

Tratamiento

de las aguas residuales de las viviendas cafeteras utilizando

filtros verdes
con cero descargas

Nelson Rodríguez Valencia - Samuel Antonio
Castañeda - Cristian Camilo Arboleda Ospina -
Carlos Roberto Ariza Orejarena - Héctor Flabio
Álvarez Agudelo - Myriam Cañón Hernández -
León Darío Caicedo Restrepo - Jhon Félix
Trejos Pinzón - Julián Raúl Peña

**Cenicafé**
Centro Nacional de Investigaciones de Café

**Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia**

Tratamiento

de las aguas residuales de las viviendas cafeteras utilizando

filtros verdes
con cero descargas

Nelson Rodríguez Valencia*, **Samuel Antonio Castañeda***, **Cristian Camilo Arboleda Ospina***, **Carlos Roberto Ariza Orejarena****, **Héctor Flabio Álvarez Agudelo****, **Myriam Cañón Hernández****, **León Darío Caicedo Restrepo****, **Jhon Félix Trejos Pinzón****, **Julián Raúl Peña*****

** Investigador Científico III, Auxiliar de Investigación y Asistente de Investigación, respectivamente. Disciplina Poscosecha. Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-0897-4013>, <https://orcid.org/0000-0002-2337-9514>, <https://orcid.org/0009-0006-9612-0710>*

*** Coordinador Estación Experimental San Antonio, La Catalina, La Trinidad, El Rosario y Naranjal, respectivamente. Disciplina Experimentación. Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0001-7584-0790>, <https://orcid.org/0000-0003-2349-2856>*

**** Gerente Productos Plásticos de Colombia, Proplacol.*



COMITÉ NACIONAL

Ministro de Hacienda y Crédito Público
Germán Ávila Plazas

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural
Martha Viviana Carvajalino Villegas

Ministro de Comercio, Industria y Turismo (designada)
Diana Marcela Morales Rojas

Director del Departamento Nacional de Planeación
Natalia Irene Molina Posso

Asesor del Gobierno en Asuntos Cafeteros
Rogelio Andrés Rodríguez Castillo

REPRESENTANTES GREMIALES

Período 1° enero/2023 - 31 diciembre/2026

Jorge Alberto Posada Saldarriaga (Antioquia)

José Alirio Barreto Buitrago (Boyacá)

Eugenio Vélez Uribe (Caldas)

Danilo Reinaldo Vivas Ramos (Cauca)

Marco Tulio García (Cesar-Guajira)

Javier Bohórquez Bohórquez (Cundinamarca)

Ruber Bustos Ramírez (Huila)

Javier Mauricio Tovar Casas (Magdalena)

Jesús Armando Benavides Portilla (Nariño)

Armando Amaya Álvarez (Norte de Santander)

Carlos Alberto Cardona Cardona (Quindío)

Luis Miguel Ramírez Colorado (Risaralda)

Héctor Santos Galvis (Santander)

Carlos Sánchez Serrano (Tolima)

Gerente General

Germán Alberto Bahamón Jaramillo

Gerente de Operaciones

Carlos Arturo Azuero Perdomo

Gerente Financiero y Recursos Organizacionales

Reynaldo Díaz Medina

Gerente Comercial

Esteban Ordoñez Simmonds

Gerente Técnico

Álvaro León Gaitán Bustamante

Director Investigación Científica y Tecnológica

Santiago Jaramillo Cardona

© FNC - Cenicafé - FoNC
2025

COMITÉ EDITORIAL

Marco Aurelio Cristancho A.

Ph.D. Microbiólogo. Fitopatología, Cenicafé

Carmenza Esther Góngora B.

Ph.D. Microbióloga. Entomología, Cenicafé

Aída Esther Peñuela M.

Ph.D. Ing. Alimentos. Poscosecha, Cenicafé

Diana María Molina V.

Ph.D. Bacterióloga. Mejoramiento Genético,
Cenicafé

Luis Fernando Salazar G.

Ph.D. Ing. Agrónomo. Suelos, Cenicafé

Secretaría Técnica Comité Editorial, revisión
de textos y corrección de estilo

Sandra Milena Marín L.

M.Sc. Ing. Agrónoma. Divulgación y
Transferencia, Cenicafé

Editor Web

Miguel Alfonso Castiblanco C.

M.Sc. Bibliotecólogo/Ing. de Sistemas. Centro
de Documentación, Cenicafé

Diseño y diagramación

Alejandra Velásquez Mejía

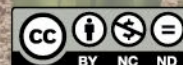
Fotografías

Archivo Cenicafé



DOI: 10.38141/cenbook-0084

Los trabajos suscritos por el personal técnico del Centro Nacional de Investigaciones de Café son parte de las investigaciones realizadas por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Sin embargo, tanto en este caso como en el de personas no pertenecientes a este Centro, las ideas emitidas por los autores son de su exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente las opiniones de la Entidad.



A person wearing a white lab coat and a yellow apron is working with a bio-natur filter system. The filter is a large, cylindrical container with a white pipe and a red valve. The person is standing in a field with trees in the background. The bio-natur logo is visible on the filter.

bio-natur

Citación:

Rodríguez-Valencia, N., Castañeda, S. A., Arboleda-Ospina, C. C., Ariza, C. R., Álvarez, H. D., Cañón, M., Caicedo-Restrepo, L. D., Trejos Pinzón, J. F., Peña, J. R. (2025). *Tratamiento de las aguas residuales de las viviendas cafeteras utilizando filtros verdes con cero descargas*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0084>

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ, CENICAFÉ
Manizales, Caldas, Colombia
Tel. (606) 8500707
www.cenicafe.org



Tabla de Contenido

	Presentación	6
	Introducción	8
	¿Qué son las Aguas Residuales Domésticas (ARD)?	10
	¿Qué son las Aguas Residuales no Domésticas (ARnD)?	10
	¿Cuál es el impacto ambiental generado por las ARD?	10
	¿Cuál es la normativa que aplica para las ARD?	12
	Características de calidad que deben cumplir las Aguas Residuales Domésticas Tratadas (ARD-T) cuando son descargadas al suelo	12
	Usuarios de vivienda rural dispersa	12
	Usuarios equiparables a usuarios de vivienda rural dispersa	12
	Usuarios diferentes a usuarios equiparables y a usuarios de vivienda rural dispersa	13
	Características de calidad que deben cumplir las ARD-T cuando son descargadas a fuentes hídricas superficiales	14
	Características de calidad que deben cumplir las ARD-T cuando son reusadas	14
	¿Qué sucede si no se cumple con los requerimientos legales en el manejo, tratamiento y disposición de las ARD?	18
	¿Cómo pueden disminuirse los costos de manejo y tratamiento de las ARD?	18



¿Cuál es el sistema recomendado para el manejo, tratamiento y
cero descargas de las ARD de la vivienda de la finca cafetera? 20

Componentes del sistema séptico 21

Trampa de grasas 22

Tanque séptico 24

Eliminación de lodos en el tanque séptico 28

Lecho de secado de lodos 32

Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) 37

Campos de infiltración 38

Filtro verde con cero descargas 44

Implementaciones en el campo 68

**Diseños recomendados de sistemas sépticos con filtro verde
de cero descargas 72**

**Recomendaciones para el buen desempeño de los sistemas de
tratamiento de ARD-T con cero descargas 72**

Consideraciones finales 76

Glosario 79

Preguntas frecuentes 83

Literatura citada 89

PRESENTACIÓN

En las fincas cafeteras se generan diferentes tipos de aguas residuales, las cuales tienen distinta composición físico-química y microbiológica y, por lo tanto, diferente impacto ambiental sobre el ecosistema cafetero. Entre ellas, se tienen las aguas residuales de las viviendas, generadas después del uso del agua de abastecimiento en actividades como la preparación de alimentos, la higiene personal, el lavado de ropa y utensilios, el aseo de la casa y la descarga de las unidades sanitarias. Este tipo de agua residual se genera en la vivienda diariamente y se caracteriza por tener altos contenidos de grasas y de materia orgánica biodegradable, lo que facilita su manejo y tratamiento mediante la aplicación de procesos físicos y biológicos.

Otro tipo de aguas residuales que se generan en la finca cafetera son las provenientes del beneficio de café, constituidas principalmente por el agua utilizada en la clasificación hidráulica, el lavado del grano y el aseo de las máquinas utilizadas en la transformación del fruto en café pergamino seco. Este tipo de agua residual se genera sólo en la época de cosecha (mitaca y principal), tradicionalmente entre los meses de marzo a mayo y de septiembre a noviembre, dependiendo de la zona, y se caracteriza por tener un bajo valor de pH (alta acidez) y una carga orgánica muy alta; cuando se utilizan tecnologías ahorradoras de agua, como el lavado en el tanque de fermentación, la tecnología Becolsub o la tecnología Ecomill® (Rodríguez et al., 2015), pueden tener valores de

carga orgánica entre 50 y 200 veces superiores a las presentes en las aguas residuales domésticas, y cuyos compuestos presentan una alta biodegradabilidad, por lo que pueden ser tratadas mediante procesos biológicos.

Finalmente, se tienen las aguas residuales contaminadas con agroquímicos, que son todas aquellas provenientes del lavado de la indumentaria y de los equipos de aspersión, las cuales se generan sólo cuando se realizan actividades para el control de arvenses y de enfermedades y plagas del café, como la roya y la broca, respectivamente, y se caracterizan por su contaminación química con el ingrediente activo presente en los agroquímicos, que suelen ser poco biodegradables, por lo que para su tratamiento se requiere combinar tratamientos físicos, químicos y biológicos.

La normativa colombiana establece que el agua usada en las diferentes actividades: doméstica, industrial, comercial, agrícola, ganadera, entre otras, debe ser tratada antes de ser descargada a los cuerpos de aguas superficiales, al suelo o reusadas en la agricultura. Para ello, mediante decretos y resoluciones se han establecido los parámetros de calidad y sus valores máximos permisibles para autorizar su descarga o reúso, lo que implica que en las fincas cafeteras deben instalarse plantas de tratamiento para los tres diferentes tipos de agua generadas y, adicionalmente, contratar el servicio de un laboratorio acreditado para que realice el

muestreo y la caracterización de las aguas tratadas y posteriormente, enviar los resultados de la caracterización a la autoridad ambiental para demostrar el cumplimiento de la norma, que de no cumplirse podría acarrear sanciones económicas y el cierre de la actividad productiva.

La tendencia actual a nivel mundial es adoptar Programas de Uso Eficiente y Ahorro de Agua (PUEAA) tanto en la vivienda como en los procesos productivos, con el fin de disminuir el consumo de agua y, por lo tanto, generar menores volúmenes de aguas residuales, lo que se traduce en que se puedan instalar sistemas de tratamiento más pequeños. De igual forma, incorporar en el manejo y tratamiento de las aguas residuales sistemas de cero descargas con los cuales no se presentan vertidos a los cuerpos de aguas superficiales ni al suelo. La implementación de este tipo de soluciones en nuestro país, no sólo permite conservar la salud de los recursos naturales, sino que también representan un ahorro para los productores que generen aguas residuales en sus actividades productivas, dado que, si no hay vertidos, se eliminan los costos legales ambientales asociados a los mismos (permiso de vertimientos, muestreo y caracterización del agua residual tratada).

Para el caso de las aguas residuales del café, Cenicafé desarrolló la tecnología de filtros verdes con cero descargas, mediante la cual las aguas son tratadas en una serie de tanques de polietileno y luego evaporadas en un invernadero con piso impermeabilizado,

por medio de especies vegetales con una alta tasa evapotranspirativa permitiendo que no se generen vertidos (Rodríguez et al., 2022a).

Para el manejo y tratamiento de las aguas residuales contaminadas con agroquímicos, Cenicafé desarrolló la tecnología de las biocamas incorporando pasto vetiver, en las cuales el agua residual es tratada y evaporada, permitiendo que no se generen vertidos (Rodríguez et al., 2024)

De acuerdo con la normativa ambiental vigente, las Aguas Residuales Domésticas (ARD) deben ser tratadas antes de realizar su descarga final al suelo o a cuerpos de agua superficiales y obtener un permiso de vertimientos ante la autoridad ambiental, para aquellos generadores que no estén categorizados como vivienda rural dispersa. En la presente publicación se detallan las diferentes unidades que componen un sistema para el manejo, tratamiento y cero descargas de las aguas residuales de las viviendas rurales cafeteras, que incorporan la tecnología de filtros verdes. Adicionalmente, se ilustran los tamaños y configuraciones más comunes para un sistema de cero descargas de ARD y sus diferentes actividades de mantenimiento, reparación y recuperación, de forma que puedan ser implementados por los caficultores para eliminar los costos legales ambientales asociados a la disposición de un vertimiento, que significa un costo importante para los productores, representado en la visita de la autoridad ambiental, el muestreo del vertimiento y la caracterización del mismo.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental para las diferentes formas de vida en nuestro planeta y la disminución en cantidad y calidad del recurso hídrico superficial y subterráneo tiene un impacto negativo en la salud de los ecosistemas, incluida la salud humana, y en el rendimiento y la producción tanto agropecuaria, como industrial y comercial, siendo necesario generar estrategias que permitan incrementar la oferta del recurso hídrico en cantidad y calidad para satisfacer las necesidades de los ecosistemas, de las personas y de los gremios productivos.

Por efecto del cambio climático, ocasionado en gran medida por la contaminación atmosférica generada por las diferentes actividades antrópicas, se han ido incrementando las temperaturas medias en el planeta, lo que ha cambiado de forma significativa los patrones de precipitación, por lo que se han generado períodos muy secos en donde hay escasez de agua, tanto por su pérdida por evaporación de las fuentes superficiales como por la falta de recarga de las mismas a partir de la lluvia, alterando y disminuyendo la cantidad de agua presente en las fuentes. Para este caso la adopción de un Programa de Uso eficiente y Ahorro de Agua, es parte de la estrategia de adaptación al cambio climático, con el fin de tener una menor demanda de agua y ello se consigue a nivel de las viviendas y de los sectores productivos adoptando prácticas de comportamiento y de ingeniería, en las cuales no se malgaste el recurso y se incorporen equipos ahorradores de agua.

De otra parte, la falta de manejo y tratamiento eficiente a las diferentes aguas residuales

generadas (domésticas, industriales, agropecuarias) y su descarga a cuerpos de agua superficiales o al suelo, altera la calidad del recurso hídrico superficial y subterráneo lo que limita su uso tanto para el consumo humano, como para los sectores productivos y la recreación. Para este caso, la implementación de sistemas de manejo y tratamiento del agua con cero descargas se constituye en una estrategia de adaptación y mitigación al cambio climático, dado que, si no hay vertidos, no se altera la calidad del agua superficial y subterránea y un manejo con cero descargas disminuye los Gases Efecto Invernadero que pueden generarse durante los procesos auto depurativos de las aguas residuales.

De acuerdo con el informe más reciente de cobertura nacional de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo (Superservicios, 2024), la cobertura de servicios públicos en las zonas rurales de Colombia presenta un reto considerable, especialmente para los servicios de alcantarillado y aseo. El 73,52% del país (811 municipios) presentan coberturas en alcantarillado menores al 30%, de los cuales 607 municipios tienen coberturas menores al 15%, estos últimos se distribuyen por región: Andina con 437 municipios (donde se cultiva principalmente el café), Caribe 54, Pacífica con 61, Orinoquia 37 y Amazonia 18, evidenciando la baja cobertura en el servicio de alcantarillado de las zonas rurales (Superservicios, 2024). Lo anterior, indica una grave deficiencia en el acceso a agua potable y saneamiento básico para la población rural, afectando negativamente la salud, la calidad de vida y el desarrollo de las

comunidades rurales. En Colombia, el servicio de alcantarillado contempla la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de las aguas residuales.

Para el caso de los ecosistemas cafeteros, se presenta deterioro en la calidad del agua superficial y problemas de erosión de suelos, ocasionado por el inadecuado manejo y tratamiento de las aguas residuales de las viviendas y del beneficio del café. En investigaciones de Cenicafé en microcuencas cafeteras, se evidenció que fuentes superficiales de las cuales se abastecían los productores recibían los vertimientos domésticos de los pobladores del área de influencia deteriorando la calidad del recurso (Rodríguez et al., 2018). Por consiguiente, el manejo y tratamiento de las aguas residuales de las viviendas cafeteras es fundamental para preservar la calidad del agua en el territorio, caracterizado por poseer una rica red hídrica abastecida por los ecosistemas de páramos y bosques, con centenares de microcuencas proveedoras; aunque, paradójicamente, existe déficit de agua para uso agronómico en los valles del Magdalena y Cauca (Rodríguez et al., 2022b).

De acuerdo con las investigaciones de Cenicafé, la contaminación orgánica presente en las aguas residuales de la vivienda representa, para una finca promedio, el 64% de la contaminación generada por las aguas residuales del beneficio del café. En el Estudio Nacional del Agua 2018, se establecía que del total de las aguas residuales domésticas generadas en el país, sólo se eliminó el 10,0% de la carga orgánica, el 90,0% restante

continuó generando contaminación tanto del recurso suelo como de los cuerpos de agua superficiales, subterráneos y marinos (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Ideam, 2019). En el Estudio Nacional del Agua 2022 (Ideam, 2023), se estableció que del total de las aguas residuales domésticas generadas en el país, se eliminó el 43% de la carga orgánica, lo que demuestra un progreso respecto a las cifras del año 2018, evidenciando la toma de conciencia por parte de los generadores y el papel de la autoridad ambiental para hacer cumplir la normativa.

El informe de Superservicios (2024) también destaca la importancia de las soluciones particulares, como alternativa a los servicios públicos, especialmente en zonas rurales, para mejorar el acceso a agua potable y saneamiento básico, concluyendo que se observa un aumento significativo en la cobertura rural de acueducto y alcantarillado al considerar estas soluciones.

Por lo anterior, la implementación de un sistema para el manejo y tratamiento de las aguas residuales provenientes de la vivienda cafetera utilizando la tecnología de filtros verdes con cero descargas, como solución particular para mejorar la cobertura de saneamiento básico en la zona rural cafetera, permitirá incrementar la cobertura de saneamiento básico, proteger los recursos suelo y agua, al no presentar vertidos, contribuirá a alcanzar la sostenibilidad ambiental en las fincas cafeteras, a la vez que permite generar ahorros económicos, al eliminar los costos legales ambientales relacionados con los vertidos de aguas residuales.

¿Qué son las Aguas Residuales Domésticas (ARD)?

Son las aguas que se generan en las actividades domésticas (preparación de alimentos, aseo personal, descarga de las unidades sanitarias, lavado de ropa, lavado de utensilios de cocina y limpieza de infraestructuras, entre otros), y que son descargadas a los alcantarillados domiciliarios o directamente al ambiente. En la Tabla 1 se presentan los valores promedio de la composición típica del ARD generada en la Estación Experimental Naranjal de Cenicafé y en la Figura 1 el aspecto de la misma.

Las características físico-químicas y microbiológicas de las ARD varían de acuerdo con factores internos y externos. Entre los factores externos están las condiciones del lugar donde se generan las aguas residuales, tales como: la localización del sitio, la temperatura ambiental, el origen y la calidad del agua de abastecimiento; entre los factores internos se destacan: el número de habitantes, el desarrollo socio-económico de la región, la dieta en la alimentación de los pobladores, el tipo de aparatos sanitarios y la aplicación de prácticas de uso eficiente de agua (MinAmbiente, 2002).

Los principales contaminantes presentes en las ARD son la materia orgánica y la presencia de microorganismos patógenos provenientes de las heces o excretas y de la orina humana, la grasa proveniente de los residuos orgánicos de la cocina y los fosfatos provenientes de los detergentes utilizados en las labores de aseo. Las ARD presentan un alto contenido de materia orgánica que es biodegradable, es decir, que puede ser degradada biológicamente, siendo el método más económico en su depuración la utilización

de sistemas de tratamiento que incorporen microorganismos y especies vegetales.

¿Qué son las Aguas Residuales no Domésticas (ARnD)?

La Resolución 631 del 2015 (MADS, 2015b) define las ARnD, como: “*las procedentes de las actividades productivas, agrícolas, pecuarias, industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituyen las ARD*”.

TABLA 1. Composición típica del ARD de la Estación Experimental Naranjal.

VARIABLE	UNIDADES	VALOR
Caudal	L s ⁻¹	0,04
pH	Unidad	6,75
Temperatura	°C	23,63
Conductividad eléctrica	µs cm ⁻¹	655
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)	mg L ⁻¹	672
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg L ⁻¹	1.620
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg L ⁻¹	1.601
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL L ⁻¹	19,67
Aceites y Grasas	mg L ⁻¹	21,10
Coliformes totales	UFC/100 mL	2x10 ⁸
Coliformes fecales	UFC/100 mL	1x10 ⁸

En los recuadros se definen algunos de los parámetros condensados en la Tabla 1.

¿Cuál es el impacto ambiental generado por las ARD?

Considerando la composición físico-química y microbiológica de las ARD, su descarga sin algún tratamiento al medio ambiente (suelo, aguas superficiales y subterráneas) se convierte



Figura 1. Aspecto del ARD generada en la Estación Experimental Naranjal de Cenicafé.

pH: es una medida del grado de acidez (valores por debajo de 7,0) o de alcalinidad (valores por encima de 7,0) del agua.

Conductividad eléctrica: medida de la presencia de iones disueltos (sales y minerales) en el agua.

DBO: es un parámetro de calidad del agua que permite determinar el contenido de materia orgánica, que puede ser eliminada de la misma mediante tratamiento biológico.

DQO: es un parámetro de calidad del agua que permite determinar el contenido de materia orgánica presente en la misma, que puede ser eliminada mediante tratamiento químico.

SST: se refiere al material no disuelto presente en el agua.

SSED: volumen de sólidos que sedimentan del agua en una hora, cuando esta se deja en reposo en un sedimentador.

