtro verde 2 (regado con aguas residuales)
pH	4,6	4,6	6,0 (+30,43%)	5,2 (+13,04%)
N (%)	0,14	0,18	0,14 (0,00%)	0,31 (+72,22%)
MO (%)	2,80	3,7	2,80 (0,00%)	7,30 (+97,30%)
K (cmol kg ⁻¹)	0,20	0,46	3,54 (+1670%)	3,61 (+684,78)
Ca (cmol kg ⁻¹)	3,66	5,45	4,17 (+13,93%)	3,70 (-32,11%)
Mg (cmol kg ⁻¹)	1,05	1,30	1,22 (+16,19%)	1,14 (-12,31%)
Al (cmol kg ⁻¹)	0,60	0,30	0,10 (-83,33%)	0,10 (-66,67%)
CIC	13	12	12 (-7,69%)	15 (+25,00%)
P (mg kg ⁻¹)	111	153	184 (+65,77%)	214 (+39,87%)
Fe (mg kg ⁻¹)	356	383	360 (+1,12%)	398 (+3,92%)
Mn (mg kg ⁻¹)	29	32	42 (+44,83%)	25 (-21,88%)
Zn (mg kg ⁻¹)	3,9	8,6	2,5 (-35,90%)	2,9 (-66,28%)
Cu (mg kg ⁻¹)	17,1	20,5	18,8 (+9,94%)	16,3 (-20,49%)
B (mg kg ⁻¹)	0,03	0,03	0,31 (+933,33%)	0,03 (0,00%)
S (mg kg ⁻¹)	19,1	15,6	9,1 (-52,36%)	11,4 (-26,92%)
Arcilla (%)	14	13	13 (-7,14%)	15 (+15,38%)
Limo (%)	29	29	31 (+6,90%)	33 (+13,79%)
Arena (%)	58	58	56 (-3,45%)	51 (-12,07%)
Textura	Franco-arenoso	Franco-arenoso	Franco-arenoso	Franco-arenoso

* Entre paréntesis la variación presentada en cada parámetro del suelo respecto a su testigo.

De acuerdo con los resultados de los análisis de suelos de los filtros verdes, condensados en las Tablas 57 y 58, puede concluirse, para los 2 años de operación, que se presentan cambios positivos en la composición química del suelo por la aplicación de las aguas residuales del beneficio del café tratadas anaerobiamente, reflejados en el incremento de los parámetros pH, materia orgánica y de los macronutrientes N P y K.

Cenicafé. Estación Experimental Naranjal

Objetivo: Instalar un filtro verde tipo ZLD a continuación del sistema anaerobio de tratamiento de aguas residuales del café con el objetivo de tener cero descargas.

El filtro verde se instaló en la Estación Experimental Naranjal, ubicada en del municipio de Chinchiná (Caldas), a 1.381 m de altitud, temperatura media de 21,7°C, humedad relativa media de 79,2%, precipitación anual de 2.666,0 mm y brillo solar de 1.517,7 h (Cenicafé, 2021).

El filtro verde se instaló con las siguientes dimensiones: 13 m de largo x 5 m de ancho x 0,7 m de profundidad, en el primer semestre del año 2021.

La particularidad de la instalación es que se realizó en un terreno con pendiente (Figura 112), en el cual el suelo retirado de la parte superior se utilizó para rellenar la parte inferior utilizando trinchos en guadua.

En las Figuras 113 a 118 se presenta la secuencia de construcción del filtro verde.





Figura 113. Excavación de 70 cm de profundidad, impermeabilización del fondo de la misma con geomembrana de 20 mils e instalación del tubo de aireación y descarga de drenados.



Figura 114. Llenado de la excavación impermeabilizada con suelo estratificado, conservando su perfil original.



Figura 115. Techado del filtro verde y cubrimiento de las paredes con plástico.



Figura 116. Aspecto de la siembra y desarrollo del pasto vetiver en el filtro verde.



Figura 117. Instalación de la tubería de riego para la aplicación del agua residual tratada.



Figura 118. Salida de drenados del filtro verde y su recolección en tanques de polietileno para ser reincorporados al mismo mediante bombeo a la unidad de aplicación.

Cenicafé. Estación Experimental San Antonio

Objetivo: Instalar un filtro verde tipo ZLD a continuación del sistema anaerobio de tratamiento de aguas residuales del café con el objetivo de tener cero descargas.

El filtro verde se instaló en la Estación San Antonio que está ubicada en el municipio de Floridablanca (Santander), a 1.539 m, temperatura media de 19,8°C, humedad relativa media de 80,5%, precipitación anual de 1.665,6 mm y brillo solar de 1.285,7 h (Cenicafé, 2021).

El filtro verde se instaló con las siguientes dimensiones: 13 m de largo x 5 m de ancho x 0,7 m de profundidad, en el segundo semestre del año 2021.

La particularidad de la instalación es que se realiza en un terreno plano, el cual se encierra utilizando material plástico reciclado y se acarrea el suelo de otra parte de la estación (Figura 119).

Cenicafé. Estación Experimental EL Rosario

Objetivo: Instalar un filtro verde tipo ZLD a continuación del sistema anaerobio de tratamiento de aguas residuales del café con el objetivo de tener cero descargas.

El filtro verde se instaló en la Estación Experimental EL Rosario ubicada en el municipio de Venecia (Antioquia), a 1.635 m de altitud, temperatura media de 20,7°C, humedad relativa media de 77,2%, precipitación anual de 2.461,1 mm y brillo solar de 1.981,1 h (Cenicafé, 2021).

Se construyeron dos filtros verdes con las siguientes dimensiones: uno de 18 m de largo x 5,0 m de ancho x 0,7 m de profundidad y otro de 12 m de largo x 5,0 m de ancho y 0,7 m de profundidad. Los filtros verdes se instalaron en el primer semestre del año 2022 (Figura 120).

Cenicafé. Estación Experimental La Trinidad

Objetivo: Instalar un filtro verde tipo ZLD a continuación del sistema anaerobio de tratamiento de aguas residuales del café con el objetivo de tener cero descargas.