Aceites y grasas: se refiere a la presencia de ácidos grasos en el agua.

Coliformes totales y fecales: se refiere a la presencia en el agua de bacterias contenidas en las heces fecales y se expresan en Unidades Formadoras de Colonia (UFC) presentes en 100 mL de agua.

en un problema ambiental crítico, que se hace mayor si se considera el incremento poblacional de nuestro país. Las ARD sin tratamiento que son vertidas a las fuentes hídricas superficiales deterioran su calidad, situación que se hace más compleja cuando el cauce sobre el cual se realiza el vertido tiene un uso definido aguas abajo, pues se modifican las características de calidad requeridas en el agua para los diferentes sectores (doméstico, industrial, agrícola, pecuario, piscícola, recreativo, entre otros) y se afecta la vida acuática.

De acuerdo con los reportes del Estudio Nacional del Agua 2022 (Ideam, 2023), las aguas residuales industriales (ARI) son las que generan, a nivel nacional, los mayores impactos de contaminación hídrica por carga orgánica, en promedio, el 56,05% del total, seguidas de las ARD con el 37,58% y de las aguas residuales del beneficio del café con el 5,55% del total. Las ARD generan los mayores impactos de contaminación por Sólidos Suspendedos Totales (75%), Nitrógeno total (46%) y Fósforo total (92%). Además, del total de las ARD generadas en el país, sólo se eliminó el 43% de la carga orgánica, el 57% restante continuó generando contaminación tanto del recurso suelo como de los cuerpos de agua superficiales, subterráneos y marinos.

En una finca cafetera promedio la contaminación generada por las ARD sin tratar equivale al 64% de la contaminación generada por las aguas residuales del beneficio del café (ARnD), sin tratar.

¿Cuál es la normativa que aplica para las ARD?

El Ministerio de Desarrollo Económico promulgó la Resolución 1096 del año 2000 (MDE, 2000), mediante la cual se adoptó el **Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)** que fijó los criterios básicos y los requisitos mínimos que deben reunir los diferentes procesos involucrados en el diseño y la construcción de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de garantizar su seguridad, durabilidad, funcionalidad, calidad, eficiencia y sostenibilidad. Posteriormente, en la Resolución 0330 del año 2017, expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT, 2017), se ratificó la adopción del RAS y se derogó la Resolución 1096 del 2000, con el fin de ajustar el RAS a las necesidades del sector. En su capítulo 5 se presentan los requisitos técnicos para los sistemas de tratamiento de las ARD y sus subproductos.

Características de calidad que deben cumplir las Aguas Residuales Domésticas Tratadas (ARD-T) cuando son descargadas al suelo

En la Resolución 0699 del 2021 (MADS, 2021a) *“Por la cual se establecen los parámetros y los límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de ARD-T al suelo, y se dictan otras disposiciones”*, se definen a diferentes tipos de usuarios generadores de ARD y para los cuales aplican diferentes normas, así:

Usuarios de vivienda rural dispersa

Es toda persona natural o jurídica de derecho público o privado que hace uso de infraestructura denominada vivienda rural dispersa, considerada como la unidad habitacional localizada en el

suelo rural de manera aislada que se encuentra asociada a las formas de vida del campo y no hace parte de centros poblados rurales ni de parcelaciones destinadas a vivienda campestre. No requieren permiso de vertimientos, si las ARD son tratadas en un sistema séptico diseñado y construido siguiendo los lineamientos del RAS y se disponen en el suelo. Por lo anterior, no es necesario realizar el muestreo y la caracterización del agua residual doméstica, lo que implica un ahorro para el usuario de cerca de 2 millones COP/cada dos años (costos estimados para el año 2025).

Usuarios equiparables a usuarios de vivienda rural dispersa

Toda persona natural o jurídica de derecho público o privado que hace uso de infraestructura asociada a una actividad productiva o de uso de vivienda campestre, cuya generación de ARD son semejantes en cantidad y calidad (expresado en carga de DBO_5), a las producidas por los Usuarios de vivienda rural dispersa, con valores menores o iguales a $1,0 \text{ kg } DBO_5/d$ (equivalentes a fincas cafeteras en las cuales el número de personas permanentes y temporales, incluida la época de cosecha, sea inferior o igual a 20). Requieren obtener un permiso de vertimientos (Decreto 3930 del 2010, MAVDT, 2010a) ante la autoridad ambiental para realizar la descarga de las ARD-T al suelo e instalar un sistema séptico diseñado y construido siguiendo los lineamientos del RAS; realizar el muestreo y la caracterización del ARD-T (11 parámetros), y cumplir con los requerimientos de calidad, de estos parámetros, que se presentan en la Tabla 2, lo que implica un costo legal ambiental cercano a 2 millones COP/cada dos años (estimados para el año 2025), dado que deberán realizar el análisis de los parámetros con una frecuencia bienal.

TABLA 2. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de ARD-T para usuarios equiparables a usuarios de vivienda rural dispersa (MADS, 2021a).

PARÁMETROS	UNIDAD DE MEDIDA	VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN BÁSICA*		
		CATEGORÍA I Velocidad de infiltración entre 16 a 27 mm h ⁻¹	CATEGORÍA II Velocidad de infiltración entre 2,6 a 15 mm h ⁻¹ o entre 28 a 52 mm h ⁻¹	CATEGORÍA III Velocidad de infiltración: menor a 2,5 mm h ⁻¹ o mayor a 53 mm h ⁻¹
GENERALES				
Temperatura	°C	± 5°C que el rango de temperatura media anual multianual del lugar		
pH	Unidades	6,5 a 8,5	6,5 a 8,5	6,5 a 8,5
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg O ₂ L ⁻¹	200,0	200,0	200,0
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg L ⁻¹	100,0	70,0	50,0
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL L ⁻¹	3,5	2,5	1,5
Grasas y Aceites	mg L ⁻¹	20,0	20,0	20,0
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg L ⁻¹	0,5	0,5	0,5
Conductividad eléctrica	(µS cm ⁻¹)	1.000,0	700,0	700,0
COMPUESTOS DE FÓSFORO				
Fósforo Total (P)	mg L ⁻¹	5,0	5,0	2,0
COMPUESTOS DE NITRÓGENO				
Nitrógeno Total (N)	mg L ⁻¹	30,0	20,0	20,0
IONES				
Cloruros (Cl ⁻)	mg L ⁻¹	250,0	250,0	140,0

* La velocidad de infiltración básica, obedece a la velocidad constante que alcanza el agua que se infiltra en el suelo durante la prueba de infiltración. Esta prueba debe realizarse durante tres horas continuas como mínimo, y cada 2.500 m² o fracción de área de vertimiento proyectada.

Usuarios diferentes a usuarios equiparables y a usuarios de vivienda rural dispersa

Toda persona natural o jurídica de derecho público o privado que hace uso de infraestructura locativa de retretes y servicios sanitarios, sistemas de aseo personal (duchas y lavamanos), cocinas y cocinetas, pocetas de lavado de elementos de aseo, realiza lavado de paredes y pisos de esta infraestructura locativa, y lavado de ropa (no se incluyen servicios de lavandería industrial), cuya generación de aguas residuales domésticas son

diferentes en cantidad y calidad a las producidas por los usuarios de vivienda rural dispersa y de los equiparables a vivienda rural dispersa. Aplica para los caficultores que tengan área productiva y en la cual el número de personas permanentes y temporales sea superior a 20, en el día. Requieren obtener un permiso de vertimientos para realizar la descarga de las ARD-T al suelo e instalar un sistema séptico diseñado y construido siguiendo los lineamientos del RAS; realizar el muestreo y la caracterización del ARD-T (26 parámetros), y cumplir con los requerimientos de calidad que se

presentan en la Tabla 3, para estos parámetros, lo que implica un costo legal ambiental cercano a los 3 millones COP/año (estimados para el año 2025), dado que deberán realizar el análisis de los parámetros con una frecuencia anual.

Adicionalmente, para todos los usuarios que realicen descargas de las ARD-T al suelo, aplica el Decreto 50 del 2018 (MADS, 2018a) que establece que, cuando se realice la descarga del vertimiento deben presentarse los resultados de pruebas de infiltración, sistema de disposición de los vertimientos, área de disposición de los vertimientos y plan de cierre y abandono del área de disposición del vertimiento.

Características de calidad que deben cumplir las ARD-T cuando son descargadas a fuentes hídricas superficiales

Si en las viviendas rurales las ARD-T se disponen directamente a cuerpos de agua superficiales, se requiere la obtención de un permiso de vertimiento, además se requiere, del cumplimiento de la normativa relacionada con este tipo de vertido, para el cual aplica la Resolución 631 del 2015 (MADS, 2015b), que establece los parámetros y los valores de calidad que deben cumplirse en el vertido:

pH (entre 6,0 a 9,0 unidades)

DQO (hasta 200 mg L⁻¹)

Sólidos Suspendidos Totales (hasta 100 mg L⁻¹)

Sólidos Sedimentables (hasta 5 mL L⁻¹)

Grasas y aceites (hasta 20 mg L⁻¹)

Además, el generador del vertimiento debe pagar una tasa retributiva, de acuerdo a lo establecido en el Decreto 2667 del 2012 (MADS, 2012) por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales. Para el cálculo de esta tasa se tiene en cuenta el volumen del vertimiento dispuesto en los cuerpos de agua superficiales y su contenido de carga orgánica, aún presente, en términos de DBO₅ y SST. Por lo anterior, el costo legal ambiental, en el mejor de los casos, por la disposición de las ARD-T a cuerpos de agua superficiales es de \$ 1 millón COP/año (costos estimados para el año 2025).

Valor base de la carga orgánica para el cálculo de la tasa retributiva

Para el año 2025 el cobro por cada kilogramo de DBO₅ presente en las aguas residuales tratadas que sean vertidas a cuerpos de agua superficiales es de \$ 215,84 COP y de \$ 92,29 COP por cada kilogramo de SST.

Características de calidad que deben cumplir las ARD-T cuando son reusadas

Si en las viviendas rurales, las ARD-T se reúsan totalmente, en los términos establecidos en la Resolución 1256 del 2021 (MADS, 2021b) no es necesario obtener un permiso de vertimientos. No obstante, en el artículo 4 se expresa que para el reúso “se requerirá concesión de aguas para adquirir el derecho al uso de las aguas residuales como bien de uso público”.

TABLA 3. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de ARD-T para usuarios diferentes a usuarios equiparables y a usuarios de vivienda rural dispersa (MADS, 2021a).**

PARÁMETROS	UNIDAD DE MEDIDA	VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN BÁSICA		
		CATEGORÍA I Velocidad de infiltración entre 16 a 27 mm h ⁻¹	CATEGORÍA II Velocidad de infiltración entre 2,6 a 15 mm h ⁻¹ entre 28 a 52 mm h ⁻¹	CATEGORÍA III Velocidad de infiltración: menor a 2,5 mm h ⁻¹ mayor a 53 mm h ⁻¹
GENERALES				
Temperatura	°C	± 5°C que el rango de temperatura media anual multianual del lugar		
pH	Unidades	6,5 a 8,5	6,5 a 8,5	6,5 a 8,5
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg O ₂ L ⁻¹	200,0	200,0	200,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg O ₂ L ⁻¹	90,0	90,0	90,0
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg L ⁻¹	100,0	70,0	50,0
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL L ⁻¹	3,5	2,5	1,5
Grasas y aceites	mg L ⁻¹	20,0	20,0	20,0
Fenoles	mg L ⁻¹	0,10	0,01	0,01
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg L ⁻¹	0,5	0,5	0,5
Conductividad eléctrica	(µS cm ⁻¹)	1.000,0	700,0	700,0
COMPUESTOS DE FÓSFORO				
Fósforo Total (P)	mg L ⁻¹	5,0	5,0	2,0
COMPUESTOS DE NITRÓGENO				
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg L ⁻¹	15,0	10,0	10,0
Nitrógeno total (N)	mg L ⁻¹	30,0	20,0	20,0
PARÁMETROS DE SALINIDAD Y SODICIDAD				
Relación de Absorción de Sodio (RAS)	Adimensional	6,0	6,0	3,0
Cloruros (Cl ⁻)	mg L ⁻¹	250,0	250,0	140,0
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg L ⁻¹	250,0	250,0	250,0
METALES Y METALOIDES				
Aluminio (Al)	mg L ⁻¹	5,0	3,0	1,0
Cadmio (Cd)	mg L ⁻¹	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Zinc (Zn)	mg L ⁻¹	3,0	2,0	2,0
Cobre (Cu)	mg L ⁻¹	2,0	1,5	1,0
Cromo (Cr)	mg L ⁻¹	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Manganeso (Mn)	mg L ⁻¹	2,0	1,0	0,2
Plata (Ag)	mg L ⁻¹	0,05	0,05	0,05
Plomo (Pb)	mg L ⁻¹	3,0	2,0	0,1
HIDROCARBUROS				
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg L ⁻¹	2,5	2,5	1,0
PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS				
Coliformes totales	NMP/100 mL	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

** La biomasa resultante del área de vertimiento al suelo deberá ser estabilizada o sanitizada de tal forma que garantice el mínimo riesgo para el ambiente y la salud pública previo a su gestión por parte del usuario.

Usuarios de vivienda rural dispersa y Corporaciones Autónomas Regionales (CAR)

Las CARs, como Corporaciones Autónomas, establecen los requisitos mínimos para acogerse al registro de usuarios del recurso hídrico de Vivienda Rural Dispersa, siendo necesario acudir a las mismas para conocer cuándo un usuario es categorizado como tal y qué requisitos debe cumplir con el fin de estar exento de un permiso de vertimiento de las ARD-T al suelo y, por lo tanto, eliminar los costos ambientales asociados al muestreo y caracterización de los vertidos.

Por ejemplo, la Corporación Autónoma Regional de Caldas, a través de la Resolución 377 del 2023 (CorpoCaldas, 2023), establece como requerimientos para ser categorizado como usuario de vivienda rural dispersa los siguientes:

- 1 Que el agua sea destinada al uso humano doméstico del predio y la disposición de las ARD-T se realice al suelo (no aplica para su disposición a cuerpos de agua superficiales o para su reúso), según las especificaciones del RAS, por lo que no se requiere el trámite de permisos de concesión de agua ni de vertimiento.
- 2 Usar el agua como bebida directa y en la preparación de alimentos para consumo inmediato.
- 3 Usar el agua en la satisfacción de necesidades domésticas, individuales o colectivas, tales como higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios.
- 4 Desarrollo de actividades productivas de subsistencia en el predio, bajo las siguientes condiciones y topes de producción por actividad:
 - Producción porcícola (hasta diez animales por ciclo).
 - Producción ganadera (hasta siete animales por ciclo o en el sitio).
 - Producción cafetera (hasta 500 @ año⁻¹ de cps).
 - Producción avícola (hasta 130 animales por ciclo).
 - Producción piscícola (hasta una tonelada al año).
 - Granja integral (dos o más tipos de producción que no superen la extensión permitida por la Unidad Agrícola Familiar).

Los documentos requeridos para solicitar la categorización como usuario de vivienda rural dispersa son:

- I. Formato de solicitud de inscripción como usuario de vivienda rural dispersa.
- II. Fotocopia de la cédula de ciudadanía.
- III. Información de la matrícula inmobiliaria o ficha catastral.
- IV. Diseño de la solución individual de saneamiento básico (Según RAS-2017).
- V. Diseño de la unidad de disposición final del ARD-T al suelo (campo de infiltración).
- VI. Hoja de resultados de la prueba de infiltración al suelo.

Para el reúso agrícola de las ARD-T se requiere de un plan de monitoreo y seguimiento de la calidad y cantidad del agua residual empleada (37 parámetros), en el cual se identifique el punto de control y el punto de entrega. La Autoridad Ambiental definirá la frecuencia del monitoreo

de la calidad del agua en el acto administrativo mediante el cual se pronuncie. El valor del muestreo y caracterización de los parámetros (cuyos valores de calidad se presentan en la Tabla 4) es de aproximadamente 3 millones COP (costos estimados para el año 2025).

TABLA 4. Criterios de calidad de aguas residuales para uso agrícola. Fuente: Decreto Único 1076 del 2015 (MADS, 2015a); Resolución 1256 del 2021 (MADS, 2021b).

VARIABLE	UNIDADES	VALOR LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
FÍSICOS		
pH	Unidades	4,5 - 9,0
Conductividad	µS/cm	1.500
MICROBIOLÓGICOS		
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	<1 x 10 ⁵
Enterococos fecales	NMP/100 mL	<1 x 10 ²
QUÍMICOS		
Fenoles totales	mg L ⁻¹	0,20
Hidrocarburos totales	mg L ⁻¹	1,0
IONES		
Cianuro libre	mg L ⁻¹	0,20
Cloruros	mg L ⁻¹	300,0
Fluoruros	mg L ⁻¹	1,0
Sulfatos	mg L ⁻¹	500,0
METALES		
Aluminio	mg L ⁻¹	5,0
Berilio	mg L ⁻¹	0,10
Cadmio	mg L ⁻¹	0,01
Zinc	mg L ⁻¹	2,0
Cobalto	mg L ⁻¹	0,05
Cobre	mg L ⁻¹	0,20
Cromo	mg L ⁻¹	0,10
Hierro	mg L ⁻¹	5,0

Litio	mg L ⁻¹	2,5
Manganeso	mg L ⁻¹	0,2
Mercurio	mg L ⁻¹	0,001
Molibdeno	mg L ⁻¹	0,01
Níquel	mg L ⁻¹	0,20
Plomo	mg L ⁻¹	5,0
Sodio	mg L ⁻¹	200,0
Vanadio	mg L ⁻¹	0,10
METALOIDES		
Antimonio	mg L ⁻¹	0,10
Arsénico	mg L ⁻¹	0,10
Boro	mg L ⁻¹	Entre 0,30 y 4,0
NO METALES		
Selenio	mg L ⁻¹	0,02
OTROS PARÁMETROS		
Cloro total residual (con mínimo 30 minutos de contacto)	mg L ⁻¹	< 1,0
Nitratos (expresado como N)	mg L ⁻¹	11,0
Relación de absorción de sodio (RAS)	Adimensional	Análisis y reporte
Porcentaje de sodio posible (PSP)	%	Análisis y reporte
Salinidad efectiva y potencial	meq L ⁻¹	Análisis y reporte
Carbonato de sodio residual	meq L ⁻¹	Análisis y reporte
Radionucleidos	Bq kg ⁻¹	Análisis y reporte

En la Resolución 1256 del 2021 se define **la recirculación**, como: “*el uso de las aguas residuales en operaciones y procesos unitarios dentro de la misma actividad económica que las genera y por parte del mismo usuario generador, sin que exista contacto con el suelo al momento de su uso, salvo cuando se trate de suelo de soporte de infraestructura*” y **el reúso**, como “*el uso de las aguas residuales por parte de un usuario receptor, para un uso distinto al que las generó*”. En el artículo 3, de la Resolución, se establece que: “*siempre que sea técnica y económicamente viable, todo usuario del recurso hídrico podrá hacer la recirculación de sus aguas residuales, sin que se requiera autorización ambiental*” y en el artículo 4 se expresa que para el reúso “*se requerirá concesión de aguas para adquirir el derecho al uso de las aguas residuales como bien de uso público*”.

¿Qué sucede si no se cumple con los requerimientos legales en el manejo, tratamiento y disposición de las ARD?

El incumplimiento de la normativa ambiental en Colombia genera unos procedimientos sancionatorios, los cuales tienen una función preventiva, correctiva y compensatoria, para garantizar la efectividad de los principios y fines previstos en la Constitución y los tratados internacionales. Mediante las medidas preventivas se busca prevenir, impedir o evitar la continuación de la ocurrencia de un hecho, la realización de una actividad o la existencia de una situación que atente contra el medio ambiente, los recursos naturales, el paisaje o la salud humana, establecidas en la Ley 1333 del 2009 expedida por el Congreso de la República.

El MAVDT expidió en el año 2010 la Resolución 2086 (MAVDT, 2010c) mediante la cual se

adopta la metodología para la tasación de multas ambientales, cuyo monto económico considera aspectos como: el beneficio ilícito, el factor de temporalidad, el grado de afectación ambiental y la evaluación del riesgo, circunstancias agravantes y atenuantes, costos asociados y capacidad socioeconómica del infractor.

¿Cómo pueden disminuirse los costos de manejo y tratamiento de las ARD?

Mediante la aplicación de prácticas para el uso eficiente y ahorro de agua en el hogar puede disminuirse el consumo de agua y, por lo tanto, el volumen de agua residual generado. Lo anterior genera dos beneficios importantes, en primer lugar, el costo del manejo y tratamiento de las ARD es menor, dado que se requieren plantas de tratamiento más pequeñas y, en segundo lugar, al utilizar menos agua en el abastecimiento en el hogar se contribuye a aumentar la oferta del agua superficial en el ecosistema favoreciendo su sostenibilidad.

En Colombia se promulgó la Ley 373 de 1997, por la cual se estableció el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA) (Congreso, 1997). El PUEAA lo debe formular y presentar todo usuario que solicita o es titular de una concesión de agua (Decreto 1090 de 2018) (MADS, 2018b) y elaborar la guía para el uso eficiente y ahorro del agua con base en la Resolución 1257 del 2018 (MADS, 2018c).

La implementación de un PUEAA en la vivienda, como estrategia de adaptación a la falta de disponibilidad de agua, incluye prácticas y actividades, las cuales cuando se utilizan de manera rutinaria, pueden reducir entre un 10% y un 40% el volumen de agua diario en el consumo doméstico, dependiendo del patrón de uso (Rodríguez et al., 2018).

Tips para establecer un Programa de Uso Eficiente y Ahorro de Agua en las viviendas cafeteras

- Utilizar el volumen mínimo de agua necesario para satisfacer las diferentes necesidades.
- Cerrar el grifo mientras se realiza el cepillado de los dientes, el afeitado o el desmaquillado.
- Enjuagar la máquina de afeitarse en un recipiente con agua.
- Tomar duchas cortas y cerrar la llave mientras se realiza el enjabonamiento. En situaciones de escasez de agua, el baño de esponja o paño mojado es la opción adecuada.
- Preferiblemente, bañar a los niños, pues ellos en su inocencia pueden desperdiciar el agua.
- No utilizar el sanitario para eliminar papeles u otros elementos sólidos, dado que ello requiere de una descarga de agua.
- Utilizar aparatos que ahorran agua, como sanitarios de baja descarga (menores a 6 L/descarga) y reductores-aireadores de agua en las duchas y grifos.
- Asegurar que no se presenten fugas de agua en las tuberías de conducción y en los grifos.
- Crear conciencia en todos los miembros de la familia acerca del ahorro de agua.
- Cerrar la llave mientras se enjabonan los platos.
- No lavar el carro con manguera, utilizar un balde o una hidro-lavadora.
- Remojar previamente la ropa más sucia. Esto permite acortar el ciclo de la lavadora.
- Lavar la pieza de ropa directamente en la suciedad o la mancha.
- Evitar lavar los pisos con tanta frecuencia. Es preferible trapearlos o utilizar pisos impermeables de fácil limpieza.
- Mantener cubiertas las estructuras de almacenamiento de agua, dado que, en condiciones de climas cálidos, la evaporación puede consumir buena parte del agua almacenada.
- Realizar un uso múltiple del agua: utilizar el mismo volumen de agua para obtener beneficios en dos o más actividades.
- Evitar la contaminación en la utilización del agua y entregar el agua residual con igual o mejor calidad que el agua recibida.

PUEAA y características de las ARD

Una forma de evidenciar el ahorro de agua en la vivienda es a través de la concentración de carga orgánica en el ARD, a menor cantidad de agua usada en las actividades domésticas mayor será la concentración de carga orgánica en el agua residual. De acuerdo con el Ministerio del Ambiente (MA, 2002) un ARD típica tiene una concentración de DQO de 500 mg L^{-1} . En la Estación Experimental Naranjal de Cenicafé el valor promedio de la DQO en las ARD es de 1.620 mg L^{-1} , lo que evidencia la implementación del PUEAA, que ha permitido bajar los consumos de agua por persona-día, respecto a los típicos, hasta una tercera parte.

¿Cuál es el sistema recomendado para el manejo, tratamiento y cero descargas de las ARD de la vivienda de la finca cafetera?

El mejor sistema es aquel que integra un sistema séptico con un filtro verde con cero descargas, dado que permite el manejo y tratamiento de las ARD, además que evita el vertido al suelo o a cuerpos de agua superficiales con lo cual no sólo se protege el medio ambiente y la salud de los pobladores de la zona cafetera, sino que también se obvian los costos legales asociados al manejo de los vertidos.

Sistema séptico

Es uno de los sistemas más eficientes y más utilizados para el tratamiento de las ARD. Consta de varios tanques construidos en mampostería de ladrillo y cemento, o en polietileno dispuesto en serie, los cuales deben ser instalados en un sitio que permita el flujo por gravedad de las ARD. A través de este sistema se retiran contaminantes como espumas, detergentes, jabones, grasas, sólidos sedimentables, materia orgánica, fósforo y nitrógeno, entre otros.

Para una mayor eficiencia técnica y económica del sistema séptico, se recomienda que se adopte un PUEAA en la vivienda, implementando comportamientos y dispositivos que permitan realizar un ahorro de agua, con lo cual, al tener un menor consumo de agua, el volumen de agua residual disminuye y, por consiguiente, el tamaño de las diferentes unidades que conforman el sistema séptico.

Filtro verde con cero descargas

Es un sistema de tratamiento natural del agua que consiste en la aplicación controlada del ARD pre-tratada sobre un cultivo herbáceo que se encuentra impermeabilizado, para evitar la infiltración del agua en el suelo, y el cual tiene una cubierta tipo invernadero para facilitar la evaporación del agua y así evitar los vertidos. En este tipo de sistema, las características físico-químicas y microbiológicas del suelo, aunado a los microorganismos presentes en el agua residual pre-tratada, proveen el tratamiento apropiado a la vez que el material vegetal sembrado realiza la captación de nutrimentos aún presentes en el agua residual. La transpiración estomática de las plantas y las temperaturas que se alcanzan al interior del invernadero incrementan las tasas evapotranspirativas del agua residual.

Componentes del sistema séptico

El sistema séptico está constituido, por cuatro unidades a saber: **1.** Trampa de grasas, **2.** Tanque séptico, **3.** Lecho de secado de lodos, **4.** Filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA), los cuales se presentan en la Figura 2.

Para el caso de los usuarios de vivienda rural dispersa, debe tenerse un campo de infiltración, el cual podría ser reemplazado por un filtro verde de cero descargas si no se desea generar vertimientos.

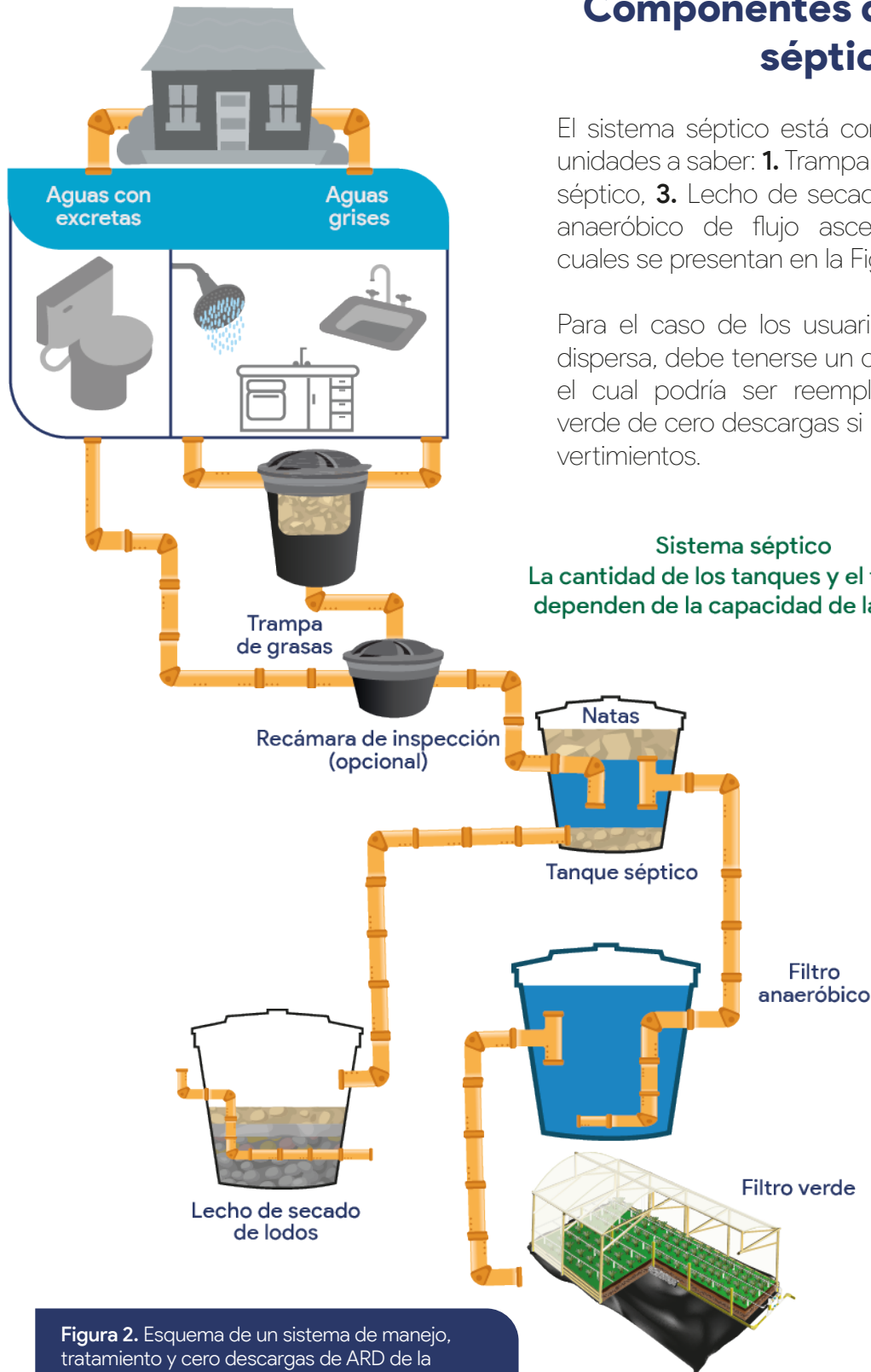


Figura 2. Esquema de un sistema de manejo, tratamiento y cero descargas de ARD de la vivienda de la finca cafetera.

Trampa de grasas

Es la primera unidad del sistema séptico, permite realizar un pretratamiento a las ARD. Tiene como propósito separar físicamente la grasa presente en las aguas residuales provenientes de la cocina, la ducha y el lavado de ropa, con el propósito de evitar que las grasas y residuos de jabones y detergentes disminuyan la eficiencia del tratamiento biológico realizado a las ARD en las etapas siguientes del proceso depurativo.

La trampa de grasas se construye en mampostería de ladrillo o con tanques pequeños de material plástico resistente; la grasa se localiza en la superficie y es retenida mientras el agua desengrasada sale por una descarga inferior. Debe localizarse lo más cerca posible de la vivienda y aguas arriba del tanque séptico.

A la trampa de grasas no deben llegar, por ningún motivo, aguas provenientes de los aparatos sanitarios.

Parámetros de diseño: se realiza teniendo en cuenta las características de las ARD y su caudal. Su profundidad mínima útil no puede ser inferior a 0,35 m (Resolución 0330 del 2017, MVCT, 2017).

Construcción: los aspectos a tener en cuenta en la instalación son (Título J, RAS - 2010, MAVDT, 2010b):

- La entrada (afluente) a la trampa de grasas debe realizarse por medio de un codo interno de 90° y un diámetro mínimo de 3". La salida (efluente) debe realizarse por medio de una tee interna con un diámetro mínimo de 3" (Figura 3).

- La parte inferior del codo de entrada deberá prolongarse hasta 0,15 m por debajo del nivel del líquido.
- La diferencia de nivel entre la tubería de ingreso y la tubería de salida no debe ser menor a 0,05 m.
- La parte inferior de la tubería de salida deberá estar entre 0,075 m y 0,150 m del fondo del tanque.
- La trampa de grasas debe tener forma tronco-cónica o piramidal invertida. El área horizontal de la base debe ser de por lo menos 0,25 × 0,25 m por lado o de 0,25 m de diámetro.

Se recomienda instalar la trampa de grasas en un tanque en polietileno de 250 L de forma tronco-cónica, el cual tiene una altura útil aproximada de 0,75 m y un diámetro de 0,58 m, dimensiones que permiten cumplir con la norma colombiana.

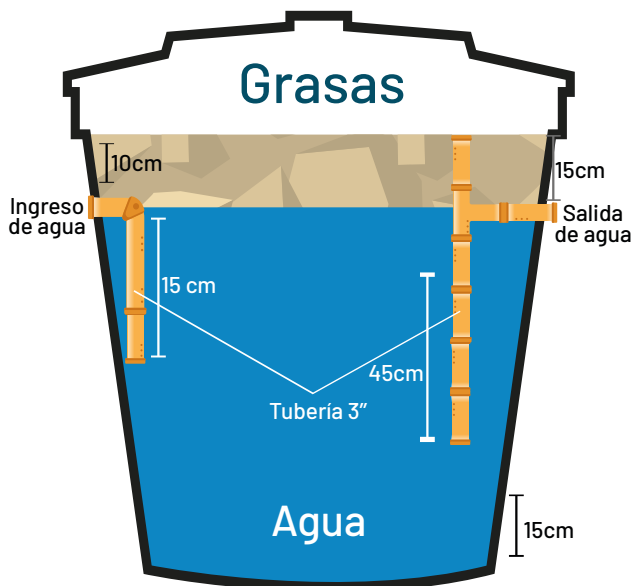


Figura 3. Esquema de una trampa de grasas construida en un tanque de polietileno de 250 L, con una altura útil de 0,75 m. **Fuente:** Adaptado de Rodríguez et al., 2018.

Materiales y herramientas necesarios para la instalación de la trampa de grasas

- Un tanque de polietileno o construido en mampostería en ladrillo y cemento, con tapa y con el volumen apropiado, de acuerdo a los grifos presentes en la vivienda y con una altura útil mínima de 0,35 m.
- Un codo interno de PVC-S de 3" para la entrada.
- Una tee interna de PVC-S de 3" para la salida.
- Un trozo de tubo de PVC-S de 3" y 0,15 m de longitud útil, para la entrada.
- Un trozo de tubo de PVC-S de 3" y 0,45 m de longitud útil, para la salida.
- Adaptadores macho y hembra, y arandelas en neolite con diámetro interno de 3" para la instalación de la tubería de ingreso y salida, de forma que tenga sello hidráulico. Como alternativa podría instalarse la tubería, de forma que ingrese y salga ajustada en los agujeros respectivos, y sellar sus bordes externos con silicona negra.
- Si la trampa de grasas se instala utilizando un tanque comercial en polietileno, es posible que no tenga los agujeros para el ingreso y la salida del agua residual o que sus perforaciones sean inferiores a 3", por lo tanto, para realizar o aumentar las perforaciones, se requiere:
- Taladro eléctrico o inalámbrico, Broca sierra de 3", soldadura y limpiador de PVC.

Materiales complementarios para la instalación de la trampa de grasas

Si la trampa de grasa se instala enterrada en el terreno, se requiere:

Realizar una excavación en un sitio de fácil acceso, teniendo en cuenta la posición de los orificios de entrada (más alto) y salida (más bajo del tanque). Sobre el fondo de la misma, debe vaciarse una capa de arena libre de piedras angulares, de aproximadamente 5,0 cm, nivelada y compactada sobre la cual se apoyará el tanque.

Para equilibrar presiones en las paredes del tanque plástico, debe realizarse su llenado con agua hasta el nivel inferior de la tubería de salida, y luego, entre el espacio comprendido por las paredes del tanque y las paredes de la excavación, se dispondrán sucesivamente capas de arena compactadas una a una con pisón.

Reparación de los tanques de polietileno

Cuando los tanques de polietileno que forman parte del sistema séptico, se disponen semi-enterrados o sobre la superficie del suelo, son vulnerables a daños por cortadura (guadañas, machetes) o por impacto (rocas), generándose fisuras por las cuales se filtra el agua residual. En estos casos, la aplicación de una masilla époxica ultrafuerte permite sellar las grietas e incrementar la vida útil de los tanques.

Tanque séptico

Es el componente principal de un sistema séptico para el tratamiento de las ARD, allí se conducen las aguas provenientes de las descargas de los aparatos sanitarios y las aguas grises (provenientes del lavaplatos, la ducha, el lavamanos, el lavado de ropa) después de que han pasado por la trampa de grasas. Sus principales funciones son: 1. Separar los sólidos presentes en el ARD, 2. Permitir una degradación inicial de la materia orgánica presente en el ARD, 3. Almacenar los sólidos presentes en el ARD para su posterior eliminación por métodos físicos y biológicos.

El efluente del tanque séptico, por hacer parte de un sistema de tratamiento, no debe ser dispuesto directamente en el suelo y mucho menos en un cuerpo de agua. Por eso debe realizarse un tratamiento complementario para mejorar su calidad, de acuerdo a las disposiciones de la autoridad sanitaria y ambiental, con el propósito de disminuir los riesgos de contaminación que afecten la salud pública (Título J, RAS – 2010, MAVDT, 2010b).

El tanque séptico se recomienda para el manejo de las ARD de máximo 50 personas. Su disposición en el terreno y su forma geométrica depende de la disponibilidad de área y de las características del suelo (pendiente y composición). Este tanque puede estar completamente enterrado,

semienterrado o instalado sobre la superficie del suelo, según su geometría, puede ser prismático-rectangular, cilíndrico o tronco-cónico. También puede ser construido en el sitio con mampostería de ladrillo, o puede ser adquirido en el comercio, fabricado en diferentes materiales plásticos como polietileno (PE), polipropileno (PP) o poliéster reforzado con fibra de vidrio. Tiene bajo costo de construcción, operación y mantenimiento.

El tanque séptico debe ubicarse aguas debajo de la trampa de grasas, con una cota de desnivel mínima de 75 cm y de las unidades sanitarias para facilitar el manejo de las aguas residuales por gravedad, y asegurar que no le ingrese agua de la lluvia. Deben conservarse las siguientes distancias mínimas en la localización del tanque séptico:

- 1,50 m distante de construcciones, sumideros y caminos peatonales.
- 3,00 m distante de árboles y cualquier punto de red pública de abastecimiento de agua.
- 25,00 m distante de pozos subterráneos y cuerpos de agua de cualquier naturaleza.
- 8,00 m distante de cortes o terraplenes.

Parámetros de diseño: debe considerarse un tiempo suficiente de permanencia de las aguas residuales a tratar, para que ocurra la separación de los sólidos y la estabilización de los líquidos, así como asegurar que el tanque tenga el volumen suficiente para el almacenamiento de lodos, natas y agua residual, dentro del tiempo previsto entre las operaciones de limpieza. La profundidad útil mínima del tanque séptico, dependiendo del volumen, se presenta en la Tabla 5, establecidos en la norma colombiana (MVCT, 2017). Para tanques cilíndricos el diámetro interno y el largo interno mínimo debe ser de 1,10 m y 0,80 m, respectivamente (Título E, RAS – 2000, MDE,

2000). Por lo anterior, se recomienda instalar el pozo séptico en un tanque en polietileno, con la capacidad requerida para el número de contribuyentes de la vivienda y siendo el tamaño mínimo un tanque de 2,0 m³ de forma tronco-cónica, el cual tiene una altura aproximada de 1,57 m y un diámetro interno de 1,16 m, dimensiones que permiten cumplir con la norma colombiana (MVCT, 2017).

TABLA 5. Valores de profundidad útil del tanque séptico en función del volumen. Fuente: MVCT, 2017.

VOLUMEN ÚTIL (m ³)	PROFUNDIDAD ÚTIL (m)	
	Mínima	Máxima
Hasta 6	1,2	2,2
De 6 a 10	1,5	2,5
Más de 10	1,8	2,8

A través del RAS se presentan dos metodologías para la determinación del volumen útil del tanque séptico. En la metodología 1 se consideran variables como: número de contribuyentes (personas tanto permanentes como temporales en la vivienda), contribución de aguas residuales por habitante, contribución de lodo fresco, tasa de acumulación de lodos digeridos y tiempo de retención; mientras que en la metodología 2, se analiza el volumen requerido para la sedimentación, el volumen para el almacenamiento de lodos, el volumen para el almacenamiento de natas y espumas no sumergidas, el volumen para ventilación y el volumen útil (Rodríguez et al., 2022b).

Construcción: para la instalación del tanque séptico se hace una excavación en un sitio de fácil acceso, si el tanque se va a enterrar parcial o completamente, teniendo en cuenta la posición de los orificios de entrada (más alto) y salida

(más bajo del tanque). El diámetro de la tubería de entrada debe ser mínimo de 4", a través de un codo y el diámetro de la tubería de salida de por lo menos 3", a través de una "T". El extremo final del tubo de entrada debe estar sumergido, por lo menos, 0,35 m. El tubo de salida debe estar sumergido por lo menos 0,45 m. El tamaño, la forma y la disposición de los tubos de entrada y salida del tanque séptico están diseñados para que las aguas negras permanezcan en el tanque entre 12 y 24 horas, con el fin de que se efectúen procesos bioquímicos y físicos que permitan el apropiado tratamiento de las aguas residuales (Figura 4).

Al tanque séptico llegan las aguas provenientes de la trampa de grasa y de las unidades sanitarias, las cuales se unen antes de la entrada al tanque mediante una "Y" sanitaria de 4", por lo que es necesario colocar, invertida, una reducción de 4" a 3" en el extremo que recibe las aguas provenientes de la trampa de grasas.

Anualmente se recomienda retirar una parte de los lodos acumulados en el tanque (debe dejarse por lo menos un 20% de los mismos para que el sistema de tratamiento no pierda eficiencia). Antes de cualquier operación en el interior del tanque, la cubierta debe mantenerse abierta (durante un tiempo mayor a 15 minutos) para facilitar la remoción de gases tóxicos o explosivos. Para retirar los lodos se aconseja utilizar el dispositivo de sifón invertido (Rodríguez et al., 2022b). Los lodos removidos deben disponerse en lechos de secado diseñados y contruidos para este fin, una vez secos pueden disponerse en los campos agrícolas que no estén dedicados al cultivo de hortalizas, frutas o legumbres que se consumen crudas.

Materiales y herramientas necesarios para la instalación del tanque séptico

- Un tanque de polietileno o construido en mampostería en ladrillo y cemento con el volumen apropiado, de acuerdo con el número de personas permanentes y temporales de la vivienda, con su respectiva tapa y una altura mínima de acuerdo a lo establecido en la Tabla 5.
- Un codo interno de PVC-S de 4" para la entrada.
- Una tee interna de PVC-S de 3" para la salida.
- Un trozo de tubo interno de PVC-S de 4" y 0,35 m de longitud útil, para la entrada.
- Un trozo de tubo interno de PVC-S de 3" y 0,45 m de longitud útil, para la salida.
- Adaptadores macho y hembra de PVC-P de 4" y 3" y cuatro arandelas en neolite, con los diámetros apropiados para la instalación de la tubería de ingreso y salida al tanque (dos y dos), de forma que se tenga un buen sello hidráulico. Como alternativa (para eliminar los costos de los adaptadores) podría instalarse la tubería, de forma que ingrese y salga ajustada en los agujeros respectivos, y sellar los bordes externos con silicona negra, para asegurar el sello hidráulico.