El filtro verde se instaló en la Estación La Trinidad ubicada en el municipio del Líbano (Tolima), a 1.456 m de altitud, temperatura media de 20,5°C, humedad relativa media de 84,1%, precipitación anual de 2.169,1 mm y brillo solar de 1.446,5 h (Cenicafé, 2021).

Se construyeron dos filtros verdes con las siguientes dimensiones: 22,5 m de largo x 5,0 m de ancho x 0,7 m de profundidad, en el primer semestre del año 2022 (Figura 121).



Figura 119. Instalación del filtro verde (ZLD) en la Estación San Antonio. **a.** Delimitación del terreno con material plástico reciclados; **b.** Impermeabilización del suelo con geomembrana de 20 mils e incorporación de tubos de aireación a la tubería de drenaje (1 tubo cada 3 m); **c.** Instalación de la estructura para soportar la cubierta plástica; **d.** Detalle de las columnas que soportan el techo y que descansan sobre el fondo de la excavación; **e.** Aspecto del material vegetal ya desarrollado y del sistema de aplicación del agua residual tratada; **f.** Aspecto general del filtro verde en funcionamiento.



Figura 120. Instalación del filtro verde (ZLD) en la Estación El Rosario. **a.** Excavación y delimitación del terreno utilizando guadua; **b.** Impermeabilización del suelo de la excavación con geomembrana de 20 mils e incorporación de tubos de aireación a la tubería de drenaje (1 tubo cada 3 m); **c.** Cubrimiento de la tubería de drenaje con polisombra y gravilla; **d.** Llenado de la excavación con el mismo suelo extraído y conservando su perfil original; **e.** Siembra del pasto vetiver; **f.** Aspecto general del filtro verde en funcionamiento.



Figura 121. Instalación del filtro verde (ZLD) en la Estación La Trinidad. **a.** Excavación y delimitación del terreno utilizando guadua como trincho protector para evitar el derrumbamiento del suelo; **b.** Impermeabilización del suelo de la excavación con geomembrana de 20 mils; **c.** Incorporación de tubos de aireación a la tubería de drenaje (1 tubo cada 3 m); **d.** Aspecto general de la tubería de aireación y drenaje protegida con polisombra y gravilla para evitar el ingreso de partículas de suelo; **e.** Llenado de la excavación con el mismo suelo extraído y conservando su perfil original; **f.** Siembra del pasto vetiver.



Actividades de mantenimiento para filtros verdes con cero descargas (ZLD)

Las actividades de mantenimiento están relacionadas con la poda periódica del material vegetal, la limpieza de la tubería de aplicación del agua residual, la descarga de lodos de las unidades de aplicación y de recibo de drenados y la construcción de canales de escorrentía para el manejo de las aguas lluvias, así como actividades de mantenimiento menos frecuentes como: la limpieza de la cubierta plástica y la reparación ocasional de la geomembrana.

Poda periódica del material vegetal

Se recomienda realizar un corte periódico al pasto vetiver (bimensual o trimestral) el cual debe hacerse a 50 cm del nivel del suelo (Figura 122). Este corte periódico tiene como objetivo controlar el crecimiento del pasto, mejorar su apariencia, retirar las hojas secas, incrementar el flujo de aire al interior del cultivo y favorecer su circulación en el perfil del suelo a través de los tubos de aireación instalados (que tienen una altura, a partir del suelo, de 90 cm) y facilitar la salida del vapor de agua por los procesos de evaporación que dan en la superficie del suelo y en los primeros centímetros de profundidad del mismo.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación, el análisis foliar de las hojas del pasto vetiver mostró una composición química similar al que tiene la pulpa de café fresca en macronutrientes y micronutrientes, por lo que el material cosechado de los filtros verdes puede ser acondicionado a un tamaño de partícula similar al de la pulpa (aproximadamente 2 cm) y puede ser adicionado al procesador de pulpa para la producción de abono orgánico, con la ventaja adicional que al tener contenidos de humedad inferiores a los de la pulpa (70% en las hojas de vetiver vs 80% en la pulpa de café), contribuye a la retención de las aguas - mieles, cuando éstas se aplican a la pulpa de café en el procesador.

Limpieza de la tubería de aplicación del agua residual

Con el tiempo, se acumula material sólido en la tubería de aplicación del agua residual tratada, taponando los orificios para el riego y limitando el volumen de agua que ingresa al área cultivada. Por lo tanto, es necesario realizar un mantenimiento periódico (bimensual o trimestral) de la tubería de riego. En la Figura 123 se presenta el aspecto y la consistencia del lodo que puede acumularse en la tubería de aplicación obstruyendo el flujo de agua residual aplicada.

Para el mantenimiento de la tubería de riego se utiliza un alambre con un calibre un poco menor a 3/32", de forma que pueda introducirse por las diferentes perforaciones de la tubería retirando el material adherido a las mismas. De igual forma, debe rasparse el material seco



Figura 122. Podapériódicadelpastovetiver sembrado en los filtros verdes.



Figura 123. Aspecto del lodo, depositado con el tiempo, en la tubería de riego.



Figura 124. Limpieza y destaponamiento de la tubería de riego de los filtros verdes.

adherido en la parte externa de la tubería que se forma durante la aplicación del agua residual, justo en la descarga de los orificios (Figura 124).

Después de destaponar los orificios de descarga del agua residual, se aplica agua limpia a presión en los diferentes ramales de la tubería, utilizando una manguera (Figura 125), con el fin de realizar la evacuación del material sólido acumulado en el interior de la tubería. Se debe mantener el flujo de agua hasta que el agua de salida de la tubería tenga apariencia de agua limpia. Finalmente, mediante el uso de un pedazo de alambre se repasan los agujeros de aplicación para garantizar su limpieza total (Figura 125).