Si el tanque séptico se instala utilizando un tanque comercial en polietileno, se recomienda utilizar las mismas herramientas descritas en la trampa de grasas.

La importancia del sello hidráulico

La implementación de un sistema de cero descargas tiene como objetivo evitar el vertido de aguas residuales al suelo o a los cuerpos de agua superficiales, por lo que es fundamental que las conexiones entre las diferentes unidades de manejo y tratamiento no presenten algún tipo de fuga de agua, siendo necesario realizar las pruebas respectivas para asegurar el buen sello hidráulico.

Se recomienda utilizar los materiales y las herramientas apropiadas para ajustar los diferentes adaptadores, tales como empaques de caucho (arandelas de neolite), llaves de cadena, rectificación de la rosca de los adaptadores macho y hembra, aplicación de silicona negra en los bordes de los orificios de entrada y salida de las tuberías y la utilización de masilla époxica ultrafuerte para reparar fugas en el cuerpo de los tanques.

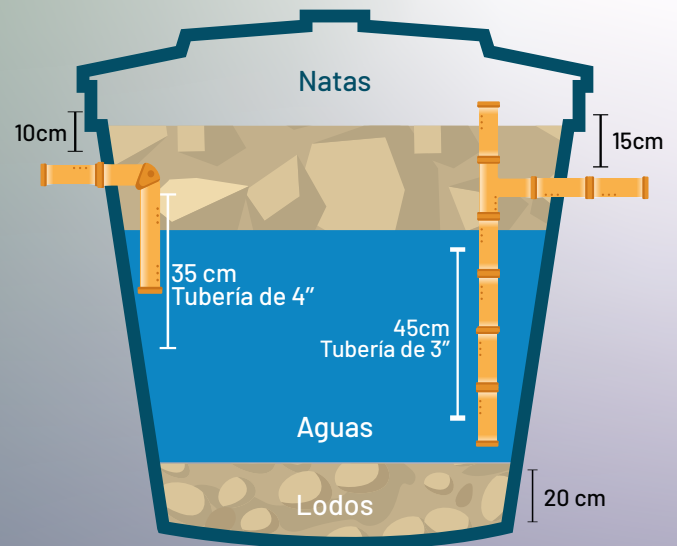


Figura 4. Esquema de un tanque séptico construido en polietileno. Fuente: Rodríguez et al., 2022b.

Materiales complementarios para la instalación del tanque séptico

Si el tanque séptico se instala enterrado o semienterrado en el terreno, se requiere realizar el mismo procedimiento descrito para la trampa de grasas.

Eliminación de lodos en el tanque séptico

La eliminación de los lodos sedimentados en el tanque séptico es una de las labores de mantenimiento más importantes para el buen funcionamiento del sistema séptico. Para facilitar esta práctica, Cenicafé ha evaluado, con muy buenos resultados, la eliminación de lodos con el principio del sifón invertido, el cual se construye con tubería de PVC-P de 1 ½" y que se introduce en el tanque séptico hasta 20 cm antes del fondo, con el propósito de dejar un volumen de lodos suficiente para mantener la eficiencia del proceso de depuración.

El dispositivo consta de dos partes: una parte fija que se instala en el tanque séptico (Figura 5) y una parte removible (Figura 6) que se acopla a la parte fija del tanque séptico sólo en el momento del mantenimiento.

Materiales necesarios para la construcción de la parte removible del dispositivo de sifón invertido

- Cuatro trozos de 10 cm de longitud, de tubería de PVC-P de 1 ½".
- Una tee de PVC-P de 1 ½".
- Dos llaves de paso lisas de PVC-P de 1 ½".
- Dos codos de PVC-P de 1 ½".
- Un trozo de tubería de PVC-P de 1 ½" de la altura externa del tanque séptico.
- Dos adaptadores hembra de PVC-P de 1 ½".
- Dos adaptadores macho de polietileno de 1 ½".
- Un trozo de manguera de polietileno de 1 ½" que llegue desde el tanque séptico hasta el lecho de secado de lodos.
- Un tapón liso de PVC-P de 1 ½".
- Un rollo de cinta de teflón.

Materiales necesarios para la construcción de la parte fija del dispositivo de sifón invertido

- Un adaptador macho de PVC-P 1 ½".
- Un adaptador hembra de PVC-P de 1 ½".
- Dos empaques en neolite con perforación interna de 1 ½".
- Un trozo de 10 cm de longitud de tubería de PVC-P de 1 ½".
- Un codo de PVC-P de 1 ½".
- Un trozo de tubería de PVC-P de 1 ½" que llegue hasta 20 cm antes del fondo del tanque.



A



B

Figura 5. Aspecto de la parte fija del dispositivo de sifón invertido para la eliminación de lodos del tanque séptico. **A.** Instalación de la tubería interna hasta una altura de 20 cm del fondo del tanque. **B.** Instalación de un tapón liso removible para acoplar la parte removible del dispositivo. **Fuente:** Adaptado de Rodríguez et al., 2018.



A



B

Figura 6. Aspecto de la parte removible del dispositivo de sifón invertido para la eliminación de lodos del tanque séptico. **A.** Acoplamiento, eliminando el tapón liso removible. **B.** Aspecto final de la parte removible acoplada al tanque séptico.

Instalación de la parte fija del dispositivo de sifón invertido:

en la parte interna más alta del tanque séptico se realiza una perforación de 1 ½", allí se instala una arandela de neolite con perforación interna de 1 ½" (la parte lisa se coloca en contacto con la pared interna del tanque) y un adaptador hembra de PVC-P de 1 ½"; por la parte externa se instala otra arandela de neolite de las mismas características anteriores, con la parte lisa en contacto con la pared externa, con un adaptador macho de PVC-P de 1 ½" y se realiza el roscado y ajuste respectivo.

Al adaptador hembra ubicado en la parte interna del tanque se le acopla un trozo de tubería de PVC-P de 1 ½" de 10 cm de longitud y seguidamente un codo de 90° de PVC-P de 1 ½" al cual se le incorpora un trozo de tubo de PVC-P de 1 ½" que llegue hasta 20 cm antes del fondo del tanque (Figura 5A). Por la pared externa superior del tanque se acopla al adaptador macho, un trozo de 10 cm de longitud de tubería de PVC-P de 1 ½" y en su extremo un tapón liso de PVC-P de 1 ½" removible, el cual sólo se retira para la eliminación del exceso de lodos del tanque séptico (Figura 5B).

Construcción de la parte removible del dispositivo de sifón invertido:

esta parte del dispositivo se acopla al tanque séptico (retirando el tapón liso) (Figura 6A) y consta de una tee de PVC-P de 1 ½" a la cual se le acopla, en cada uno de sus extremos, un trozo de tubería de PVC-P de 1 ½", con una longitud de 10 cm. En la parte central de la tee se coloca un pedazo de tubo PVC-P de 1 ½" y 10 cm de longitud y a continuación se acopla una llave de paso lisa de PVC-P de 1 ½". A continuación, a la tubería ubicada en uno de los extremos de la tee se acopla una unión lisa PVC-P de 1 ½" que se conecta en la tubería en la cual estaba el tapón liso y en el otro extremo se

acopla un codo de PVC-P de 1 ½", un trozo de tubo de PVC-P de 1 ½" que llegue hasta el suelo, un codo de PVC-P de 1 ½" y un tubo de PVC-P de 1 ½" de 20 cm de longitud, al cual se acopla un adaptador hembra de PVC-P de 1 ½", seguido de un adaptador macho de polietileno de 1 ½" y una manguera de polietileno de 1 ½", cuya longitud depende del sitio final de disposición de lodos. En el extremo final de la manguera de polietileno se acopla un adaptador macho de polietileno de 1 ½", un adaptador hembra de PVC-P de 1 ½", un tubo de 20 cm de longitud de PVC-P de 1 ½" y una llave de paso lisa de PVC-P de 1 ½" para controlar la salida del lodo.

Pasos a seguir en la eliminación de los lodos.

Para la eliminación de los lodos se retira el tapón liso ubicado en la parte externa del tanque séptico y se acopla la parte removible del dispositivo (Figura 6 B). En la Figura 7 se presenta el aspecto de las dos partes acopladas del dispositivo de sifón invertido para tanques sépticos enterrados, semienterrados y ubicados sobre la superficie del terreno.

Una vez acopladas las dos partes del dispositivo de sifón invertido debe tenerse la precaución de que la llave de paso lisa que se encuentra sobre la tee en la parte externa del tanque séptico, se encuentre abierta, y la llave de paso lisa que se encuentra en el extremo de descarga del dispositivo, a la entrada del lecho de secado de lodos, se encuentre cerrada.

Para la eliminación de los lodos (Figura 8A) se adiciona agua, a través del extremo de la llave de paso colocada en la parte alta del dispositivo ubicado en la parte externa del tanque séptico para purgar el sistema (Figura 8B), recordando que la llave de paso al final del dispositivo de sifón invertido (al lado del lecho de lodos) se

encuentre cerrada. Cuando el agua llene toda la tubería se cierra la llave de paso de la parte alta y se abre la llave de paso de la parte baja del dispositivo. Inicialmente, empieza a salir agua clara y seguidamente los lodos del tanque (Figura 8C). Cuando de nuevo el agua de salida se aclare, lo que significa que ya se retiraron los lodos en exceso (Figura 8D), se abre la llave de paso ubicada en la parte alta del dispositivo. Se recomienda utilizar elementos de bioseguridad para realizar esta labor: delantal impermeable, guantes, caretas y gafas.

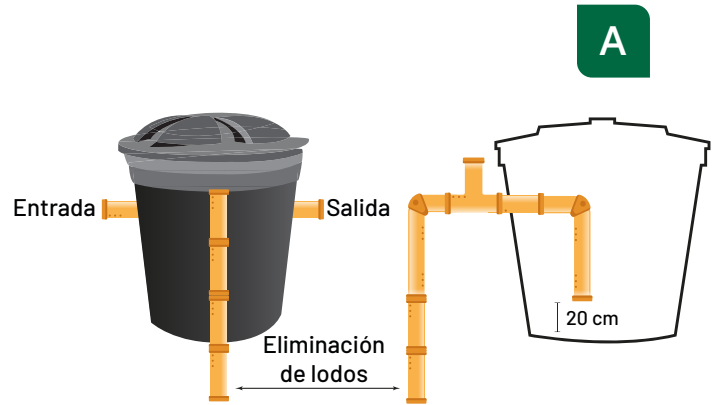


Figura 7. Aspecto del dispositivo de sifón invertido en tanques sépticos con diferentes configuraciones. **A.** Ilustración del dispositivo. **B.** Instalación en tanques localizados sobre la superficie del terreno. **C. y D.** Instalación en tanques semienterrado. **E.** Instalación en tanques enterrados.

Lecho de secado de lodos (Título E, RAS – 2000, MDE, 2000)

Son construcciones diseñadas para eliminar el agua presente en los lodos retirados del tanque séptico, para que estos puedan ser manejados como material sólido, con un contenido de humedad inferior al 70%. Se construyen aguas abajo del tanque séptico, con el fin de poder conducir los lodos por gravedad.

Parámetros de diseño: un lecho de secado debe ser diseñado para retener el volumen total de lodo removido del tanque séptico. Los elementos estructurales del lecho incluyen, entre otros, los muros laterales, tuberías de drenaje, capas de arena, grava y ladrillo, y canales de distribución de lodo. Los muros laterales deben tener un borde libre entre 0,5 y 0,9 m por encima del medio filtrante. Se recomienda utilizar como medios de drenaje, capas de grava (con tamaños de partícula entre 3,0 y 25,0 mm) con espesores entre 20 y 46 cm y capas de arena (con tamaños de partícula entre 0,30 y 0,75 mm, limpias y duras) con espesores entre 30 y 46 cm.

Construcción: se recomienda disponer de un área techada e impermeabilizada de 0,156 m²/persona (sumando las personas permanentes y temporales en la finca). Para calcular el área sólo es necesario multiplicar el número de personas que habitan en la vivienda por la constante 0,156 y el valor resultante es el área necesaria en metros cuadrados para el secado de los lodos. Una vez determinada el área, se calcula el ancho y el largo del lecho (de acuerdo con el área disponible en el terreno) y se realiza una excavación de un metro de profundidad, impermeabilizando el fondo y todas las paredes con plástico agrolene negro calibre 8 o superior, geomembrana de 20 mils o tela plástica de alta densidad tejida y laminada de 190 g m⁻². Posteriormente, en el fondo se ubica

un tubo de aireación y recolección de drenados construido en PVC-S de 4" y se adicionan al lecho 22,5 cm de capa de grava, 22,5 cm de capa de arena y una capa de ladrillo de 5,0 cm de espesor, quedando 50 cm libres para la disposición y el secado de los lodos.

Al tubo de PVC-S de 4" que se coloca en la parte inferior de la excavación, se le realizan perforaciones de 3/16", separados cada centímetro hasta cubrir la mitad del diámetro, por el largo total del tubo. Las perforaciones deben quedar orientadas hacia la parte de arriba, para capturar el agua que drena a través del lecho filtrante y la parte del tubo sin perforar queda orientada hacia abajo, sirviendo de canal de conducción del agua drenada para conducirla afuera del lecho de secado, con una pendiente del 1,0%.

Con el fin de permitir el ingreso de aire al lecho de secado y favorecer el proceso de deshidratación de los lodos, al tubo de drenaje se le coloca, un semi codo en el extremo superior, y a este se acopla un tubo de PVC-S, de forma que llegue hasta el nivel superior de la excavación.

La recolección de percolados debe efectuarse en un tanque plástico para ser llevados, por gravedad, acarreo o bombeo al filtro verde con cero descargas. Para ello es necesario colocar en el extremo inferior del tubo de PVC-S de 4", una unión de PVC-S de 4", una reducción de PVC-P de 4" a 1 ½", seguido de un trozo de 10 cm de longitud de tubería de PVC-S de 1 ½" y un adaptador hembra de PVC-P de 1 ½". Luego, se perfora el material impermeabilizante para permitir la salida de los drenados y se coloca por la pared interna del impermeabilizante, junto al adaptador hembra, una arandela de neolite con perforación interna de 1 ½" y por la pared externa otra arandela similar y un adaptador macho de

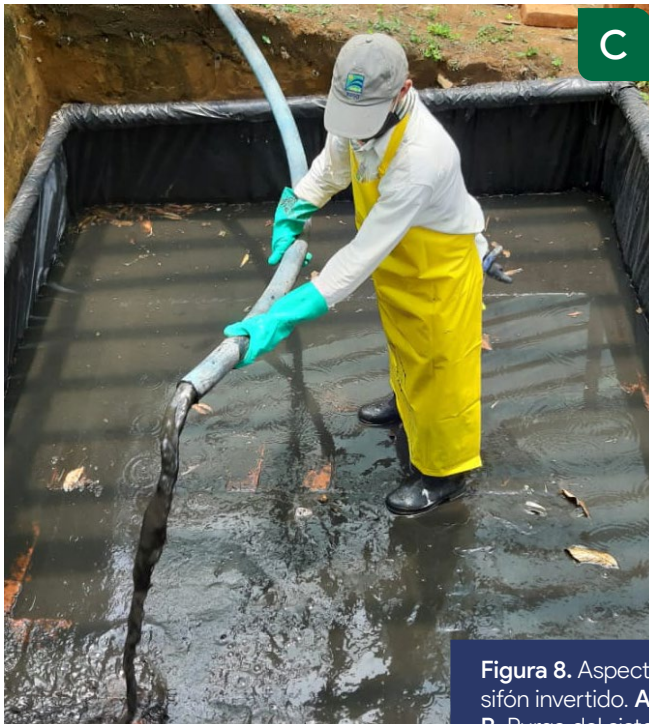


Figura 8. Aspecto de la actividad de eliminación de lodos con el dispositivo de sifón invertido. **A.** Aspecto del tanque séptico al momento del mantenimiento. **B.** Purga del sistema utilizando agua de grifo. **C.** Aspecto del lodo eliminado del tanque séptico. **D.** Aspecto del agua y como ésta se va aclarando, indicando la finalización de la actividad.

PVC-P de 1 ½", un trozo de tubo y un codo de PVC- P de 1 ½", al cual se le acopla un trozo de tubo para llevar los drenados hasta el tanque de recolección. La parte lisa de las arandelas deben estar en contacto con el material impermeabilizante para evitar fugas.

Finalmente, se coloca una cubierta plástica o techo sobre el lecho, utilizando plástico agrolene de alto calibre (8 o superior) o tela en polietileno de alta densidad tejida y laminada por ambas caras, de 170 g m⁻² o superior, impermeable y con filtro UV para evitar el ingreso del agua de

lluvia. En la Figura 9 se presenta la secuencia de construcción de los lechos de secado. Cuando el área requerida para el secado de los lodos sea menor a 1,0 m², pueden adaptarse tanques comerciales en polietileno de 750 L de capacidad, con diámetros en la parte superior, de 1,25 m y en la base de 0,92 m y una altura de 1,02 m, para que operen como lechos de secado (Figura 10), e incluso, para áreas de secado mayores, se podrían disponer, en paralelo, varios tanques que cubran los requerimientos de área necesarios, evaluando aspectos técnicos y económicos (inversión, vida útil y mantenimiento) que respalden la selección de esta alternativa sobre la construcción de los lechos convencionales.

La composición físico-química de los lodos secos los hace aptos para ser utilizados como acondicionadores de suelos o mezclados con otros abonos orgánicos, como el lombricompost o el compost estabilizado de la pulpa de café, para emplearse en programas de fertilización orgánica que no estén dedicados al cultivo de hortalizas, frutas o legumbres que se consumen crudas. En la Tabla 6 se presentan los resultados de la caracterización de los lodos secos provenientes de los tanques sépticos de la Estación Experimental Naranjal.

Los resultados de caracterización de los lodos consignados en la Tabla 6 cumplen para la categoría B descrita en el Decreto 1287 del 2014 (MVCyT, 2014) que los hace apropiados para su uso en: a) en agricultura, para aplicación en el suelo; b) en plantaciones forestales; c) en la recuperación, restauración o mejoramiento de suelos degradados; d) como insumo en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos o productos acondicionadores para suelos; e) para remediación de suelos contaminados; f)

TABLA 6. Caracterización físico-química y recuento microbiológico de los lodos secos provenientes del tanque séptico.

PARÁMETRO	VALOR
CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS LODOS SECOS PROVENIENTES DEL TANQUE SÉPTICO	
pH (unidades)	6,20
Conductividad Eléctrica (mS cm ⁻¹)	2,63
Humedad (%)	17,27
Materia seca (%)	82,73
Cenizas (%)	49,54
NTotal (%)	3,02
P (%)	0,48
K (%)	1,08
Ca (%)	0,90
Mg (%)	0,26
Fe (mg kg ⁻¹)	11811
Mn (mg kg ⁻¹)	143
Zn (mg kg ⁻¹)	523
Cu (mg kg ⁻¹)	154
RECUESTO MICROBIOLÓGICO EN LOS LODOS SECOS PROVENIENTES DEL TANQUE SÉPTICO	
Coliformes totales (UFC/g)	8 x 10 ³
Coliformes fecales (UFC/g)	4,8 x 10 ²
Mohos y levaduras (UFC/g)	4,0 x 10 ³
Salmonella (UFC/g)	Ausente
<i>Escherichia coli</i> (UFC/g)	5
Huevos de Helminto (Presencia/4 g)	Ausente

como insumo en la fabricación de materiales de construcción; g) en la estabilización de taludes de proyectos de la red vial nacional, red vial secundaria o terciaria; h) en la operación de rellenos sanitarios como cobertura diaria, cobertura final de cierre y de clausura de plataformas y en actividades de revegetalización y paisajismo; i) actividades de revegetalización y paisajismo de escombreras; j) en procesos de valorización energética.



Figura 9. Construcción de un lecho de secado de lodos. **Fuente:** Rodríguez et al., 2022b.

Materiales para la instalación de un lecho de secado de lodos utilizando un tanque de polietileno con tapa

- Tubería de PVC-S de 1 ½"
- Una tee de PVC-S de 1 ½"
- Dos codos de PVC-S de 1 ½"
- Tres adaptadores macho de PVC-P de 1 ½"
- Tres adaptadores hembra de PVC-P de 1 ½"
- Seis arandelas de neolite con perforación interna de 1 ½"
- Grava, gravilla, arena, ladrillo
- Una llave de paso lisa de 1 ½" PVC-P

Al tubo de PVC-S de 1 ½" que se coloca en la parte inferior del tanque, se le realizan perforaciones de 5/16", hasta cubrir la mitad del diámetro, la mayor cantidad posible, por el largo total del tubo. Las perforaciones deben quedar orientadas hacia la parte de arriba, para capturar el agua que drena a través del lecho filtrante y la parte del tubo sin perforar queda orientada hacia abajo, sirviendo de canal de conducción del agua drenada para conducirla afuera del tanque, con una pendiente del 1,0%. El acople de los materiales se realiza de acuerdo con el esquema presentado en la Figura 10.

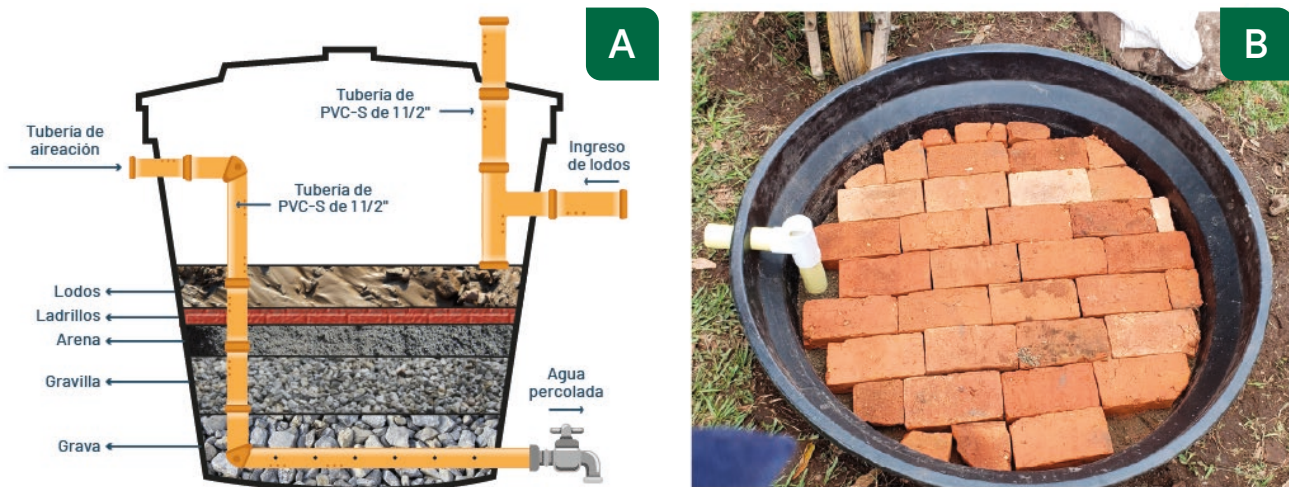


Figura 10. Tanque en polietileno adaptado como lecho de secado de lodos A. Esquema. B. Aspecto en el campo (Rodríguez et al., 2022b).

Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA)

Consiste en un tanque de polietileno o construido en ladrillo y mampostería, empacado con material filtrante, el cual puede estar enterrado, semienterrado o sobre la superficie. Se ubica aguas abajo del tanque séptico, conservando un desnivel de 75 cm (medido entre la salida del tanque séptico y la entrada al FAFA), el agua residual proveniente de éste ingresa hasta el fondo y asciende a través del medio filtrante, sobre el cual se establecen microorganismos anaerobios, encargados de realizar un tratamiento biológico al agua residual pretratada en el tanque séptico. El efluente se conduce a un filtro verde con cero descargas.

Parámetros de diseño: para la determinación del volumen del FAFA se consideran variables como número de contribuyentes, contribución de aguas residuales por habitante, tiempo de retención y material filtrante (Título E, RAS-2000, MDE, 2000). Entre los materiales filtrantes que pueden utilizarse en el FAFA se tienen (Rodríguez et al., 2022b):

- Trozos, de 10 cm de longitud, de manguera de 1" a 2" de diámetro en polietileno reciclado.
- Botellas plásticas no retornables entre 2,0 y 2,5 L de capacidad, partidas en tercios.
- Grava, con un diámetro comprendido entre los 5 y los 6 cm.
- Rosetones plásticos filtrantes.

Para el diseño del FAFA se requiere conocer los datos de porosidad y la superficie específica de los medios filtrantes. En la Tabla 7 se presenta información relacionada con la porosidad y el área superficial de los principales medios filtrantes utilizados para llenar los FAFA, caracterizados en Cenicafé (Rodríguez et al., 2022b).

TABLA 7. Características de algunos medios filtrantes usados en los FAFA.

MATERIAL FILTRANTE	POROSIDAD (%)	ÁREA SUPERFICIAL (m ² m ⁻³)
Trozos botellas plásticas no retornables	98,7	51,7
Trozos de manguera de polietileno reciclado	78,0	170,8
Grava entre 5,0 y 6,0 cm de diámetro	45,0	98,0 - 130,0
Rosetones plásticos filtrantes	95,0	102,0
Trozos de guadua de 15 cm	77,8	48,2

La ventaja que muestran los medios filtrantes plásticos respecto a la grava, es que por tener una mayor porosidad, el volumen total del tanque anaerobio (FAFA) es menor, a la vez que muchos de los medios filtrantes plásticos presentan un área superficial mayor a la grava (áreas superficiales mayores a 100 m² m⁻³), ofreciendo una gran superficie para la colonización por parte de los microorganismos responsables de la depuración de las aguas residuales domésticas, aumentando la eficiencia del sistema de tratamiento.

Otra ventaja adicional es que el material filtrante plástico, por su menor peso y mayor porosidad, ejercerá una menor carga sobre el tanque utilizado como filtro, incrementando su vida útil, facilitando su operación y mantenimiento, disminuyendo la probabilidad de taponamientos, colmatación y cortocircuitos hidráulicos.

De acuerdo con lo establecido en el Título E del RAS (Minvivienda, 2000), los filtros anaerobios de flujo ascendente empacados con grava, permitieron una eliminación de la carga orgánica entre el 60% y el 80%. Investigaciones en Cenicafé con filtros anaerobios de flujo ascendente, empacados con tercios de botellas plásticas no retornables, tuvieron eficiencias de

remoción de carga orgánica en el rango alto de la grava (80,39%), ejerciendo menor presión sobre el tanque y el terreno, comparado con la grava y siendo más fácil el mantenimiento del lecho filtrante (Rodríguez et al., 2022b).

Se recomienda, como mínimo, un FAFA con una capacidad de 2.000 L, el cual tiene una altura aproximada de 1,57 m y un diámetro interno aproximado de 1,16 m.

Construcción: el FAFA se instala de la misma manera que el tanque séptico teniendo en cuenta la cota de desnivel entre la salida del tanque séptico y la entrada del FAFA que debe ser mínimo de 30 cm para lograr el flujo adecuado por gravedad, siendo recomendable cotas de 75 cm para aumentar la cabeza de presión que permite el flujo por gravedad.

Los diámetros de la tubería de entrada y salida para un FAFA están entre las 2" y 3". La tubería del tanque séptico entra al FAFA y desciende verticalmente (hasta 10,0 cm antes del fondo) en el cual se distribuye para ascender de forma homogénea a través del medio filtrante (Figura 11), creando un flujo ascendente a través del lecho para finalmente salir hacia el filtro verde con cero descargas. La tubería de salida del FAFA debe estar localizada a una distancia máxima de 20 cm por debajo del nivel del medio filtrante. El flujo a través del filtro coloca en contacto el agua residual con los microorganismos adheridos al medio filtrante (MinVivienda, 2010).

Campos de infiltración

La implementación de esta unidad estaría destinada solo a los usuarios de vivienda rural dispersa que han sido categorizados como tales por la autoridad ambiental y que, por lo tanto, no requieren de permiso de vertimientos ni de

caracterizaciones del vertido, pero que deben cumplir con el diseño de los sistemas sépticos tal como lo establece el Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico de Colombia (RAS). No obstante, si los usuarios de vivienda rural dispersa deciden no generar vertidos, pueden reemplazar esta unidad por un filtro verde con cero descargas.

Para los usuarios diferentes a los usuarios de vivienda rural dispersa, dado que deben solicitar permiso de vertimiento, implementar plantas de tratamiento y caracterizar los vertidos antes de descargarlos al suelo, la implementación de un filtro verde con cero descargas les permite eliminar los costos legales ambientales asociados a los vertidos.

Descripción: los campos o zanjas de infiltración consisten en una serie de zanjas angostas que se disponen en paralelo, en forma de espina de pescado u otras configuraciones geométricas dependiendo de la topografía del terreno y que se localizan aguas abajo del FAFA. En el fondo de las mismas, se coloca una capa de grava limpia y sobre ella se instala un sistema de tubería tipo drenaje que se cubre con una capa de grava fina y, para evitar la alteración de la capacidad filtrante de la grava, se coloca papel grueso o una capa de paja o cualquier otro tipo de material permeable que facilite la evapotranspiración del agua residual aplicada. Las zanjas de infiltración reciben el efluente del FAFA y lo distribuyen en el terreno a través de las perforaciones de las tuberías y de sus uniones y se utilizan para la disposición final de los vertimientos en el suelo (Título J, RAS–2010).

Parámetros de diseño: las zanjas de infiltración deben ubicarse en suelos cuyas características de permeabilidad permitan la absorción del agua

residual que sale del sistema de tratamiento y su diseño se realiza con base en los resultados de las pruebas de infiltración del terreno. Deben tenerse en cuenta, las siguientes consideraciones (Título J, RAS–2010):

- ◆ El fondo de la zanja debe quedar por lo menos a dos metros por encima del nivel freático.
- ◆ El ancho de la zanja podrá variar entre 0,45 y 0,75 m, su profundidad mínima de 0,6 m y su pendiente entre el 0,3% y el 0,5%.
- ◆ La grava limpia utilizada para llenar la zanja debe tener un diámetro entre 10,0 y 60,0 mm.
- ◆ La distancia mínima entre la zanja y cualquier árbol debe ser mayor a 3,0 m.

El área del campo de infiltración se obtiene, dividiendo el caudal de agua, en $m^3 d^{-1}$, que

sale del FAFA, entre la tasa de aplicación, expresada en m^3/m^2-d^{-1} , que se calcula en función de la velocidad de infiltración, expresada en min/pulgada y que se obtiene realizando una excavación en el suelo, en el cual desea construirse el campo de infiltración, de 30 cm x 30 cm x 60 cm de profundidad y la cual se llena con agua durante una hora, para saturar el suelo, se deja drenar y posteriormente se llena hasta la mitad con agua y con la ayuda de una regla graduada se determina el tiempo, en minutos, que tarda el nivel de agua en bajar una pulgada. A través de la Tabla 8 se calcula la tasa de aplicación en función de la velocidad de infiltración.

A través de la Resolución 0330 del 2017 (MVCT, 2017) se establece que el largo máximo de la zanja de infiltración no debe superar los 30 m y el diámetro de las tuberías debe estar entre 0,10 y 0,15 m.

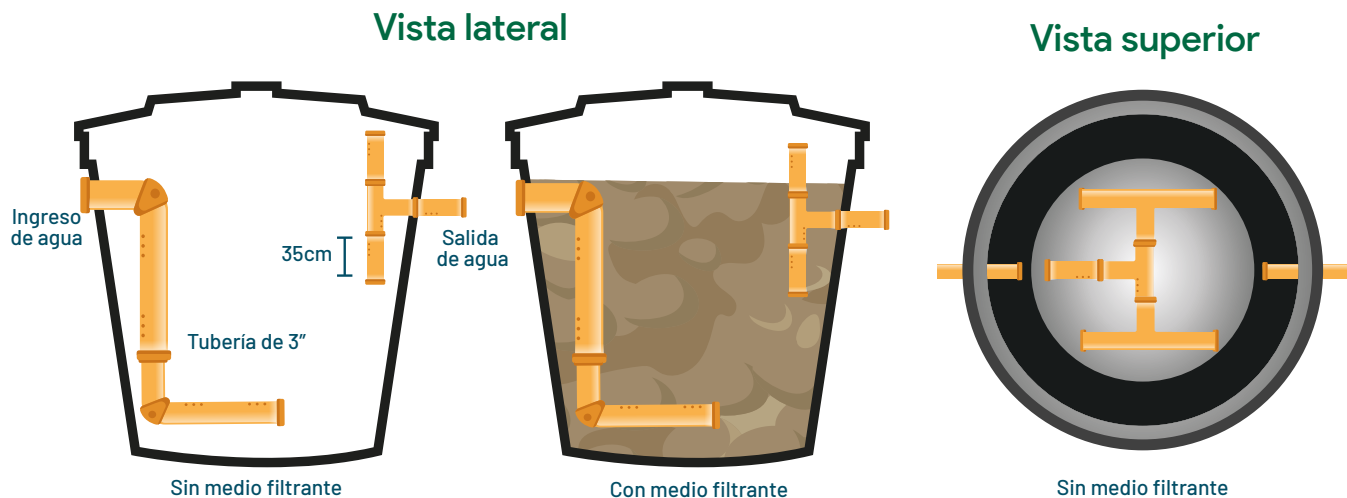


Figura 11. Características de los Filtros Anaeróbicos de Flujo Ascendente (FAFA).
Fuente: Rodríguez et al., 2022b.

Materiales y herramientas necesarios para la instalación de un FAFA

Un tanque de polietileno o construido en mampostería en ladrillo y cemento, con el volumen apropiado, relacionado con el número de personas permanentes y temporales de la vivienda, con su respectiva tapa y una altura mínima, de acuerdo a lo establecido en la Tabla 5.

- Una tee interna de PVC-S de 3" para la entrada.
- Una tee interna de PVC-S de 2" para la salida.
- Un codo de PVC-S de 2" para elaborar el dispositivo de distribución del agua que ingresa al FAFA.
- Tres tees de PVC-S de 2"
- Tubería de PVC-S de 2"
- Tubería de PVC-S de 3"
- Una unión de PVC-S de 3"
- Una reducción de PVC-S de 3" a 2".
- Un rollo de cinta de teflón.
- Material de empaque: 270 trozos de botellas plásticas no retornables por metro cúbico ó 564 trozos de guadua por metro cúbico.
- Soldadura y limpiador PVC.

Adaptadores macho y hembra de PVC-P de 3" y 2" y cuatro arandelas en neolite, con los diámetros apropiados para la instalación de la tubería de ingreso y salida al tanque (dos y dos), de forma que se tenga un buen sello hidráulico. Como alternativa (para eliminar los costos de los adaptadores) se podría instalar la tubería, de forma que ingrese y salga ajustada en los agujeros respectivos, y sellar los bordes externos con silicona negra, para asegurar el sello hidráulico.

Si el FAFA se instala utilizando un tanque comercial en polietileno, se recomienda utilizar las mismas herramientas descritas en la trampa de grasas.

Rotoplast
NACIONALIDAD DE PRODUCTOS PLÁSTICOS
5000lt.
www.rotoplast.com.co



Materiales complementarios para la instalación de un FAFA

Si el FAFA se instala enterrado o semienterrado en el terreno, se requiere realizar el mismo procedimiento descrito para la trampa de grasas.

Para tener en cuenta

Algunos tanques comerciales tienen una perforación en la parte inferior, la cual debe ser sellada con un adaptador macho de PVC-P y un tapón roscado de PVC-P y arandelas en neolite con el diámetro interno apropiado, al instalarlas, debe tenerse en cuenta que la parte lisa de las arandelas debe estar contacto con la pared del tanque.

TABLA 8. Tasas de aplicación según tiempo de infiltración y textura del suelo. Fuente: Adaptado de Office of Water Program Operations (1980).

TASA DE PERCOLACIÓN (min/pulgada)	TEXTURA DEL SUELO	PERMEABILIDAD DEL SUELO	TASA DE APLICACIÓN (m ³ m ⁻² -d ⁻¹)
<1	Grava, arena gruesa	Rápida	No apropiado
Entre 1 y 5	Arena gruesa a media	Rápida	0,049
Entre 6 y 15	Arena fina Arenosa-franca Franco-arenosa Franco-limosa	Rápida a media	0,033
Entre 16 y 30	Franco-limosa Franca Franco-arcillosa-arenosa Franco-arcillosa	Media a lenta	0,024
Entre 31 y 60	Franco-arcillosa Franco-arcillosa-limosa	Lenta a muy poco permeable	No apropiado*
>60	Arcilla liviana Arcilla compacta	Muy poco permeable	No apropiado

(*) Según lo dispuesto en el Título J del RAS – 2010.

Una vez determinada el área de infiltración y el largo establecido conforme a la disponibilidad del terreno (que no debe superar los 30 m), se calcula el ancho del campo. El número de zanjas se calcula dividiendo el área del campo, entre el ancho entre zanjas (que se sugiere sea de 2,1 m) y el largo del terreno (Rodríguez et al., 2022b).

Construcción: al ingreso del campo de infiltración debe instalarse una caja de distribución que tiene como objetivo recibir el agua proveniente del FAFA y repartir el efluente hacia las zanjas del campo, que deben tener entre 0,45 y 0,75 m de ancho y 0,60 m de profundidad. Para lograr una buena distribución del agua, se recomienda adecuar un tanque de 250 L en polietileno, tipo bebedero, al cual le ingresa el agua proveniente del FAFA por la parte superior y salen, por la parte

inferior, como mínimo, tres tubos de PVC-S de 4" que llegan a las zanjas de infiltración (Figura 12), a los cuales se les realiza una serie de perforaciones en dos líneas con broca de 3/16", separadas 10,0 cm entre cada una.

Sobre la base de las zanjas se dispone una capa de grava limpia (con tamaño de partícula entre 1" y 2") de 0,15 m de altura y sobre ella se colocan los tubos con sus perforaciones hacia abajo y se completa el llenado de la zanja, agregando otra capa de grava de 0,15 m, seguido de una capa de grava fina (con tamaño de partícula entre 1/2" y 1") de 0,10 m de altura, una capa de hierba seca de 0,05 m y se termina el llenado de la zanja con suelo. En la Figura 13 se presenta el aspecto de la construcción de un campo de infiltración de 67 m², con un ancho de 4,5 m, una longitud de 15 m y tres zanjas.

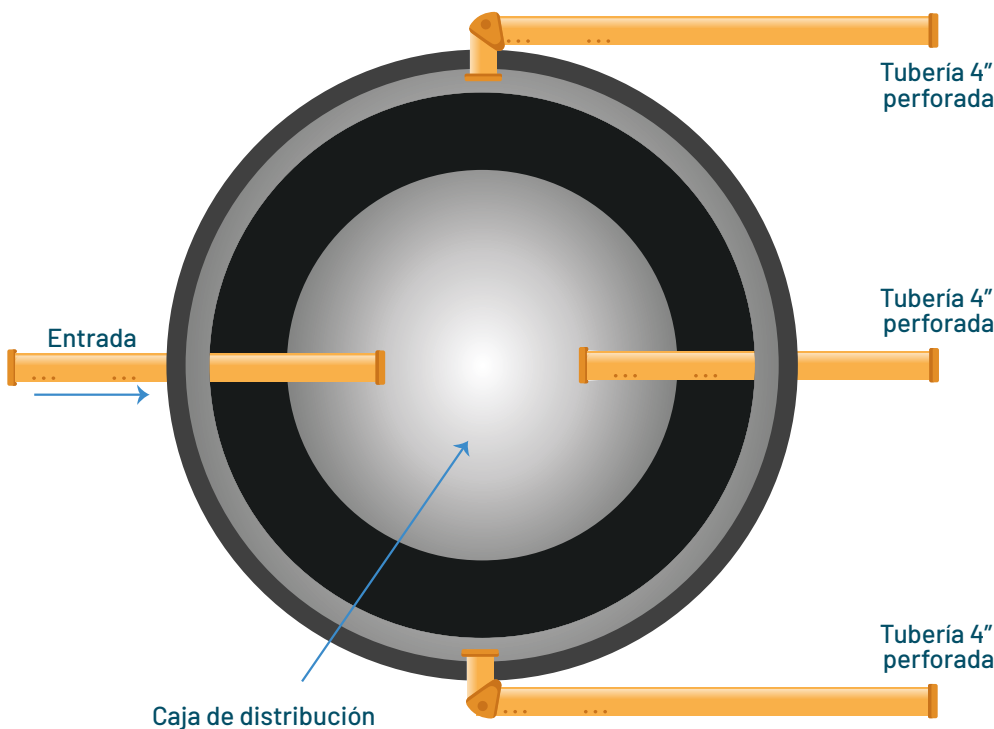


Figura 12. Esquema de la caja de distribución a la entrada del campo de infiltración.
Fuente: Rodríguez et al., 2022b.



Recámara de distribución

Construcción de las zanjas con un ancho, profundidad y largo, conforme a lo establecido en el RAS

Adición de 0,15 m de grava en el fondo de las zanjas

Perforación de la tubería de drenaje

Instalación de la tubería de drenaje sobre la grava

Adición de grava hasta cubrir la tubería de drenaje

Adición de gravilla, paja y material sobrante de la excavación hasta la superficie del terreno

Delimitación del terreno y siembra de material vegetal para ayudar a la absorción del líquido efluente

Figura 13. Aspecto de la construcción de un campo de infiltración **Fuente:** Rodríguez et al., 2022b.

Filtro verde con cero descargas

Es un invernadero con piso impermeabilizado sembrado con pasto vetiver al cual llegan las ARD-T provenientes del FAFa, para ser evapotranspiradas mediante procesos evaporativos (suelo) y evapo-transpirativos (vegetación), y evitar la generación de vertidos al suelo o a cuerpos de agua superficiales, con lo cual se evita la contaminación de los recursos naturales presentes en el ecosistema

cafetero, a la vez que se evitan los costos legales asociados al vertido (Figura 14). Se localiza aguas abajo del FAFa, con una cota de desnivel sugerida de 75 cm, medida desde la salida del FAFa al piso del invernadero, con el fin de conducir las aguas por gravedad. Antes del ingreso del ARD-T al filtro verde y para facilitar su riego por goteo debe reducirse la tubería proveniente del FAFa de 2" a 1/2" para alimentar cuatro líneas de riego.