Descarga de lodos de las unidades de pretratamiento y de aplicación del agua residual

Durante los procesos de depuración y manejo de las aguas residuales, se forman lodos que se acumulan en el fondo de los tanques y que deben ser eliminados periódicamente para evitar su ingreso a la tubería de riego. Es por ello que los tanques de manejo de las aguas residuales deben tener un dispositivo para la descarga de lodos. Para el caso de la unidad de pretratamiento del agua residual, los lodos generados se deben descargar con una periodicidad bimensual o trimestral y se deben disponer en el procesador de pulpa o en un lecho de secado lodos (Rodríguez et al., 2022). Para el caso de la unidad de aplicación, si el nivel de lodos es bajo pueden ser incorporados al suelo del filtro verde (Figura 126), en caso contrario estos deben ser llevados al procesador de pulpa o a un lecho de secado de lodos.

Construcción de canales de escorrentía

Es necesario evitar el ingreso del agua lluvia al interior del filtro verde dado que interfiere con las tasas de evapotranspiración del agua residual. Por lo anterior, es necesario elaborar y mantener en funcionamiento canales que permitan la desviación de las aguas lluvias que puedan ingresar al interior del filtro verde. En la Figura 127 se presenta un detalle de los canales de escorrentía contruidos para evitar el ingreso del agua lluvia a los filtros verdes.

Limpieza de la cubierta plástica

Tanto por higiene como por la apariencia del filtro verde y con el fin de mantener el proceso fotosintético de la vegetación y su productividad (el crecimiento del pasto vetiver se afecta con la sombra), es necesario mantener limpia la cubierta plástica del filtro verde. La limpieza de la cubierta plástica debe hacerse con agua limpia y con la ayuda de un cepillo suave para no ocasionar daño al plástico (Figura 128).



Figura 125. Lavado de la tubería de riego de los filtros verdes.



Figura 126. Eliminación de lodos de la unidad de aplicación de los filtros verdes.



Figura 127. Construcción de canales de escorrentía alrededor de los filtros verdes.



Figura 128. Limpieza de la cubierta plástica de los filtros verdes.

Reparación de la geomembrana

En caso de presentarse rupturas o cortes en la geomembrana a través de los cuales se presente la infiltración al suelo del agua aplicada, es necesario realizar la reparación de los mismos. A continuación, se detalla el procedimiento a seguir para su reparación.

Se lija, utilizando una lijadora o papel de lija 180, la parte de la geomembrana que presenta el daño y luego se limpia la superficie con un paño seco y limpio. Se corta un pedazo de geomembrana (de las mismas características del material que desea reparar) y que sea suficiente para cubrir el área dañada. Luego se lija este pedazo de geomembrana y se limpia con un paño seco y limpio (Figura 129).

Luego se aplica suficiente silicona derretida (utilizando una pistola para silicona) o silicona en barra (que se derrite utilizando una pistola de aire caliente), sobre el área que presenta el corte o la ruptura (Figura 130).

También se debe aplicar un cordón de silicona en el pedazo de geomembrana utilizado en la reparación y luego se coloca éste sobre el área afectada (de forma que entren en contacto las dos superficies que contienen la silicona), aplicando calor sobre las dos superficies, con una pistola de aire caliente, hasta que se observe que las superficies en contacto están dúctiles (maleables) (Figura 131).

Posteriormente, se utiliza un rodillo de metal para ejercer presión sobre las dos superficies calientes y en contacto para lograr su adherencia (Figura 132).

La presión ejercida con el rodillo (sobre las dos superficies en contacto) se realiza hasta que éstas adquieran la temperatura ambiente. En la Figura 133, se presenta el aspecto de la geomembrana reparada.



Figura 129. Lijado y limpieza de un pedazo de geomembrana para reparación de cortes.



Figura 130. Aspecto de la silicona aplicada sobre el daño presente en la geomembrana.



Figura 131. Aplicación de calor sobre las superficies en reparación.



Figura 132. Aplicación de calor y presión con rodillo metálico para permitir adherencia de las dos superficies.



Figura 133. Aspecto de la geomembrana reparada.



Consideraciones finales

A través de los resultados obtenidos en las investigaciones realizadas, evaluando la tecnología de filtros verdes para el manejo y tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café, condensados en la presente publicación, puede concluirse que es una tecnología apropiada para ser implementada en las fincas cafeteras, ya sea para la depuración de las aguas residuales generadas en el proceso de beneficio del café o para alcanzar el objetivo de cero descargas mediante la evapotranspiración total del agua residual.

En función de los resultados de eliminación de contaminantes, se determinó que la tecnología de filtros verdes es apta para el tratamiento de los diferentes tipos de aguas residuales del café generadas en las fincas cafeteras, como lo son: las aguas - mieles procedentes de la tecnología del tanque tina, los lixiviados provenientes de la mezcla de la pulpa y el mucílago generados en la tecnología Becolsub y las mieles fermentadas provenientes de la tecnología Ecomill®, presentando unos elevados porcentajes de remoción de carga orgánica en términos de demanda química de oxígeno, sólidos totales y sólidos suspendidos totales, que permiten obtener efluentes con las características de calidad exigidas en la Resolución 631 del 2015, para vertimientos a cuerpos de agua superficiales y en el Decreto 50 del 2018 para vertimientos al suelo.

El pasto vetiver por sus características fisiológicas y ecológicas, así como por su distribución y ambiente, se constituye en una especie vegetal con grandes ventajas para ser sembrado como vegetación en sistemas de filtros verdes con aplicación de aguas residuales del café, dado que soporta amplios rangos de pH, es tolerante a condiciones de estrés hídrico por exceso y por defecto, es tolerante a variaciones climáticas extremas, presenta un alta eficiencia de eliminación de nutrientes y metales pesados, crece en un rango amplio de suelos y con diferentes niveles de fertilidad, además de presentar un alto régimen de transpiración y un profundo sistema radicular.

Con el fin de disminuir costos de tratamiento y área efectiva de los filtros verdes, es indispensable que el agua residual de café que se aplique a los filtros verdes sea sometida, como mínimo, a un tratamiento primario, buscando reducir su carga orgánica en términos de demanda química de oxígeno y de sólidos (tanto suspendidos como totales) y evitar así el taponamiento de las tuberías de conducción y de riego, durante la aplicación del agua residual al suelo del filtro verde.

Para filtros verdes que operen bajo condiciones de cielo abierto y cuyo propósito sea la eliminación de la contaminación orgánica, es necesario impermeabilizar el suelo en el cual se instale el filtro verde y se recomienda utilizar cargas orgánicas de hasta 2.000 kg DBO/ha-d (4.000 kg DQO/ha-d) a la entrada del tratamiento primario y cargas orgánicas hasta 1.000 kg DBO/ha-d (2.000 kg DQO/ha-d) en el sistema de aplicación al suelo con vegetación, y pasto vetiver sembrado al cuadro a distancias de 30 cm (tres esquejes por sitio), como vegetación del filtro verde, con cargas hidráulicas que no superen los 20 mm d⁻¹. Con estos parámetros se logran obtener efluentes que cumplen con los requerimientos de calidad establecidos en la normativa

colombiana vigente en materia de vertimientos, además que permiten un buen desempeño de los filtros verdes en función de la calidad de los efluentes obtenidos, del crecimiento de la vegetación y los cambios en las propiedades químicas del suelo.

Para los filtros verdes construidos y operados a cielo abierto, en la evaluación a escala piloto y en el campo, no se evidenció un cambio negativo en los contenidos químicos del suelo que pueda cuestionar la viabilidad a largo plazo del uso de la tecnología de los filtros verdes en el tratamiento de las aguas residuales del café; por el contrario, al comparar los contenidos químicos del suelo de las áreas de filtros verdes regadas con las aguas residuales del café con el suelo de áreas sin riego (parcelas testigo), se encontraron mejores contenidos en variables como materia orgánica, pH, N, capacidad de intercambio catiónico, Ca, Mg, Mn, B, Zn, Fe.

Para la implementación de filtros verdes que permitan alcanzar el objetivo de cero descargas (ZLD) en el manejo y tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café, se requiere que estos sistemas sean construidos tipo invernadero, con el fin de evitar el ingreso del agua lluvia y favorecer el aumento de la temperatura en su interior para incrementar las tasas de evapotranspiración. De igual manera, el suelo del filtro verde debe estar impermeabilizado con geomembrana para evitar la infiltración del agua residual aplicada y sembrado con pasto vetiver en cuadro, cada 30 cm (tres esquejes por sitio), por ser esta una especie que se adapta a diferentes ofertas ambientales y presentar un alto régimen de transpiración.

La instrumentación de los filtros verdes tipo invernadero permitió determinar, en aquellos sembrados con pasto vetiver y con aplicación de aguas mieles del café, un valor de evapotranspiración (ET) promedio de $23,69 \text{ mm d}^{-1} \pm 0,95$ y un valor de temperatura promedio del suelo a 30 cm de profundidad de $25,02^{\circ}\text{C} \pm 0,04$.

Se determinó que la aplicación periódica de las aguas residuales del café sobre filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana y sembrados con pasto vetiver, permite incrementar el valor de los parámetros del suelo: pH, conductividad eléctrica, N, materia orgánica, K, P, Fe, Mn, Cu, B y S. Para los parámetros Ca y Mg se observó un decremento en sus contenidos en el suelo por el efecto de la aplicación de las aguas residuales del café.

A través de la experimentación se determinó un efecto fitotóxico de las altas cargas orgánicas aplicadas de las aguas residuales del café sobre el pasto vetiver presente en filtros verdes tipo invernadero, calculando que para cargas orgánicas aplicadas mayores a $1,20 \text{ kg de DQO/m}^2\text{-d}$ se presenta una disminución en más del 50% de la tasa de crecimiento del pasto vetiver.

Se determinó que se pueden aplicar cargas hidráulicas de hasta 60 mm d^{-1} de aguas residuales del café, en filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana y sembrados con pasto vetiver, dado que a estas cargas hidráulicas no se encontraron inconvenientes de inundaciones, sobresaturación del suelo ni lixiviación de sólidos del mismo.

El área total necesaria para la instalación de un filtro verde tipo invernadero para cero descargas se calcula en función del volumen de agua residual generada en el día pico de cosecha y en función de la tasa de retención de agua del suelo + la tasa de evapotranspiración de la vegetación sembrada en el filtro verde.

Glosario

Aguas - mieles. Nombre que reciben las aguas residuales del lavado del café, cuando al fruto se le retira el mucílago por fermentación natural o cuando se deja fermentar el mucílago retirado por desmucilaginado mecánico o por acción enzimática.

Aguas residuales del café. Aguas provenientes del proceso de beneficio del fruto de café, incluye: el agua utilizada en la clasificación hidráulica del fruto y en su transporte, el agua utilizada en la etapa de despulpado (cuando este no se realiza en seco), el agua utilizada en el lavado del grano, en su clasificación hidráulica y transporte al silo de secado y el agua utilizada en el lavado de los equipos.

Beneficiadero de café. Establecimiento en el cual se realizan, en forma ordenada e higiénica, las operaciones y procesos destinados a transformar el fruto de café en café pergamino seco.

Beneficio de café. Proceso mediante el cual se transforma el fruto de café en café pergamino seco.

Carga hidráulica. Volumen de agua aplicado por unidad de superficie del terreno en un determinado período de tiempo (diario, semanal, mensual o anual) y se expresa como mm d^{-1} , mm semana^{-1} , mm mes^{-1} y mm año^{-1} . Siendo $1,0 \text{ mm}$ equivalente a $1,0 \text{ L m}^{-2}$.

Carga orgánica. Cantidad de materia orgánica, expresada en kilogramos de DQO o DBO_5 aplicada por unidad de superficie del terreno en un determinado período de tiempo (diario, semanal, mensual o anual) y se expresa como $\text{kg m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ o $\text{t ha}\text{-d}^{-1}$.

Conductividad eléctrica. Parámetro que permite evaluar la concentración total de iones disueltos en el agua y se define como la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica a través de los iones disueltos.

Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5). Parámetro que permite evaluar la cantidad de oxígeno que se debe proporcionar a un cultivo bacteriano natural para que consuma los contaminantes orgánicos del agua en cinco días. Entre mayor sea el valor de la DBO_5 mayor será la contaminación orgánica del agua.