Detalle del filtro verde en un sistema de manejo, tratamiento y cero descargas de las aguas residuales de la vivienda cafetera

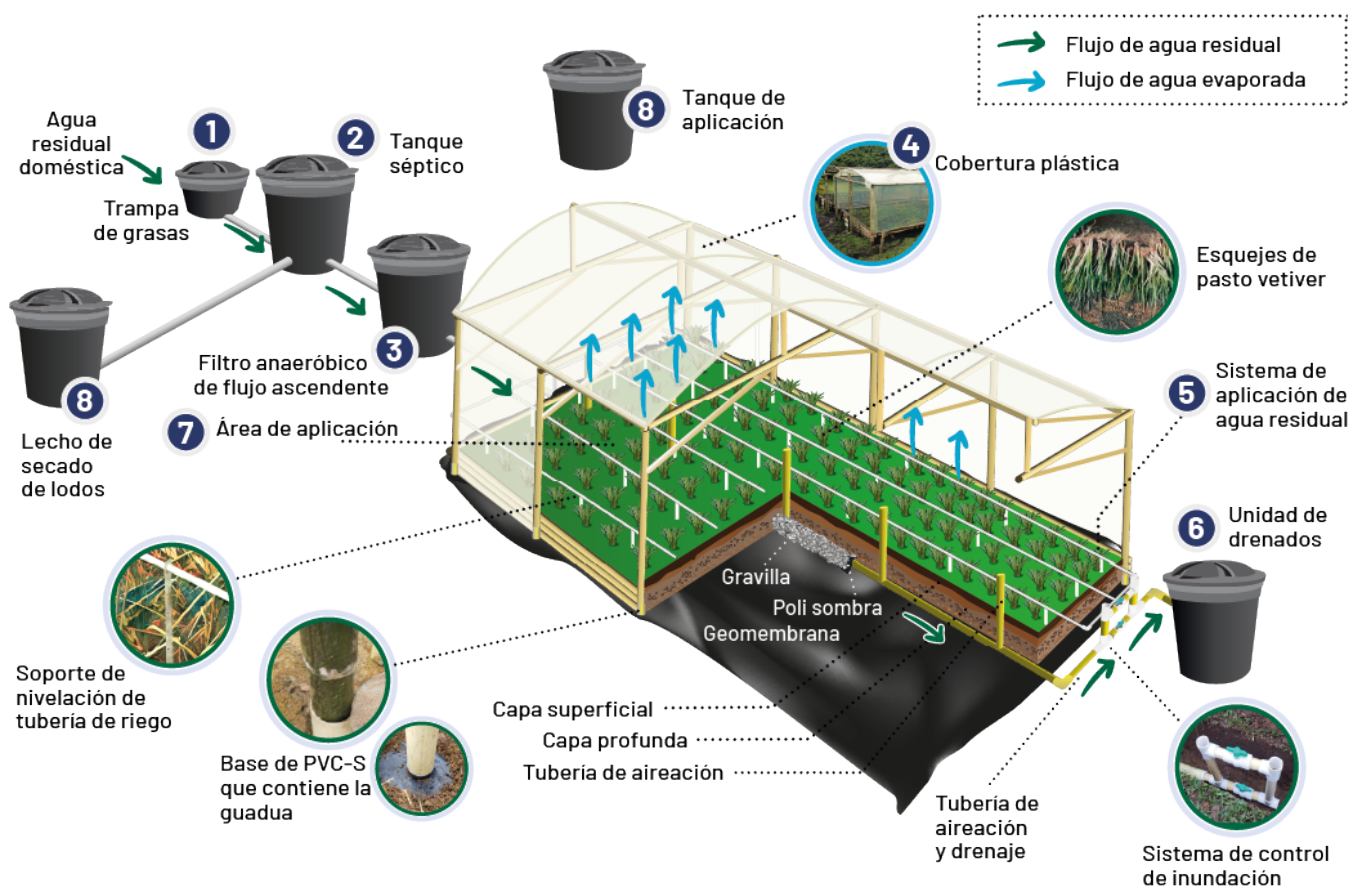


Figura 14. Aspecto de un sistema de manejo y tratamiento de las ARD-T incorporando un filtro verde con cero descargas.

El invernadero impermeabilizado (filtro verde) reemplaza, en un sistema séptico, al campo de infiltración. En la parte baja del filtro verde se ubica un tanque con una capacidad equivalente a la mitad del volumen del FAFA para recibir el agua que no se logre evapotranspirar en el invernadero (tanque de drenados). En la parte alta del filtro verde se ubica otro tanque de igual capacidad al tanque de drenados al cual se conduce el agua que no ha sido evaporada (tanque de aplicación), con el fin de volverla a conducir al invernadero hasta su agotamiento total. Se recomienda que el transporte del agua del tanque de drenados al tanque de aplicación se realice sólo cuando el tanque de drenados esté lleno y mediante el uso de una bomba fabricada en acero inoxidable.

Parámetros de diseño: de acuerdo con las investigaciones realizadas en Cenicafé, la tasa evapotranspirativa de aguas con cargas contaminantes bajas expuestas bajo invernadero en un suelo sembrado con pasto vetiver fue de $22 \text{ L m}^{-2}\text{-d}^{-1}$, por lo que el área útil del invernadero (sembrada con vegetación) se calcula dividiendo entre 22 el volumen de ARD generadas en el día de máxima actividad, cuando en la finca se encuentran todas las personas permanentes y el máximo de personas temporales (Rodríguez et al., 2022a).

Construcción: a continuación, se detalla el paso a paso del diseño y construcción del filtro verde con cero descargas para el manejo de las ARD-T.

Paso 1. Cálculo del área útil y dimensiones del filtro verde. Se calculan con base a la contribución de aguas residuales de las personas permanentes y temporales presentes en la finca en el día de mayor afluencia de personas,

considerando las tasas evapotranspirativas dentro del invernadero.

De acuerdo con el Título E del RAS-2000, una persona permanente contribuye con 160 L de agua residual al día y una persona temporal con 70 L de agua residual al día.

Para colocar un ejemplo, si en la finca hay cinco personas permanentes y en cosecha se tienen diez trabajadores, la cantidad de agua residual generada en el día sería:

$$\text{Agua residual al día: } 5 \times 160 \text{ L} + 10 \times 70 \text{ L} = 1.500 \text{ L/d}$$

De acuerdo con las investigaciones de Cenicafé (Rodríguez et al., 2022a), en un invernadero impermeabilizado sembrado con pasto vetiver pueden evapotranspirarse $22 \text{ L m}^{-2}\text{-d}^{-1}$ de agua residual con baja carga orgánica (propio de las ARD), por lo tanto, el área útil que debe ser sembrada con pasto vetiver en el invernadero sería de

$$\text{Área útil} = 1.500/22 = 68 \text{ m}^2$$

Con el fin de optimizar el diseño, se recomienda que en la vivienda se adopte un PUEAA, mediante el cual pueda disminuirse el consumo de agua a la mitad, con lo cual el tamaño del filtro verde se reduciría a la mitad.

Teniendo en cuenta que debe impermeabilizarse el piso del filtro verde y que la mayoría de

los materiales impermeabilizantes ofertados en el comercio tienen un ancho de 7,0 m, se recomienda, para optimizar el uso del impermeabilizante, que se realice una excavación de 0,70 m de profundidad y que el área de siembra del invernadero tenga un ancho de 5,0 m. Con el valor del ancho de 5,0 m y conocida el área útil del filtro verde, se calcula la longitud del área de siembra.

Paso 2. Ubicación del filtro verde. Debe realizarse una selección apropiada del terreno y del área necesaria para la instalación del filtro verde, aguas abajo del FAVA con el fin de conducir las ARD-T por gravedad. El filtro debe ubicarse en un terreno plano, libre de material rocoso y de árboles cuyos frutos o ramas puedan dañar la cobertura del invernadero (cuando se deprendan del árbol) o cuyas raíces puedan romper el material impermeabilizante del piso del invernadero. En caso de no tener disponible un área plana, por la pendiente del terreno en las fincas (Figura 15), debe construirse una terraza con la ayuda de trinchos vivos, en la cual el suelo retirado de la parte alta de la pendiente pueda utilizarse como relleno en la parte baja (Figura 16). El suelo del filtro verde debe ser

similar al que se utiliza para la siembra del café (entre franco-arenoso a franco-arcillo-limoso). El filtro verde no debe establecerse sobre suelos arcillosos o arenosos, debido a que los suelos arcillosos tienen una baja permeabilidad y dificultan el establecimiento del pasto vetiver; a su vez, los suelos arenosos, si bien tienen una permeabilidad alta, dificultan el anclaje del pasto vetiver y no le proveen los nutrimentos necesarios para permitir su normal desarrollo.

Paso 3. Realización de la excavación. Delimite el área seleccionada (con su ancho y largo) y realice una excavación de 0,70 m de profundidad (Figura 17). En el momento de realizar la excavación, deben separarse los perfiles del suelo, dado que después de impermeabilizar la excavación, es necesario volver a incorporar el suelo para la siembra de la vegetación, siendo recomendable 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. Una vez instalado el material impermeabilizante, se adiciona primero el suelo que se retiró de las capas más profundas y luego el suelo que se retiró de las capas superficiales.



Figura 15. Terreno con pendiente para instalación del filtro verde.



Figura 16. Terraza construida en un terreno con pendiente para la instalación del filtro verde.

Paso 4. Elaboración canal central. Elimine rocas, piedras angulares, vidrios, alambres o cualquier objeto, que pueda ocasionar daño mecánico al material impermeabilizante ubicado en el fondo de la excavación y en las paredes, ya sea por rasgadura, corte o impacto (Figura 18). En caso de encontrar rocas grandes que no puedan ser retiradas de la excavación, proceda a forrarlas con material plástico para evitar su contacto directo con el material impermeabilizante. Una vez lista la excavación, construya un canal central, con una pendiente máxima del 1,0%, y con una salida afuera de la excavación, para instalar, después de impermeabilizar, la tubería de aireación y recolección de drenados, construida en tubería de PVC-S de 3" (Figura 19).

Paso 5. Impermeabilización del fondo y de las paredes de la excavación. A continuación, proceda con la impermeabilización de la excavación (fondo y paredes) con el fin de evitar la infiltración del agua residual aplicada, utilice materiales impermeabilizantes que estén garantizados por los proveedores para el almacenamiento de agua y que tengan una vida útil comparable a la de los tanques de polietileno (mayor a 30 años). En Cenicafé se han utilizado impermeabilizantes como geomembrana de 20 mils (Tabla 9) y tela tejida en polietileno de alta densidad de 190 g m^{-2} , laminada por ambas caras (Tabla 10), con un tiempo de uso, al momento de la presente publicación, de 5 años, sin que se observe deterioro de los mismos (Figura 20). Tenga cuidado de no dañar el impermeabilizante durante su instalación, por lo que se recomienda manipularlo sin el uso de calzado, dentro de la excavación.

Paso 6. Ubicación de la tubería de aireación y conducción de drenados. Instale dentro del canal central una tubería para facilitar la aireación del suelo y el drenaje del agua no evaporada.



Figura 17. Excavación de 0,70 m de profundidad para la construcción del filtro verde.



Figura 18. Eliminación de rocas y materiales contrapuzantes de la excavación.



Figura 19. Elaboración del canal central con salida afuera de la excavación.



Figura 20. Material impermeabilizante del filtro verde. A. Geomembrana de 20 mils. B. Tela tejida en polietileno de 190 g m⁻².

TABLA 9. Ficha técnica comparativa del plástico y la geomembrana. Fuente: Adaptado de Productos Químicos Andinos [PQA] (2021).

PARÁMETRO	AGROBLACK ESPESOR 6	GEOMEMBRANA				
Descripción	Lámina coextruida 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				
PROPIEDADES ÓPTICAS Y TÉRMICAS						
Bloqueo UV	Total	> 80				
PARÁMETRO	AGROBLACK ESPESOR 6	GEOMEMBRANA (MILS)				
		20	30	40	60	80
Ancho	Hasta 12 m	7,0 m				
PROPIEDADES MECÁNICAS (MÍNIMO)						
Espesor promedio (mm)	0,15	0,45	0,68	0,90	1,35	1,80
Resistencia al rasgado dirección transversal (N)	8,83	62	93	125	187	250
Resistencia a la rotura (kN m ⁻¹)	-	15	22	28	44	57
Resistencia en el punto de fluencia (kN m ⁻¹)	-	8	11	15	22	29
Resistencia al punzonado (N)	-	203	300	375	498	645

TABLA 10. Ficha técnica comparativa del plástico y la tela plástica tejida y laminada.
 Fuente: Adaptado de Productos Plásticos de Colombia [Proplacol] (2024).

PARÁMETRO	AGROBLACK ESPESOR 6	TELA PLÁSTICA TEJIDA Y LAMINADA		
Descripción	Lámina coextruida estabilizada con níquel y antioxidante.	Polietileno de alta densidad, tejido y laminado por ambas caras, impermeable, con aditivo de filtro AntiUV, antipolvo, difusor solar y transmisión solar del 83% - 87%. La tela de 190 g m ² la recomienda el fabricante para impermeabilización de lagos y reservorios de agua.		
Composición	Polietileno de baja densidad; pigmento.	Polietileno de alta densidad, polietileno de baja densidad, pigmento.		
Tonalidad	Negro	Translúcido, azul, blanco/negro		
PROPIEDADES ÓPTICAS Y TÉRMICAS				
Bloqueo UV	Total	-		
PARÁMETRO	AGROBLACK ESPESOR 6	TELA PLÁSTICA TEJIDA Y LAMINADA		
		140 g m ²	170 g m ²	190 g m ²
Ancho	Hasta 12 m	Desde 2 m hasta el requerido		
PROPIEDADES MECÁNICAS (MÍNIMO)				
Espesor promedio (mm)	0,15	-	-	-
Resistencia a la tracción (psi)	-	109,5 - 136,9	143,5 - 173,2	157,7 - 191,2
Resistencia a la tracción (kN m ⁻²)	-	755 - 944	989 - 1.194	1.087 - 1.318
Resistencia al desgarre (psi)	-	18,5 - 24,6	25,4 - 29,8	31,8
Resistencia al desgarre (kN m ⁻²)	-	128 -170,0	175 - 205	219

Utilice tubería de PVC-S de 3" y perforo la mitad superior de su circunferencia con la mayor cantidad posible de agujeros de 5/16", la otra mitad (que está sin perforaciones) se introduce en el canal central, ya impermeabilizado, para conducir los drenados generados hacia el tanque instalado para este fin (Figura 21).

Para facilitar la salida de los drenados del área impermeabilizada, en el extremo de descarga del tubo de PVC-S de 3", se coloca una unión de PVC-S de 3", una reducción de PVC-P de 3" a 2", un trozo de tubo de 10 cm de PVC-S de 2", un adaptador macho de PVC-P de 2" con una arandela de neolite con agujero interno de 2" (Figura 22), se perfora la geomembrana con la

ayuda de un bisturí, cuidando de no exceder el diámetro de los accesorios y por la parte exterior del impermeabilizante se coloca una arandela de neolite con agujero interno de 2" y un adaptador hembra de PVC-P de 2" (Figura 23). Recuerde que la parte lisa de la arandela debe estar en contacto con el material impermeabilizante para tener un buen sello hidráulico, dado que la arandela tiene dos caras: la lisa y la áspera, y esta última no tiene una superficie uniforme y, por lo tanto, podrían presentarse microfiltraciones.

En este paso es muy importante asegurar y evaluar el sello hidráulico, dado que si los ajustes de los acoples no son apropiados se presentarán fugas cuando el sistema empiece a operar,



Figura 21. Ubicación de la tubería de aireación y conducción de drenados en el canal central.



Figura 22. Accesorios en el extremo de descarga de la tubería de conducción de drenados.

que no se podrán evidenciar, al estar la tubería tapada con el suelo, generando problemas de contaminación por la infiltración del agua residual en el suelo.

A través de la experiencia en el campo se ha evidenciado la necesidad de rectificar la rosca de los adaptadores macho y hembra adquiridos en el mercado, utilizados para el acoplamiento de las tuberías, tanto en los tanques de polietileno como en el material impermeabilizante utilizado en la excavación del área de siembra del filtro verde, dado que estos materiales presentan un espesor de pared muy delgado y cuando se incorporan los adaptadores de PVC adquiridos en el comercio, el adaptador macho no rosca completamente en el adaptador hembra (Figura 24A). Para estos casos se tienen dos soluciones: la primera es recortar parte de la rosca del adaptador macho hasta que acople perfectamente en el adaptador hembra, con el riesgo de que el acople sea insuficiente para alcanzar el sello hidráulico; la segunda opción es



Figura 23. Aspecto de la descarga de la tubería de aireación y conducción de drenados.



Figura 24. Rectificación de la rosca de los adaptadores de PVC. **A.** Acople inicial incompleto. **B.** Calentamiento del roscado del adaptador macho. **C.** Acople final completo.



Figura 25. Instalación de los acoples de salida en el material impermeabilizante de la excavación con la ayuda de una llave de cadena.

calentar la rosca del adaptador macho utilizando una fuente de calor (estufa eléctrica, estufa a gas) o mediante una pistola de calor (Figura 24B), con ello se debilita el roscado y se logra rectificarlo roscando completamente el adaptador macho, aún caliente, en el adaptador hembra (Figura 24C). Una vez rectificada la rosca, se recomienda que se mantengan los adaptadores emparejados para tenerlos disponibles para su uso.

Para la instalación de los adaptadores rectificados en el campo se recomienda el uso de empaques de neolite, de una llave de cadena que facilite el ajuste de los adaptadores y el sello de los bordes internos y externos de los agujeros de los tanques, y del material impermeabilizante con silicona negra para asegurar el buen sello hidráulico y la posterior evaluación del mismo en la excavación, antes de realizar su llenado (Figura 25).

En la Figura 26 se presenta el detalle de la tubería de salida de la excavación, la cual conduce el agua que no se alcanza a evaporar en el filtro verde hasta un tanque de recolección de drenados, para ser incorporada de nuevo al área de siembra, hasta su agotamiento, permitiendo que se alcance el objetivo de cero descargas. La tubería de descarga consta de un trozo de 15 cm de longitud de tubo de PVC-S o PVC-Lluvia de 2", que se acopla al adaptador hembra, una unión de PVC-S de 2", una reducción de PVC-S de 2" a 1 ½" y tubería de PVC-S de 1 ½" que llega hasta el dispositivo de inundación.

Con el fin de facilitar la aireación del suelo del filtro verde y optimizar la salida del agua evaporada, se recomienda la instalación, cada 3 m, de tees de PVC-S de 3", en la tubería de aireación y drenaje, y ubicar en ellas tramos de 1,5 m de tubería de PVC-S o PVC-Agua Lluvia de 3", que permitan el ingreso del aire desde la parte superior del área de siembra y la distribuyan a través del perfil del suelo. Debe cubrirse el área de la tubería de conducción de drenados con polisombra para evitar el ingreso de suelo (Figura 27). Finalmente, se agrega una capa de grava fina sobre la base de la tubería de conducción de drenados, que abarque sólo el ancho del canal para filtrar el agua que llegue a la base y evitar el taponamiento de la tubería (Figura 28).

Paso 7. Llenado de la excavación. Posterior a la instalación de la tubería de conducción de drenados y aireación, se realiza el llenado de la excavación agregando primero las capas de suelo más profundas (las últimas que se retiraron de la excavación) (Figura 29A) y luego las capas más superficiales (las primeras que se retiraron de la excavación) (Figura 29B), con el fin de mantener el perfil original del suelo. En la Figura 29C se presenta un aspecto de la excavación llena, manteniendo el perfil original del suelo.

Paso 8. Siembra del material vegetal. En el área útil del invernadero debe sembrarse una especie vegetal que presente un alto consumo de agua, una elevada capacidad de asimilación de nutrimentos, así como una elevada tolerancia a los cambios de pH, a la salinidad y a la humedad del suelo, con baja sensibilidad a los constituyentes del agua residual doméstica y con mínima necesidad de control. De las investigaciones realizadas en Cenicafé (Rodríguez et al., 2022a) se ha seleccionado *Chrysopogon zizanioides* L. Roberty (pasto vetiver) (Figura



Figura 26. Aspecto de la tubería de salida del filtro verde.



Figura 27. Instalación de aireadores en la tubería de conducción de drenados y cubrimiento del conjunto con tela polisombra.



Figura 28. Adición de grava fina sobre la base de la tubería de conducción de drenados.



Figura 29. Llenado de la excavación. **A.** Adición de las últimas capas del perfil original del suelo (Estación La Trinidad). **B.** Adición de las primeras capas del perfil original del suelo (Estación El Rosario). **C.** Aspecto final de la excavación llena con el perfil original del suelo (Estación La Catalina).

30), que tradicionalmente se ha utilizado en la zona cafetera para la estabilización de taludes, por el buen crecimiento de su sistema radicular (Figura 31), el cual permite “amarrar” el suelo y ha presentado, bajo invernadero, en las condiciones ambientales de la zona central cafetera, tasas de evapotranspiración promedio de $22 \text{ L m}^{-2}\text{-d}^{-1}$. El pasto vetiver es una gramínea perenne no invasiva, originaria de la India, con semillas estériles y, por lo tanto, no se convierte en maleza o especie invasora. 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). En la Tabla 11 se presentan sus principales características.

Para la siembra se recomienda disponer de esquejes de pasto vetiver. Un esqueje es un material de propagación asexual, compuesto de pedazos de tallos y hojas (10,0 cm de alto), con una pequeña cantidad de raíces (no más de 5,0 cm). La separación de los esquejes se realiza de una macolla madre (Figura 32), asegurando que cada hijo incluya al menos dos a tres brotes y una parte de la corona (la parte dura de la planta entre las raíces y los brotes). 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 (Figura 33). Después de la separación, los esquejes se lavan con agua limpia. Para acelerar el crecimiento es necesario mantener los esquejes húmedos y a la luz, hasta plantarlos (Truong et al., 2008).

TABLA 11. Rango de adaptabilidad de la planta vetiver. Fuente: Adaptado de Truong et al., 2008.

CONDICIÓN	VALOR
CONDICIÓN 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 Manganeso	> 578 mg kg ⁻¹
Sodicidad (Na intercambiable)	48%
Magnesicidad (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	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
Sequia (precipitación no efectiva)	15 meses



Figura 30. Aspecto de un germinador de pasto vetiver.



Figura 31. Aspecto del sistema radicular del pasto vetiver.



Figura 32. Macollas de pasto vetiver para la obtención de esquejes.



Figura 33. Esquejes de pasto vetiver listos para ser plantados en el área útil del invernadero.

La cantidad necesaria de esquejes se calcula considerando una densidad de siembra al cuadro cada 30 cm y sembrando tres esquejes por sitio (Figura 34 B). Lo anterior significa que, por cada metro cuadrado de área de siembra, se requieren 27 esquejes. La siembra se facilita utilizando un ahoyador que permite realizar la excavación apropiada para disponer allí los esquejes (Figura 34A).