Demanda Química de Oxígeno (DQO). Parámetro que permite evaluar la cantidad de oxígeno que sustancias reductoras, como la materia orgánica, presentes en un agua residual, necesitan para

descomponerse, sin la intervención de microorganismos. Entre mayor sea el valor de la DQO mayor será la contaminación orgánica del agua.

Esqueje. Material de propagación asexual compuesto de pedazos de tallos y hojas (entre 10 y 20 cm de alto) con una pequeña cantidad de raíces (no más de 5 cm).

Evaporación. Proceso físico que consiste en el paso lento y gradual del agua de su estado líquido a su estado de vapor, después de haber adquirido la suficiente energía para vencer la tensión superficial. Se expresa en milímetros por unidad de tiempo.

Evapotranspiración (ET). Acción conjunta de los procesos de evaporación y transpiración. Se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Se expresa en milímetros por unidad de tiempo.

Lavado del café. Operación tecnológica destinada a eliminar, por medio del agua, todos los residuos del mesocarpio mucilaginoso adheridos a la superficie del pergamino del grano y se realiza después del proceso de fermentación o desprendimiento del mucílago.

Lisimetría de drenaje. Consiste en un área impermeabilizada y con una tubería de drenaje por donde se descarga el agua de exceso. En el fondo del área se dispone de una capa de gravilla, separada del suelo por una geomembrana. El suelo del área impermeabilizada mantiene el mismo orden de los horizontes (con sus respectivos espesores y propiedades) respecto a las condiciones naturales (densidad aparente, porosidad, conductividad hidráulica, etc.). Mediante este tipo de lisimetría se mide la evapotranspiración de manera indirecta, resolviendo la ecuación de balance hídrico en el suelo. De la medición de los volúmenes de agua aportados y los recogidos en el drenaje, se obtiene el volumen de agua evapotranspirada, que, al ser dividida por el tiempo y el área de evaluación, proporciona la evapotranspiración en lámina por unidad de tiempo.

Mucílago de café. Constituye el mesocarpio del fruto. Es la parte que se encuentra después de retirar la cáscara. Es de consistencia viscosa, color habano claro. Es separado del grano por fermentación natural o por medios mecánicos o enzimáticos.

Pulpa de café. Parte del fruto de café que se elimina durante el despulpado y que se compone del exocarpio y la mayor parte del mesocarpio del fruto.

SMTA. Sistema Modular de Tratamiento Anaeróbico. Consiste en un sistema biológico de depuración de aguas residuales mediante la hidrólisis y la metanogénesis de la materia orgánica y en el cual se presenta separación de fases entre la etapa hidrolítica y la metanogénica.

Sólidos totales. Son aquellos que permanecen después de secar una muestra de agua residual a 105°C. Están constituidos por los sólidos suspendidos totales y los sólidos disueltos totales.

Sólidos suspendidos totales. Son el residuo no filtrable o material no disuelto presente en el agua residual.

Tecnología Becolsub. Tecnología de beneficio de café en la cual se integra el despulpado de café sin agua, el desmucilaginado mecánico con bajo consumo de agua y el manejo de los subproductos pulpa y mucílago con tornillo sinfín.

Tecnología Ecomill®. Tecnología de beneficio de café en la cual se integra el despulpado de café sin agua, con el lavado mecánico del café conteniendo el mucílago degradado por el proceso de fermentación natural o desprendido con la aplicación de enzimas, con reducción notoria en el volumen específico de agua hasta valores entre 0,3 y 0,5 L kg⁻¹ cps.

Tecnología tanque tina. Tecnología de beneficio de café en la cual se integra el despulpado de café sin agua, con el lavado manual del café conteniendo el mucílago degradado por el proceso de fermentación natural en tanques a los cuales se les han redondeado las aristas y en los que se aplica la técnica de los cuatro enjuagues, con volúmenes específicos de agua, en el proceso, menores a 5,0 L kg⁻¹ cps.

Transpiración. Proceso biológico por medio del cual la vegetación elimina agua a la atmósfera. La transpiración vaporiza el agua líquida en los tejidos vegetales y elimina el vapor a la atmósfera.

Literatura citada

Alegre, J. (2007). *Manual sobre el uso y manejo del pasto vetiver (Chrysopogon zizanioides)*. Organización Panamericana de la Salud. http://www.vetiver.org/TVN_manualvetiver_spanish-o.pdf

American Public Health Association., American Water Works Association., & Water Pollution Control Facility. (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Ediciones Díaz de Santos.

Aryal, N., & Reinhold, D. M. (2015). Reduction of metal leaching by poplars during soil treatment of wastewaters: Small-scale proof of concept studies. *Ecological Engineering*, 78, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.05.020>

Azbar, N., Bayram, A., Filibeli, A., Muezzinoglu, A., Sengul, F., & Ozer, A. (2004). A Review of Waste Management Options in Olive Oil Production. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 34(3), 209-247. <https://doi.org/10.1080/10643380490279932>

Barton, L., Schipper, L. A., Barkle, G. F., McLeod, M., Speir, T. W., Taylor, M. D., McGill, A. C., van Schaik, A. P., Fitzgerald, N. B., & Pandey, S. P. (2005). Land Application of Domestic Effluent onto Four Soil Types: Plant Uptake and Nutrient Leaching. *Journal of Environmental Quality*, 34(2), 635-643. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0635>

Batista, R. O., Lo Monaco, P. A., Matos, A. T., & Cunha, F. F. (2005). Alteração na vazão de gotejadores tipo fita utilizados na aplicação de água residuária da despolpa de frutos do cafeeiro. *Revista Engenharia na Agricultura*, 13(2), 69-73.

Brasil, M., Matos, A., & Fia, R. (2003). Eficiência e impactos ambientais do tratamento de águas residuárias da lavagem e despolpa de frutos do cafeeiro em áreas alagadas naturais. *Revista Engenharia na Agricultura*, 11(1-4), 43-51.

Brix, H., & Arias, C. A. (2011). Use of willows in evapotranspirative systems for onsite wastewater management - theory and experiences from Denmark. *Strepow International Workshop Proceedings, Andrevlje-Novi Sad, Serbia*, 15-29.

Bustamante, I. (1990). Land application: Its effectiveness in purification of urban and industrial wastewaters in La Mancha, Spain. *Environmental Geology and Water Sciences*, 16(3), 179-185. <https://doi.org/10.1007/BF01706042>

Bustamante, I., Lillo, J., Segura, M., Iglesias, J. A., Gómez, D., Ortiz, I., Carreño, F., Bienes, R., Martín, T., Márquez, A., Gil, J., Martín, S., Carenas, B., Salas, J. J., De Miguel, A., Leal, M., Martín, I., García, R., & Martínez, V. (2009, Mayo). Adaptación de los filtros verdes: De estaciones depuradoras de agua (EDAR) a estaciones de regeneración y reutilización de aguas depuradas (ERRAD). *Conferencia Nacional sobre la reutilización del agua*. Madrid, España.

Calzada, J. F., & Porres, C. (1987). Planta piloto para el tratamiento de efluentes del beneficio húmedo de café. *3 Simposio Internacional sobre la utilización integral de los subproductos del café, ANACAFÉ*, 85-90.

Carawan, R. E., Chambers, J., & Zall, R. (1979). *Spinoff on fruit and vegetable wáter and wastewater management* (AM-18 E Extension Special Report; pp. 35-75). North Carolina State University; Cornell University; Purdue University.

Centro Nacional de Investigaciones de Café. (1998). *Informe Anual Cenicafé 1998*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/10783/1998>

Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2019). *Anuario Meteorológico Cafetero 2018*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/10782/anu2018>

Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2020). *Anuario Meteorológico Cafetero 2019*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/10782/anu2019>

Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2021). *Anuario Meteorológico Cafetero 2020*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/10782/anu2020>

Chandrasekhar, V. (1974). Wastes from coffee processing. *Planters' Chronicle*, 69(7), 133-135.

Coffee Research Foundation. (1977). Recirculation of water combined with land treatment as a solution to the problem of river pollution from coffee factories. *Kenia Coffee*, 42(500), 367-373.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. (2014). *Pasto elefante enano* (Sistema de Toma de Decisión para la selección de especies Forrajeras) [Ficha técnica 70]. http://www.corpoica.org.co:8086/NetCorpoicaMVC/STDF/Content/fichas/pdf/Ficha_70.pdf

Crites, R. W., Reed, S. C., & Bastian, R. K. (2000). *Land treatment systems for municipal and industrial wastes*. McGraw-Hill.

Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones* (M. Camargo, L. P. Pardo, & G. Mejía, Trads.). McGraw-Hill.

Curt, M. D. (2004). Fitodepuración en humedales. Conceptos generales. En J. Fernández, E. Beascochea, J. Muñoz, & M. D. Curt, *Manual de Fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación* (pp. 61-78). Fundación Global Nature. https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2020/01/manual_fitodepuracion.pdf

Dawson, W. M., & Wilson, F. E. A. (2003, noviembre 10). The use of short rotation coppice in the bioremediation of municipal wastewater. *Proceedings of an International Congress Held at the SECC*. Crop Science and Technology, Glasgow, Scotland. <https://eurekamag.com/research/004/365/004365529.php>

Decagon Devices. (2014): *5TE: Water Content, EC and Temperature Sensor: Operator's Manual*. Decagon Devices Inc.

Dimitriou, I., & Aronsson, P. (2011). Wastewater and sewage sludge application to willows and poplars grown in lysimeters-Plant response and treatment efficiency. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 161-170. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.019>

Fernández, N. & Morillo, M. (2006). Efecto de la densidad de siembra del Vetiver (*Chrysopogon zizanioides* L) en la producción de plantas madres en condiciones de campo. UCV. Venezuela.

Fia, R. (2008). *Desempenho de sistemas alagados construídos no tratamento de águas residuárias da lavagem e descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro* [Tesis de Doctorado, Universidade Federal de Viçosa]. <http://locus.ufv.br/handle/123456789/640>

Fia, R., & Matos, A. T. (2001, septiembre 24-27). Avaliação da eficiência e impactos ambientais causados pelo tratamento de águas residuárias da lavagem e despolpa de frutos do cafeeiro em áreas alagadas. En Consórcio Pesquisa Café e Desenvolvimento do Café (Organizador), *II Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil*, Vitória, Espírito Santo, Brasil. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/1236>

Flores, C. E. (2020). *Utilización del maíz forrajero (Zea mays) y pasto elefante (Pennisetum purpureum) en el incremento de peso del ganado caprino (Capra hircus) en el centro pecuario de la Universidad Nacional de Tumbes*. 2019. Universidad Nacional de Tumbes [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Tumbes]. <http://hdl.handle.net/123456789/2220>

Frédette, C., Labrecque, M., Comeau, Y., & Brisson, J. (2019). Willows for environmental projects: A literature review of results on evapotranspiration rate and its driving factors across the genus Salix. *Journal of Environmental Management*, 246, 526-537. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.010>

Gnansounou, E., Alves, C. M., & Raman, J. K. (2017). Multiple applications of vetiver grass - a review. *International Journal of Environmental Science*, 2, 125-141. <https://www.ias.org/ias/home/caijes/multiple-applications-of-vetiver-grass-a-review>

Gómez-Aristizábal, A., & Rivera, J. H. (1987). *Descripción de malezas en plantaciones de café*. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/613>

Guidi, W., Piccioni, E., & Bonari, E. (2008). Evapotranspiration and crop coefficient of poplar and willow short-rotation coppice used as vegetation filter. *Bioresource Technology*, 99(11), 4832-4840. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.055>

Hammer, D. A. (Ed.). (1989). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment Municipal, Industrial and Agricultural*. CRC Press.

Herschbach, C., Mult, S., Kreuzwieser, J., & Kopriva, S. (2005). Influence of anoxia on whole plant sulphur nutrition of flooding-tolerant poplar (*Populus tremula* x *P. alba*). *Plant, Cell and Environment*, 28(2), 167-175. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2004.01256.x>

Holm, B., & Heinsoo, K. (2013). Municipal wastewater application to Short Rotation Coppice of willows - Treatment efficiency and clone response in Estonian case study. *Biomass and Bioenergy*, 57, 126-135. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.001>

Iglesia, J. (2016). *Filtros verdes. Humedales. Macrofitas. Módulo Gestión de Aguas Residuales y Reutilización* [Tesis de Maestría, Escuela de Organización Industrial]. https://static.eoi.es/savia/documents/filtros-verdes_humedales_y_macrofitas_magua_2016.pdf

Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC. (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos* (6ª ed.). Bogotá, Colombia: IGAC.