A



B



C



D

Figura 34. Aspecto del proceso de siembra del pasto vetiver. **A.** Siembra de los esquejes utilizando un ahoyador. **B.** Aspecto del trazado y siembra al cuadro. **C.** Aspecto del área recién sembrada. **D.** Aspecto del pasto a los dos meses de realizada la siembra.

Paso 9. Instalación de la tubería de riego.

Ubique el sistema de riego del área con vegetación levantado 25 cm del suelo y con una cota mínima de desnivel de 50 cm, medida entre la salida del FAFA y el nivel del suelo del área de siembra. Para la instalación de la tubería de riego, coloque un codo de PVC-P de 2" al tubo de salida del FAFA y acople un tramo de tubo de PVC-P de 2" que llegue a nivel del suelo y acople allí otro codo de PVC-P de 2", seguido de una reducción de PVC-P 2" a 1/2". Construya las líneas de riego utilizando tubería de PVC-P de 1/2". La tubería de riego debe estar perforada con agujeros de 3/32", separados cada 10,0 cm (dos líneas en la parte inferior de la circunferencia del tubo, en ángulo de 45 grados y con un traslape de 5,0 cm entre las dos líneas de perforaciones). Disponga cuatro líneas de riego a través del área de siembra, ubicadas a 0,6 m de los bordes del área cultivada y separadas entre sí 1,6 m y dejando un camino central de 0,6 m para realizar las labores de mantenimiento (Figura 35). Con el fin de facilitar el mantenimiento y la limpieza de las líneas de riego, se recomienda instalar una llave de paso lisa de PVC-P de 1/2" en la tubería

de ingreso justo antes de la derivación de las líneas de riego.

Fije las líneas de riego a una altura de 25 cm respecto al nivel del suelo y nivélelas. Para su nivelación y soporte se sugiere utilizar guías construidas en PVC- conduit o PVC-P de 50 cm de longitud (enterrados 25 cm), espaciadas cada 75 cm o utilizando trozos de manguera de polietileno (Figura 36).

Paso 10. Instalación del dispositivo de inundación.

Dado que el filtro verde debe permanecer inundado para favorecer los procesos de evapotranspiración, el manejo del dispositivo de inundación es fundamental para alcanzar el objetivo de cero descargas. Para su construcción e instalación siga los siguientes pasos:

- ◆ Construya la unidad de control de inundación utilizando dos llaves lisas de PVC-P de 1 1/2", tres tees de PVC-P de 1 1/2", un codo de PVC-P de 1 1/2" y tubería de PVC-S de 1 1/2" para acoplar los accesorios y alcanzar una altura del dispositivo de 60 cm (Figura 37).



Figura 35. Aspecto de las líneas de riego.



Figura 36. Aspecto de los soportes de las líneas de riego.



Figura 37. Detalle del dispositivo de control de inundación.

- ◆ Con relación a las dos llaves, una se instala a nivel de piso y otra a 60 cm de altura. La primera sirve para realizar el mantenimiento y eliminar lodos adheridos en la tubería de descarga de drenados y, la segunda, para mantener el nivel de inundación dentro del filtro verde a 60 cm de altura. 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.
- ◆ Acople el dispositivo de inundación a la tubería de salida de la excavación del filtro verde (Figura 26). De ser necesario utilice un accesorio (codo o semicodo de PVC-P de 1 ½") para realizar la unión.
- ◆ Acople a la tee ubicada en la salida del dispositivo de inundación, un tramo de tubería de PVC-S de 1 ½" que llegue hasta el tanque de drenados. En caso de que la distancia al tanque de drenados sea significativa, por no disponer ni de la cota de desnivel ni del terreno apropiado para su

instalación, instale a la tee de salida un trozo de tubería de PVC-S de 1 ½", un adaptador hembra de PVC-P de 1 ½", un adaptador macho de polietileno de 1 ½" y manguera de polietileno de 1 ½" que llegue hasta el tanque de drenados (para disminuir costos de instalación).

Paso 11. Instalación de la cobertura del área de siembra.

Una vez establecido el pasto vetiver en el área de siembra del filtro verde, esta área debe techarse con el fin de evitar el ingreso del agua de lluvia, dado que ello provocaría la colmatación del filtro verde y disminuiría los rendimientos de evapotranspiración de las ARD-T. Se recomienda, por eficiencia energética, construir un techo tipo parabólico, con un buen entramado, con el fin de alargar la vida útil de la cubierta plástica, que puede ser elaborado en lata de guadua (Figura 38), en tubería metálica (Figura 39) o en tubería PVC. Entre más robusta la construcción mayor será su vida útil.

Se recomienda que la altura dentro del invernadero esté entre 1,90 y 2,10 m con el fin de mantener la eficiencia energética. Alturas mayores a 2,10 m reducen las temperaturas medias al interior del invernadero, con lo cual disminuyen las tasas evapotranspirativas. Mientras que alturas inferiores a 1,90 m, si bien incrementan las temperaturas, dificultan las labores de mantenimiento de tuberías de riego y podas del pasto vetiver.

En terrenos con pendiente, la construcción del invernadero tipo parabólico demanda un buen manejo de las aguas de la lluvia en la parte alta del talud, siendo necesario desviar las aguas de escorrentía para que no ingresen al filtro verde, y colocar en la base de la parábola adyacente a la parte alta del talud, una canaleta de captación y



Figura 38. Estructura del techo del filtro verde elaborada en lata de guadua.

conducción del agua de lluvia, que estaría sobre el suelo o muy cerca de este en construcciones con parábola completa (Figura 40), o levantado del suelo en construcciones con techo semiparabólico (Figura 41). Podría aprovecharse esta agua captada de la lluvia para ser conducida a un tanque y ser utilizada para diferentes usos en la finca, como una buena práctica de un PUEAA.

Si el manejo de las aguas de escorrentía en pendiente, se hace dispendioso desde lo técnico o económico, puede construirse el invernadero a una sola agua en estructura de guadua (Figura 42) o estructura metálica (Figura 43). Investigaciones realizadas en Cenicafé han demostrado que con este tipo de configuraciones también se alcanza el objetivo de cero descargas, aunque sean un poco menos eficientes energéticamente que el diseño de un invernadero tipo parabólico o semiparabólico.

Se recomienda utilizar una cubierta plástica con una vida útil larga, para cubrir el techo y todas las paredes del invernadero. Cubiertas en agrolene calibre 8 o superior (Figura 44) o en tela de polietileno tejida y laminada por ambas caras,



Figura 39. Estructura del techo del filtro verde elaborada en tubería metálica.

de 170 g m⁻² o superior (Figura 45), permiten una mayor vida útil de la cubierta, al igual que un entramado denso, con un buen número de líneas para soportar la cubierta, lo cual evita que se formen depresiones en la misma (Figura 46); el uso de soga pisadora bien templada en la parte exterior de la cubierta evita su vaivén y retarda su deterioro (Figura 47).



Figura 40. Canal de escurrantía en la base del techo parabólico.



Figura 41. Canaleta de captación de agua en la base del techo semiparabólico.



A



B

Figura 42. Invernadero a una agua. **A.** Estructura del techo en lata de guadua. **B.** Aspecto final del invernadero.



A



B

Figura 43. Invernadero a una agua. **A.** Estructura del techo en tubería metálica plana. **B.** Aspecto final del invernadero.



Figura 44. Cubierta del filtro verde en plástico agrolene, calibre 8.



Figura 45. Cubierta del filtro verde en tela de polietileno tejida y laminada por ambas caras.



Figura 46. Entramado de la cubierta denso (con buen número de líneas).



Figura 47. Uso de soga pisadora para evitar el vaivén de la cubierta por la acción del viento.

En caso que se requiera colocar algunas de las columnas que forman parte de la estructura del techo dentro del área de siembra, se sugiere que estas se instalen durante el proceso de llenado de la excavación. Para ello, se recomienda utilizar tramos de 1,0 m de longitud de tubería de PVC-S de 6" a la cual se le fija en el extremo inferior, con soldadura de PVC, un tapón de solo pruebas que descansará sobre el fondo de la excavación (Figura 48), luego se adicionan dentro del tubo 10,0 cm de arena y sobre esta base se ubica la columna, con la longitud requerida, para dar soporte al techo, adicionando arena para rellenar el espacio vacío entre el tubo y la columna (Figura 49). De esta forma se evita el deterioro prematuro de la columna por la alta humedad del suelo del filtro verde.

Para permitir la salida del agua evaporada en el filtro verde debe dejarse una ventana superior de 20 cm de altura, libre del material plástico, en las paredes frontal y posterior del invernadero (Figura 50).

Paso 12. Instalación de tuberías de aireación. Para contribuir a la aireación del suelo del filtro verde y facilitar los procesos de evapotranspiración se recomienda incorporar, en el área de cultivo, tubos de aireación de 1,5 m de largo de PVC-S o PVC-Lluvia de 1½", a una distancia de 1,25 m de cada orilla y separados entre sí cada 3,0 m. Los tubos se entierran 60 cm y sobresalen del suelo 90 cm. Sobre el área del tubo que va enterrada en el suelo se realiza la mayor cantidad posible de perforaciones de 5/16" y se cubre con polisombra para evitar su taponamiento con suelo (Figura 51).

Paso 13. Instalación del tanque de drenados. Aunque el diseño del filtro verde se realiza considerando la evapotranspiración completa



Figura 48. Base en PVC-S, enterrada en el suelo del filtro verde, en cuyo interior se ubica la columna que ayuda a soportar el techo.



Figura 49. Llenado del espacio vacío entre el tubo de PVC-S y la columna de soporte, utilizando arena.



Figura 50. Ventana superior para permitir la salida del vapor de agua.

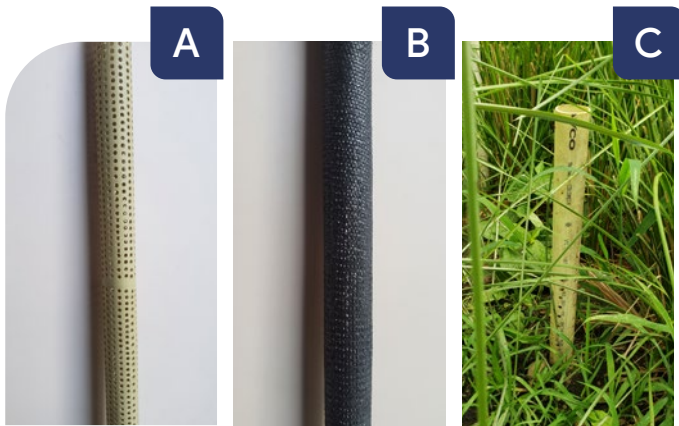


Figura 51. Tubería de aireación. **A.** Perforación de los 60 cm que van enterrados con orificios de 5/16". **B.** Cubrimiento con polisombra del área perforada antes de enterrar la tubería. **C.** Aspecto de la tubería instalada en el área de siembra del filtro verde.

del ARD-T, este proceso varía según la temperatura ambiente de la zona. 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. Por lo anterior, se recomienda instalar un tanque de polietileno

(Figuras 52A y 52B) cuyo volumen sea la mitad del volumen del FAFA, para recibir los drenados provenientes del dispositivo de inundación, por lo que es necesario ubicar el tanque por debajo de la tubería de salida del filtro verde y en la parte alta, realizarle un orificio de 1 ½" e introducir a presión la tubería en PVC-S o la manguera de polietileno que conduce los drenados (Figura 52C).



Figura 52. Disposición del tanque de drenados. **A.** En el filtro verde ubicado en Cenicafé sede Granja. **B.** En el filtro verde ubicado en la Estación Experimental Naranjal. **C.** En el filtro verde ubicado en la Estación Experimental La Catalina.

Una vez lleno el tanque de drenados, el agua recolectada deberá ser llevada mediante bombeo a la unidad de aplicación para ser incorporada nuevamente al área con vegetación del filtro verde, hasta agotamiento total. Se recomienda utilizar una bomba en acero inoxidable de 0,5 HP para realizar esta labor (Figura 53)

Paso 14. Instalación del tanque de aplicación.

La unidad de aplicación consiste en un tanque en polietileno, con un volumen similar al tanque de drenados, que se ubica a la entrada de las líneas de riego, con una cota de desnivel mínima de 50 cm respecto al piso del área cultivada del filtro verde y cuya salida se acopla con tubería de PVC-P de ½" y una llave de paso lisa de PVC-P de ½" a la tubería que alimenta las cuatro líneas de riego (Figura 54).

Paso 15. Construcción de canales de escorrentía. Es necesario evitar el ingreso del agua de lluvia al interior del área cultivada del filtro verde, dado que interfiere con las tasas de evapotranspiración del agua residual. Por lo anterior, deben construirse y mantenerse en funcionamiento canales que permitan la



Figura 53. Bomba en acero inoxidable para el manejo de los drenados del filtro verde.



Figura 54. Disposición del tanque de aplicación.

desviación de las aguas lluvias que puedan ingresar al interior del filtro verde (Figura 55).

Paso 16. Manejo de subproductos. El principal subproducto que se genera durante el proceso de evapotranspiración del ARD-T en el invernadero, es el pasto vetiver que se poda, con el fin de darle mantenimiento al cultivo y las hojas secas del mismo que se retiran de la macolla (planta madre) con el fin de facilitar la aireación del cultivo y las tasas de evapotranspiración (Figura 56).

Rodríguez et al. (2022a) reportan que el análisis foliar de las hojas del pasto vetiver en filtros verdes operados con agua con baja carga orgánica (Tabla 12), mostró una composición química similar, en macro y micronutrientes, al que tiene la pulpa de café fresca, por lo que el material cosechado de los filtros verdes puede ser acondicionado a un tamaño de partícula similar al de la pulpa (aproximadamente 2,0 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 (72% 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. Los filtros verdes sembrados con pasto vetiver y con aplicaciones de agua con baja carga orgánica presentaron tasas de crecimiento anual promedio de 31,99 t ha⁻¹ de materia fresca y 9,37 t ha⁻¹ de materia seca.



Figura 55. Aspecto de las canales de escorrentía.



Figura 56. Pasto vetiver seco generado durante el proceso de poda y mantenimiento del área de cultivo del filtro verde.

TABLA 12. Resultados del análisis foliar de la biomasa de pasto vetiver cosechado.

PARÁMETRO											
Cenizas	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	
(%)						mg kg ⁻¹					
10,05	1,37	0,20	1,91	0,41	0,21	171	83	22	8	9	

Paso 17. Mantenimiento de los filtros verdes.

Las actividades de mantenimiento del filtro verde con cero descargas para las ARD-T están relacionadas con la poda periódica del material vegetal, la limpieza de la tubería de riego, la construcción de canales de escorrentía para el manejo de las aguas de lluvia, la limpieza de la

cubierta plástica y la reparación ocasional del material impermeabilizante.

Poda periódica del material vegetal. Se recomienda realizar un corte periódico al pasto vetiver (bimestral o trimestral), el cual debe hacerse a 50 cm del nivel del suelo (Figura 57). 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, favorecer su circulación en el perfil del suelo a través de los tubos de aireación instalados y facilitar la salida del vapor de agua por los procesos de evaporación que se originan en la superficie del suelo.

Limpieza de la tubería de aplicación del agua residual. Con el tiempo de operación se presenta acumulación de material sólido en el interior y exterior de la tubería de riego, taponando sus orificios, siendo necesario realizar un mantenimiento periódico (bimestral o trimestral) o antes, en caso de que el taponamiento se

presente. El mantenimiento de la tubería de riego consiste en utilizar un alambre con un calibre un poco menor a 3/32", que se introduce por las diferentes perforaciones, retirando el material adherido a las mismas. Paso seguido, se aplica agua limpia a presión en los diferentes ramales de la tubería, utilizando una manguera, con el fin de realizar la evacuación del material sólido acumulado en el interior de la tubería y con una esponja de fibra sintética se elimina el material adherido a la parte externa de los tubos de riego (Figura 58).

Limpieza y reparación de la cubierta plástica. Tanto por higiene como por la apariencia del filtro verde y con el fin de mantener el proceso fotosintético del pasto vetiver que se afecta con la sombra, disminuyendo su crecimiento, 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 59).



Figura 57. Poda periódica del pasto vetiver.



A



B



C

Figura 58. Mantenimiento tubería de riego. **A.** Limpieza de los orificios con la ayuda de un alambre. **B.** Limpieza interna de la tubería utilizando agua a presión. **C.** Repase del destaponamiento de los orificios, una vez limpia la tubería.



Figura 59. Limpieza de la cobertura plástica para mantener la luminosidad en el interior del filtro verde.

Con el tiempo, por efecto de la caída de ramas y frutos de árboles cercanos sobre la cubierta plástica o por contacto del plástico con los soportes del techo se presentan rasgaduras (Figura 60). Para reparar grietas pequeñas se puede utilizar cinta de invernadero, o un tramo de plástico para cubrir grietas mayores, el cual se pega utilizando cinta de invernadero. De esta forma se alarga la vida útil de la cubierta, al reparar el daño oportunamente, y se evita la disposición temprana del material plástico, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

La falta de un buen entramado en la estructura del techo (dejando distancias significativas entre soportes mayores a 50 cm), facilita el daño de la cubierta, la cual se descuelga por el peso del agua y la falta de soportes (Figura 61). Para evitar este daño, se recomienda utilizar un entramado más junto (distancias entre soportes no mayores a 20 cm) y la utilización de sogas pisadoras en la parte interna y externa de la cubierta para darle mayor soporte al plástico, y evitar el vaivén del mismo por la acción del viento y la fatiga del material.

Reparación del material impermeabilizante.

En caso de presentarse rupturas o cortes en la geomembrana, es necesario realizar su reparación para evitar la infiltración al suelo de las ARD-T. A continuación, se detalla el procedimiento a seguir para su reparación.

Se corta un pedazo de geomembrana (de las mismas características del material que se desea reparar) y que sea suficiente para cubrir el área dañada. Luego, se lijan tanto el área de la geomembrana con el daño y el pedazo que se va a incorporar, utilizando papel de lija 180 (Figura 62A), y luego, se limpian con un paño seco y limpio. A continuación, se aplica suficiente silicona derretida (utilizando una pistola para silicona) o silicona en barra (que se derrite utilizando una pistola de aire caliente) (Figura 62B), sobre el área que presenta el corte o la ruptura y el pedazo a incorporar, se unen y se aplica calor sobre las dos superficies (con una pistola de aire caliente), hasta que se observe que están blandas (Figura 62C). Posteriormente, se utiliza un rodillo de metal para ejercer presión sobre las dos superficies calientes y en contacto (hasta que alcancen la temperatura ambiente) (Figura 62D), para lograr su adherencia (Figura 62E).



Figura 60. Rasgado en la cubierta plástica.



Figura 61. Plástico descollado por el peso del agua de lluvia, por la falta de un entramado apropiado.



A



B



C



D



E

Figura 62. Reparación daños en la geomembrana. **A.** Lijada y limpieza de un pedazo de geomembrana para reparación de cortes. **B.** Aspecto de la silicona aplicada sobre el daño presente en la geomembrana. **C.** Aplicación de calor sobre las superficies en reparación. **D.** Aplicación de calor y presión con rodillo metálico para permitir adherencia de las dos superficies. **E.** Aspecto de la geomembrana reparada.

Implementaciones en el campo

En las Estaciones Experimentales de Cenicafé: San Antonio (Florida Blanca, Santander), El Rosario (Venecia, Antioquia), La Catalina (Pereira, Risaralda), La Trinidad (Libano, Tolima) y Granja (Manizales, Caldas) se instalaron sistemas de manejo y tratamiento de las ARD, incorporando filtros verdes con cero descargas (Figura 63).

En la Tabla 13 se presentan los resultados de la configuración del sistema de tratamiento con cero descargas para un número de personas permanentes y temporales en las estaciones, con y sin aplicación de un PUEAA.

Para el cálculo de los caudales de ARD generados, sin la aplicación de un PUEAA,

se consideraron los valores de contribución de las personas permanentes y temporales presentados en el título E del RAS-2000 (Tabla 14). Para el cálculo de los caudales de ARD generados, con la aplicación de un PUEAA, se consideraron los valores de dotación por habitante, según el nivel de complejidad del sistema presentados en el título B del RAS-2010 (Tablas 15 y 16) y un coeficiente de retorno del 85%, es decir, que de la dotación neta el 85% se convierte en agua residual (Rodríguez et al., 2022b).



Figura 63. Filtros verdes con cero descargas para ARD-T. **A.** Estación Experimental El Rosario (Venecia, Antioquia). **B.** Estación Experimental La Trinidad (Libano, Tolima). **C.** Estación Experimental San Antonio (Floridablanca, Santander). **D.** Estación Experimental La Catalina (Pereira, Risaralda). **E.** Granja (Manizales, Caldas).

TABLA 13. Configuración de un sistema de manejo y tratamiento de las ARD con cero descargas en las estaciones experimentales de Cenicafé.

PARÁMETROS	ESTACIÓN EXPERIMENTAL				
	SAN ANTONIO	EL ROSARIO	LA CATALINA	LA TRINIDAD	GRANJA
Número de contribuyentes (sin adopción de un PUEAA) Personas permanentes contribuyen con 130 L d ⁻¹ Personas frecuentes contribuyen con 70 L d ⁻¹					
Personas permanentes	3	3	3	3	2
Personas temporales	10	13	18	30	21
Total	13	16	21	33	23
Caudal (L d ⁻¹)	1.090	1.300	1.650	2.490	1.730
Número de contribuyentes (Con adopción de un PUEAA). Personas permanentes contribuyen con 76,5 L d ⁻¹ Personas frecuentes contribuyen con 41,5 L d ⁻¹					
Personas permanentes	3	3	3	3	2
Personas temporales	21	26	34	54	38
Total	24	29	37	57	40
Caudal (L d ⁻¹)	1.101	1.309	1.641	2.471	1.730
Unidades y dimensiones sugeridas del sistema (considerando un solo tanque, tipo comercial, por unidad)					
Trampa de grasa (L)	250	250	250	250	250
Tanque Séptico (m ³)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
FAFA (m ³)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Lecho de secado de lodos (m ²)	Entre 2,0 y 4,0	Entre 3,0 y 5,0	Entre 4,0 y 6,0	Entre 6,0 y 9,0	Entre 4,0 y 7,0
Filtro verde (m ²)	50	60	75	112,5	80

La demanda de agua o dotación por habitante es la cantidad de agua que necesita una persona diariamente para cumplir con las funciones físicas y biológicas de su cuerpo. Esta necesidad de agua puede variar de 25 L p-d⁻¹ como mínimo, hasta 80 L p-d⁻¹. Las prioridades para el uso doméstico las establece la familia, considerando en primer lugar la alimentación; luego, la higiene personal, la limpieza de los bienes, útiles y objetos personales y del hogar, entre otros. El suministro debe ser continuo y el aprovechamiento racional y eficiente (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2013).