Istenič, D., Božič, G., Arias, C. A., & Bulc, T. G. (2017). Growth dynamic of three different white willow clones used in a zero-discharge wastewater treatment system in the Sub-Mediterranean region—An early evaluation. *Desalination and water treatment*, 91, 260-267. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21186>

Jewell, W. J., Kodukula, P. S., & Wujcik, W. J. (1978). *Limitations of land treatment of wastes in the vegetable processing industries* (p. 143) [Final Report]. Cornell University.

Lardé, G. (1984, noviembre 1-24). Aprovechamiento de los subproductos del café: El caso de El Salvador. *Memorias del VI Congreso Nacional de Ingeniería*. San Salvador, El Salvador.

Lima, L. A., Martins, C. P., Evangelista, A. W. P., Alves, D. N. B., & Gonzaga, R. P. (2007). Efeitos da aplicação de água residuária da despolpa do café sobre atributos físicos e químicos do solo. En Consórcio Pesquisa Café e Desenvolvimento do Café (Organizador), *V Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil*, Águas de Lindóia, São Paulo, Brasil. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/2423>

Lo Mónaco, P. A. (2005). *Fertirrigação do cafeeiro com águas residuárias da lavagem e descascamento de seus frutos* [Tesis de Doctorado, Universidade Federal de Viçosa]. <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/9814>

Lo Mónaco, P. A., Matos, A. T., & Silva, N. C. L. (2007, mayo 7-11). Alteração das características químicas do solo quando fertirrigado com água residuária do processamento dos frutos do cafeeiro. En Consórcio Pesquisa Café e Desenvolvimento do Café (Organizador), *V Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil*, Águas de Lindóia, São Paulo, Brasil. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/2459>

López, R., Martínez-Bordiu, A., Dupuy De Lome, E., Cabrera, F., & Murillo, J. M. (1992). Land treatment of liquid wastes from the olive oil industry (Alpechin). *Fresenius Environmental Bulletin*, 1(2), 129-134. <https://digital.csic.es/handle/10261/66971>

Machado, R., Lamela, L., & Gerardo, J. (2014). Hierba elefante (*Pennisetum purpureum* Schumach). *Pastos y Forrajes*, 2(2), 157-191. <https://payfo.ihatuey.cu/index.php?journal=pasto&page=article&op=view&path%5B%5D=1728>

Martín, I. (1993). Sistemas de aplicación al suelo. Filtros verdes. En Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Centro y Canarias & Curso sobre Tratamiento de Aguas Residuales Basuras y Escombros en el Ámbito Rural (Eds.), *Tratamiento de aguas residuales, basuras y escombros en el ámbito rural* (pp. 155-185). Editorial Agrícola Española.

Matos, A. T., Fia, R., Pinto, A. B., Gomes Filho, R. R., & Rezende, A. A. P. (2000, septiembre 26-29). Qualidade das águas superficial e subterranea em área alagada usada para tratamento de águas residuárias da lavagem e despolpa de frutos de cafeeiro. En Consórcio Pesquisa Café e Desenvolvimento do Café (Organizador), *I Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil*, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/576>

Matos, A. T., Fia, R., Lo Mónaco, P. A. (2001, septiembre 24-27). Fertirrigação da cultura do cafeeiro com águas residuárias da lavagem e despolpa de seus frutos. En Consórcio Pesquisa Café e Desenvolvimento do Café (Organizador), *II Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil*, Vitória, Espírito Santo, Brasil. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/1182>

Matos, A. T., Emmerich, I. N., & Brasil, M. S. (2005). Tratamiento por escoamento superficial de águas residuárias da lavagem e despolpa de frutos do cafeeiro em rampas cultivadas com azevém. *Engenharia na Agricultura*, 13(4), 240-246.

Metcalf & Eddy Inc. (1995). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización* (A. García, Ed.; 3a ed.). McGraw-Hill.

Miguel, A. de, Meffe, R., Leal, M., González-Naranjo, V., Martínez-Hernández, V., Lillo, J., Martín, I., Salas, J. J., & Bustamante, I. de. (2014). Treating municipal wastewater through a vegetation filter with a short-rotation poplar species. *Ecological Engineering*, 73, 560-568. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.059>

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

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Alternativas tecnológicas en agua y saneamiento para el sector rural*. (Título J.; Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS., p. 282). https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/100811_titulo_j_ras-.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Decreto Número 2667 de 2012 la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones*. <http://www.emserchia.gov.co/PDF/Decreto2667.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 631 del 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones*. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-631-de-2015/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). Decreto Número 50 de 2018. Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible en relación con los Consejos Ambientales Regionales de la Macrocuencas (CARMAC), el Ordenamiento del Recurso Hídrico y Vertimientos y se dictan otras disposiciones. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=85084>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Resolución 1256 del 2021 Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones. [Resolución 1256 de 2021 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible \(minambiente.gov.co\)](https://www.minambiente.gov.co/resolucion-1256-de-2021)

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Resolución 699 del 2021 Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas Tratadas al suelo, y se dictan otras disposiciones. https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion_minambienteds_0699_2021.htm

Mokma, D. L. (2006). Capacity of Soils to assimilate wastewaters from food processing facilities. Green Project Alternative for Food Processor's Wastewater.

Mora, W. G. (1978). *Tratamiento de residuos de café en Costa Rica* [Tesis de pregrado]. Universidad de Costa Rica.

Olguín, E. J., Rodríguez, D., Sánchez, G., Hernández, E., & Ramírez, M. E. (2003). Productivity, Protein Content and Nutrient Removal from Anaerobic Effluents of Coffee Wastewater in *Salvinia minima* Ponds, under Subtropical Conditions. *Acta Biotechnologica*, 23(23), 259-270. <https://doi.org/10.1002/abio.200390033>

Oliveros, C. E., Sanz, J. R., Ramírez, C. A., & Tibaduiza, C. A. (2013). Ecomill®. Tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 432, 1-8. <https://doi.org/10.38141/10779/0432>

Pinto, A. B., Matos, A. T., Fukunaga, D. C. (2000, septiembre 26-29). Produtividade e desempenho agrônomico de duas forrageiras para uso em tratamento por disposição no solo das águas residuárias da lavagem e despulpa de frutos do cafeeiro. En Consórcio Pesquisa Café e Desenvolvimento do Café (Organizador), *I Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil*, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/604>

Pistocchi, C., Guidi, W., Piccioni, E., & Bonari, E. (2009). Water requirements of poplar and willow vegetation filters grown in lysimeter under Mediterranean conditions: Results of the second rotation. *Desalination*, 246(1-3), 137-146. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.047>

Productos Químicos Andinos. S. A. (PQA). (2021). Producto Agrobblack Esp 6. <https://www.pqapag.co/>

Ramírez, J. D. (2015). *Evaluación de vetiver (Chrysopogon zizanioides) y la elefanta (Pennisetum purpureum) en el diseño de humedales artificiales* [Tesis de Pregrado]. Universidad de Medellín. <http://hdl.handle.net/11407/2175>

Ramos, A. N., Molina Soler, G., Flores, I., & Soler, F. I. (2021). Reaching sustainability through a smart water crisis-proof industry. *Procedia Computer Science*, 180, 86-92. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.132>

Robles, S. E. (1979). *Estudio preliminar del tratamiento de las aguas de lavado de café con jacintos de agua (Eichhornia crassipes)*. [Tesis de pregrado]. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Robles, S. E., Calzada, J. F., & Rolz, C. (1983). Tratamiento de las aguas de lavado de café usando jacintos acuáticos. *Ingeniería Química*, 3(4), 11-14.

Rodríguez-Valencia, N. (2009). Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/4342>

Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L., & Castañeda, S. A. (2021). *Construya y opere su sistema séptico para el tratamiento de las aguas residuales de la vivienda de su finca cafetera*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0012>

Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L. V., & Castañeda, S. A. (2022). *Construya y opere un humedal artificial para el postratamiento de las aguas residuales de su finca cafetera*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0013>

Rodríguez-Valencia, N., Castañeda, S. A., Osorio, A. F., Quintero, L. V. (2019). *Boletín Técnico Cenicafé*, 42, 1-46. <https://www.cenicafe.org/es/publications/BoletinTecnico42.pdf>

Rodríguez-Valencia, N., Sanz, J. R., Oliveros, C. E., & Ramírez, C. A. (2015). *Beneficio del café en Colombia: Prácticas y estrategias para el ahorro uso eficiente del agua y el control de la contaminación hídrica en el proceso de beneficio húmedo del café*. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/659>

Rosenbaum, U., Huisman, J. A., Weuthen, A., Vereecken, H., & Bogen, 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>

Rosenqvist, H., & Ness, B. (2004). An economic analysis of leachate purification through willow-coppice vegetation filters. *Bioresource Technology*, 94(3), 321-329. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.12.017>

Sadeghian, S. (2013). Nutrición de cafetales. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (Ed.), *Manual del cafetero colombiano: investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (Vol. 2, pp. 85-116). Cenicafé.

Simonete, M. A., Chaves, D. M., Teixeira, C. F. A., Moro, L., & Neves, C. U. (2013). Fornecimento de cálcio para plantas de eucalyptus saligna por meio de aplicação de resíduo industrial lama de cal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(5), 1343-1351. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000500023>

Soares, G. F., Soares, V. F., Soares, S. F., Donzeles, S. M. L., Moreli, A. P., Rocha, A. C., Prezotti, L. C. (2007). Efeito da água residual do café em plantas de milho. En Consórcio Pesquisa Café e Desenvolvimento do Café (Organizador), *V Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil*, Águas de Lindóia, São Paulo, Brasil. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/2445>

Starr, J. L., & Paltineanu, E. (2002). Methods of Soil Water Content: Capacitance Devices. En J. H. Dane & C. G. Topp (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods* (pp. 436-474). Soil Science Society of America.

Trapp, S., Ciucani, G., & Sismilich, M. (2004). Toxicity of tributyltin to willow trees. *Environmental Science and Pollution Research*, 11(5), 327-330. <https://doi.org/10.1007/BF02979647>

Truong, P., & Danh, L. T. (2015). *El Sistema vetiver para mejorar la calidad del agua. Prevención y tratamiento de aguas y tierras contaminadas* (P. Ruiz & I. Toussieh, Trads.; 2a ed.). Red Internacional del Vetiver.

Truong, P., & Hart, B. (2001). *Vetiver system for wastewater treatment*. (Núm. 2001/2; Pacific Rim Vetiver Network Technical Bulletin, p. 26). The Vetiver Network International (TVNI). http://www.vetiver.org/PRVN_wastewater_bul.pdf

Truong, P., Van, T. T., & Pinners, E. (2008). *Aplicaciones del sistema vetiver manual técnico de referencia* (2a ed.). The Vetiver Network International. https://www.vetiver.org/vetiver_files/TVN_manual_spanish%20o.pdf

United States Environmental Protection Agency. (1988). *Design Manual. Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment*. (EPA/625/1-88/022; p. 166). Office of Research and Development.

Yang, F., Yang, Y., Li, H., & Cao, M. (2015). Removal efficiencies of vegetation-specific filter strips on nonpoint source pollutants. *Ecological Engineering*, 82, 145-158. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.018>

Yaqub, M. & Lee, W. (2019). Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater: A review. *Science of The Total Environment*, 681, 551-563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.062>

Zambrano, D. A., Rodríguez-Valencia, N., López, U., & Zambrano, A. J. (2010). *Construya y opere su sistema modular de tratamiento anaerobio para las aguas mieles*. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/313>

Zupanc, V., & Justin, M. Z. (2010). Changes in soil characteristics during landfill leachate irrigation of *Populus deltoides*. *Waste Management*, 30(11), 2130-2136. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.05.00>