En el Título J del RAS 2010 se presentan los valores condensados en la Tabla 17, con el propósito de tener una base sobre los patrones de consumo, en ella se contemplan los volúmenes unitarios mínimos y típicos en una vivienda campesina en clima frío, con un aparato sanitario de flujo y descarga, una ducha, un lavamanos, un lavaplatos y una alberca para lavar la ropa. De acuerdo con la Encuesta de Calidad de Vida del 2022 (DANE, 2023), el tamaño promedio de los hogares del país sigue disminuyendo y llegó a 2,95 personas por hogar en 2022. En la zona urbana se redujo a 2,92 y en la rural a 3,08 personas por hogar.

TABLA 14. Contribución de aguas residuales para ocupantes permanentes y temporales. Fuente: Título E, RAS - 2000.

TIPO OCUPANTES	PREDIO	UNIDAD	C (L hab-d ⁻¹)
Ocupantes permanentes	Clase alta	persona	160
	Clase media	persona	130
	Clase baja	persona	100
	Hotel (excepto lavandería y cocina)	persona	100
	Alojamiento provisional	persona	80
Ocupantes temporales	Fábrica en general	persona	70
	Oficinas temporales	persona	50
	Edificios públicos o comerciales	persona	50
	Escuelas	persona	50
	Bares	persona	6
	Restaurantes	comida	25
	Cines, teatros o locales de corta permanencia	local	2
	Baños públicos	tasa sanitaria	480

TABLA 15. Dotación por habitante según el nivel de complejidad del sistema. Fuente: Título B, RAS - 2010.

Nivel de complejidad* del sistema	Dotación neta (L hab-d ⁻¹) Clima templado y frío	Dotación neta (L hab-d ⁻¹) Clima cálido**
Bajo	90	100
Medio	115	125
Medio alto	125	135
Alto	140	150

TABLA 16. Nivel de complejidad del sistema. Fuente: MA (2002).

Nivel de complejidad del sistema	Población zona urbana (habitantes)	Capacidad económica de los usuarios
Bajo	< 2.500	Baja
Medio	2.501 a 12.500	Baja
Medio alto	12.501 a 60.000	Media
Alto	> 60.000	Alta

(*) El nivel de complejidad del sistema se define con base en la población y su capacidad económica (ver Tabla 16).

(**) Se considera como clima cálido aquella zona del territorio nacional que se encuentre por debajo de los 1.000 m de altitud.

TABLA 17. Consumos mínimo y típico de agua en el hogar (L p-d⁻¹). Fuente: Título J, RAS, 2010.

Uso	Consumo mínimo (L/persona por día)	Consumo típico (L/persona por día)
Lavado de ropa	12	25
Aseo personal	10	70
Descarga sanitaria	6	18
Cocina	12	25
Otros usos como lavado de pisos, riego de huerta casera y bebedero de animales domésticos	5	12
Total	45	150

Diseños recomendados de sistemas sépticos con filtro verde de cero descargas

En la Tabla 18 se presentan algunas configuraciones de sistemas sépticos con filtros verdes de cero descarga, que pueden instalarse con tanques de polietileno comerciales, en fincas cafeteras y el número de personas a las que cubriría la solución, con y sin la adopción de un PUEAA, diseñados con base en las directrices del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS.

Tal como se aprecia en los valores condensados en la Tabla 18, cuando las ARD-T se disponen en el suelo, es necesario, por norma, disponer de un área para la construcción de un campo de infiltración. El área del filtro verde para lograr cero descargas y eliminar los costos legales ambientales, demandan, respecto a los campos de infiltración, un 23% de área adicional en la configuración 1, un 19% adicional en la configuración 2 y un 49% de área adicional en la configuración 3, cuando se utiliza un PUEAA, por

lo que se consideran una tecnología apropiada desde lo técnico, lo ambiental y lo económico para el manejo, tratamiento y disposición de las ARD-T.

Recomendaciones para el buen desempeño de los sistemas de tratamiento de ARD-T con cero descargas

Con el fin de mantener la eficiencia del sistema de tratamiento de las ARD, evite verter, en el sistema séptico, sustancias químicas caseras como gasolina, aceite, pesticidas, pintura, acetona, disolventes y alcohol, entre otros, ya que pueden destruir el tratamiento biológico del sistema y contaminar el suelo y las fuentes hídricas superficiales y subterráneas.

El sistema séptico no es un bote de basura, por lo tanto, no tire hilo dental, productos de aseo femeninos, condones, pañales, hisopos, colillas de cigarrillo, borra de café, toallas de papel, arena de gato, pinturas, sustancias químicas peligrosas y otros artículos de la cocina y baño que puedan atascar, y potencialmente dañar, los componentes del sistema séptico. No use destapadores de drenajes cáusticos para un desagüe tapado. En su lugar, use un tubo flexible para destapar tuberías (Office of Water Program Operations, 2005).

En la Tabla 19 se resumen las actividades de mantenimiento que deben realizarse a las diferentes unidades del sistema de manejo y tratamiento de las ARD con cero descargas para mantener su eficiencia en la eliminación de la contaminación de las aguas residuales de la vivienda y evitar que se presenten malos olores.

TABLA 18.

Algunas configuraciones de sistemas sépticos que se pueden instalar con tanques de polietileno comerciales y número de personas a las que cubriría la solución ⁽¹⁾.

UNIDAD DEL SISTEMA	CONFIGURACIÓN 1	CONFIGURACIÓN 2	CONFIGURACIÓN 3
Trampa de grasa (L)	250	250	250
Tanque Séptico (m ³)	2,0	3,0	5,0
FABA (m ³)	2,0	3,0	5,0
Lecho de secado de lodos (m ²) ⁽²⁾	1 a 2	3 a 5	6 a 10
Máximo número de personas en la vivienda. Sin la aplicación de un PUEAA	3 permanentes y 5 temporales. 4 permanentes y 3 temporales. 5 permanentes y 1 temporales.	3 permanentes y 17 temporales. 4 permanentes y 15 temporales. 5 permanentes y 11 temporales.	3 permanentes y 32 temporales. 6 permanentes y 26 temporales. 12 permanentes y 15 temporales.
Máximo número de personas en la vivienda. Con la aplicación de un PUEAA	3 permanentes y 10 temporales. 4 permanentes y 7 temporales. 5 permanentes y 5 temporales.	3 permanentes y 26 temporales. 4 permanentes y 23 temporales. 5 permanentes y 21 temporales.	3 permanentes y 58 temporales. 6 permanentes y 52 temporales. 12 permanentes y 41 temporales.
Área necesaria para la disposición final del vertimiento al suelo (genera costos legales ambientales)			
Campos de infiltración (m ²) ⁽³⁾	22	48	80
Área necesaria para la evapotranspiración del agua tratada (Cero descargas) (No genera costos legales ambientales)			
Filtro verde (m ²) ⁽⁴⁾	34 - 27	72 - 57	120 - 119

① En el libro “*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>, se presenta la metodología detallada para el cálculo de los volúmenes y de las áreas de los diferentes componentes del sistema séptico con ejemplos prácticos.

② Para el caso del área requerida del lecho de secado de lodos, el primer valor del rango numérico, es el área requerida para cuando no se aplica un PUEAA y el segundo valor del rango numérico, es el área requerida para cuando se aplica un PUEAA, pues para el primer valor, el número de personas que puede atender el sistema de tratamiento es mucho menor por los altos volúmenes de agua consumido, lo que se traduce en una menor cantidad de sólidos (excretas) generados dado que provienen de un menor número de personas. Cuando se tienen áreas de secado de lodos inferiores a 2 m², el lecho de secado de lodos puede construirse en un tanque plástico de polietileno bajito, dado que se consiguen comercialmente hasta con 2 m² de área.

③ La normativa colombiana (Decreto 50 del 2018) establece que cuando se dispongan las ARD-T al suelo, es necesario construir un campo de infiltración y, por lo tanto, deben presentarse a la Autoridad Ambiental los resultados de pruebas de infiltración, sistema de disposición de los vertimientos, área de disposición de los vertimientos y plan de cierre y abandono del área de disposición del vertimiento. El área necesaria se calculó considerando una tasa de aplicación de 0,033 m³ m⁻²-d⁻¹, correspondiente a una permeabilidad del suelo entre rápida a media.

④ Para el caso del área requerida del filtro verde, el primer valor del rango numérico, es el área requerida para cuando no se aplica un PUEAA y el segundo valor del rango numérico, es el área requerida para cuando se aplica un PUEAA, pues en el primer valor, el volumen de agua residual generado es mayor dado al alto volumen de agua consumido y, por lo tanto, el área necesaria para su evapotranspiración también es mayor.

TABLA 19. Actividades de mantenimiento para las diferentes unidades del sistema séptico con filtro verde con cero descargas, para el manejo y tratamiento de las ARD de las viviendas.

ACTIVIDAD	OBSERVACIONES
<p>Mantenimiento y limpieza de la trampa de grasa</p>	<p>La trampa de grasas debe operarse y limpiarse regularmente para prevenir el escape de cantidades apreciables de grasa y la generación de malos olores. La frecuencia de limpieza debe determinarse con base en la observación. Generalmente, la limpieza debe hacerse cada vez que se alcance el 75% de la capacidad de retención de grasa como mínimo (Título J, RAS - 2010). Se recomienda que la frecuencia de mantenimiento no sea mayor a tres meses, aplicando el siguiente protocolo:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Retire el material extraño que esté junto o sobre la trampa de grasa y que dificulte su inspección y mantenimiento. -Si la tapa de la trampa de grasas está deteriorada o alguno de sus accesorios internos, realice el cambio por uno nuevo. -La trampa de grasas debe conservar una cubierta hermética para prevenir olores molestos y para excluir insectos y roedores. -Durante el mantenimiento, retire, con la ayuda de un utensilio y un recipiente, el material flotante de la trampa de grasas y el material sedimentado (lodos), utilizando elementos de bioseguridad (guantes, tapabocas, gafas). -Realice la mezcla de las natas y lodos con cal apagada (relación 1 a 1) y disponga la mezcla en los procesadores de pulpa de café, para su compostaje o en los lechos de secado construidos para el manejo de los lodos provenientes del tanque séptico.
<p>Mantenimiento y limpieza del tanque séptico</p>	<p>Se recomienda inspeccionar el tanque séptico semestralmente para verificar que no se presente goteo o daño en las tuberías de acceso y de descarga de esta unidad y para retirar el material extraño que esté junto o sobre el tanque séptico y que dificulte su inspección y mantenimiento. Si la tubería de salida del agua del tanque séptico está sumergida en el agua es porque el FAFA está taponado y requiere mantenimiento. Anualmente deben retirarse las natas (material flotante) y el lodo en exceso acumulado en el tanque séptico. Para el caso de las natas realice el mismo procedimiento descrito para la trampa de grasa, utilizando elementos de bioseguridad, mezclando las natas con cal apagada (1 a 1) y llevando el material final al procesador de pulpa o al lecho de secado de lodos. Anualmente deben retirarse los lodos en exceso, a través del dispositivo de sifón invertido, instalado en el tanque y llevar el material extraído a los lechos de secado de lodos.</p>
<p>Mantenimiento y limpieza del lecho de secado de lodos</p>	<p>Se recomienda inspeccionar semestralmente los lechos de secado de lodos, para retirar el material extraño que esté junto o sobre ellos, que dificulte su inspección y mantenimiento. La vegetación invasora debe eliminarse de forma manual o mecánica, sin el uso de herbicidas. Para los lechos con cubierta debe verificarse el buen estado del techo y en caso de encontrarse algún daño o deterioro debe repararse para mantenerlo en óptimas condiciones. De igual manera, debe inspeccionarse el estado del material impermeable y de los accesorios que forman parte de los lechos y realizar las reparaciones o cambios por otros nuevos, cuando sea necesario. La superficie del lecho debe mantenerse limpia y libre de todos los lodos que se hayan descargado anteriormente. Nunca deben descargarse los lodos sobre otros ya secos o parcialmente secos. Después de retirar los lodos, el lecho debe prepararse para la siguiente carga.</p>

CONTINÚA

CONTINUACIÓN DE LA TABLA 19

ACTIVIDAD	OBSERVACIONES
<p>Mantenimiento y limpieza del filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA)</p>	<p>Se recomienda inspeccionar el FAFA semestralmente para verificar que no se presente goteo o daño en las tuberías de acceso y de descarga de esta unidad y para retirar el material extraño que esté junto o sobre el FAFA y que dificulte su inspección y mantenimiento. Anualmente o antes, si se requiere, retire la biocapa adherida al medio de empaque. Para ello, introduzca una barra metálica hasta el 90% de la profundidad del tanque y realice movimientos circulares que permitan mover el empaque y desprender la biocapa de bacterias adheridas y lograr que flote. Introduzca por la tubería de entrada del FAFA, una manguera con agua a presión hasta el fondo del tanque, para realizar un flujo ascendente de agua limpia a través del tanque. Retire la biocapa desprendida utilizando elementos de bioseguridad y dispóngala en el procesador de pulpa o en el lecho de secado de lodos.</p>
<p>Mantenimiento y limpieza del filtro verde</p>	<p>Se recomienda realizar un corte periódico al pasto vetiver (bimensual o trimestral) a 50 cm del nivel del suelo con el objetivo de controlar su crecimiento, mejorar la apariencia, retirar las hojas secas, incrementar el flujo de aire al interior del cultivo, favorecer su circulación en el perfil del suelo a través de los tubos de aireación instalados y facilitar la salida del vapor de agua.</p> <p>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 o cuando se presenten obstrucciones, utilizando 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. 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 con el fin de realizar la evacuación del material sólido acumulado en el interior de la tubería. Tanto por higiene como por la apariencia del filtro verde y con el propósito de mantener el proceso fotosintético del pasto vetiver que se afecta con la sombra, es necesario mantener limpia la cubierta plástica del filtro verde.</p>

Si su sistema séptico con cero descargas está bien diseñado, construido, y con un mantenimiento correcto, podría proveer el manejo, tratamiento y evaporación efectiva a las aguas residuales de la vivienda a un largo plazo (alta vida útil para el sistema). Si su sistema no recibe el mantenimiento correcto, tendría que reemplazarse, lo cual le podría generar un gasto económico importante. Un sistema que está funcionando mal podría contaminar el suelo, las aguas subterráneas y las aguas superficiales, las cuales, en muchos casos, son la fuente de abastecimiento para otras viviendas de la vereda.

Los sistemas sépticos diseñados conforme a los lineamientos del RAS, bien operados, de forma que a los mismos sólo ingresen aguas residuales provenientes de la vivienda, con mantenimiento periódico, con eliminación anual de los lodos generados en el tanque séptico y con un filtro verde con cero descargas, evitan la generación de vertidos, con lo cual se protegen los recursos agua, suelo, biodiversidad, a la vez que se eliminan los costos legales asociados a la generación de vertidos, tal como se evidencia en los resultados presentados en esta publicación.

Consideraciones finales

El nivel de cobertura de saneamiento básico en las zonas rurales cafeteras no alcanza el 15%, por lo que la mayoría de las aguas residuales generadas en las fincas cafeteras son descargadas sin algún tipo de tratamiento, al suelo o a los cuerpos de agua superficiales, generando un impacto negativo sobre los recursos naturales y alterando la calidad físico-química y microbiológica del suelo y del agua. El mal manejo en la disposición de las aguas residuales puede generar problemas de erosión del suelo y disminuir su vocación agrícola, y alterar la calidad del agua superficial y subterránea, limitando su disponibilidad para sus diferentes usos (doméstico, agrícola, pecuario, recreativo, industrial, entre otros).

Por la dispersión de las personas en las zonas rurales no es económicamente viable instalar sistemas convencionales de saneamiento básico, como sí ocurre en las zonas urbanas, en las cuales pueden instalarse sistemas de alcantarillado que permiten la conducción, recolección y tratamiento a las aguas residuales generadas. Por lo anterior, deben buscarse soluciones particulares, adaptadas para las zonas

rurales, que permitan el manejo y tratamiento en el sitio de las aguas residuales generadas.

Entre las diferentes corrientes de aguas residuales generadas en las fincas, una de las que más genera un impacto negativo en el medio ambiente son las producidas en las viviendas, las cuales se conocen como aguas residuales domésticas (ARD). Para una finca cafetera promedio, la contaminación orgánica generada por las aguas residuales de la vivienda representa casi las 2/3 partes de las generadas por las aguas residuales del beneficio de café, cuando ambas no son tratadas. Las ARD se caracterizan no sólo por su carga orgánica (que impacta negativamente los recursos naturales), sino también porque se generan todos los días y tienen bacterias patógenas que pueden afectar la salud de las personas, cuando estas llegan a cuerpos de agua que se utilizan para el abastecimiento de la vivienda o para la recreación.

Una solución que ha demostrado ser eficiente en el manejo y tratamiento de las aguas residuales de las viviendas son los sistemas

sépticos, en los cuales se realiza un tratamiento físico y biológico, permitiendo generar un agua tratada con unas características de calidad que permiten ser amortiguadas por el suelo o por las fuentes naturales de agua, que prestan un servicio ambiental evitando el deterioro de los recursos naturales. El sistema séptico debe constar de una trampa de grasas para eliminar aceites, detergentes y grasas provenientes de las actividades de la vivienda y que se transfieren al agua residual, de un tanque séptico para realizar el tratamiento al material proveniente de las unidades sanitarias, de un filtro anaeróbico de flujo ascendente que permite que se alcance un mayor grado de depuración a las aguas residuales y de un lecho de secado de lodos para el manejo y tratamiento del material que se acumula en las diferentes unidades del sistema.

Para que un sistema séptico funcione adecuadamente, es necesario que esté bien diseñado y que se le realice un buen mantenimiento. A través del Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) expedido por el Gobierno de Colombia, se presentan las bases para realizar el dimensionamiento apropiado del sistema séptico de forma que se alcancen los niveles de depuración requeridos y que la contaminación residual pueda ser asimilada por los recursos suelo y agua sin alterar la calidad de los mismos.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (MADS) ha expedido la Resolución 631 del 2015 en la cual se establecen los parámetros y valores de calidad que deben cumplir las ARD tratadas si son vertidas a cuerpos de aguas superficiales. En caso de que las ARD tratadas sean vertidas al suelo, el MADS

ha expedido la Resolución 0699 del 2021 fijando los parámetros y valores de calidad que deben cumplirse.

Aunque los sistemas sépticos bien diseñados y con el mantenimiento periódico apropiado permiten dar cumplimiento a los parámetros de calidad establecidos en las resoluciones expedidas por el Ministerio para su descarga al suelo o a cuerpos de agua superficiales, el hecho de realizar un vertido obliga al generador del mismo a solicitar un permiso de vertimientos ante la autoridad ambiental, en el cual se establece el requerimiento de una caracterización periódica al vertido en la cual se evidencie el cumplimiento de los requisitos legales y que debe ser realizada por un laboratorio acreditado, lo cual incorpora un costo legal ambiental que debe ser cubierto por el generador del vertido.

Los filtros verdes con cero descargas, son un sistema de manejo y tratamiento para las aguas residuales tratadas (domésticas, agrícolas y pecuarias) que permiten su evapotranspiración en un invernadero cuyo suelo está impermeabilizado (para evitar su infiltración). La utilización de un cultivo herbáceo con una alta tasa evapotranspirativa (como el pasto vetiver) permite que toda el agua residual que ingrese al filtro pueda ser evapotranspirada evitando su vertido y, por lo tanto, eliminando la necesidad de solicitar el permiso de vertimientos y los costos legales ambientales asociados al mismo.

Adicionalmente, la incorporación de los filtros verdes con cero descargas a los sistemas sépticos, no sólo permite aumentar la cobertura de saneamiento básico en la ruralidad cafetera, con soluciones particulares apropiadas y

efectivas, sino que también contribuye, al no presentarse vertidos, a mejorar la calidad de los recursos del suelo y de las fuentes hídricas en la zona cafetera colombiana.

A través de los resultados obtenidos en las investigaciones realizadas en Cenicafé, evaluando la tecnología de filtros verdes para el manejo y tratamiento de las aguas residuales domésticas, condensados en la presente publicación, puede concluirse que es una tecnología apropiada para ser implementada en las fincas cafeteras con el objetivo de alcanzar cero descargas.

El diseño apropiado del sistema séptico (siguiendo las recomendaciones del RAS) y del filtro verde (siguiendo los lineamientos presentados en la publicación), aunado a la implementación de un Programa de Uso Eficiente y Ahorro de Agua (PUEAA) y a un mantenimiento periódico de cada una de las unidades del sistema (como se detalla en la publicación), permite la implementación de sistemas técnica y económicamente apropiados para las ARD, alcanzando el objetivo de cero descargas y eliminando costos legales ambientales, contribuyendo a la rentabilidad de la caficultura.

Glosario

(Título B, RAS) (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2010; Rodríguez et al., 2022a; Rodríguez et al., 2022b).

Agua cruda. Es el agua natural, superficial o subterránea, que no ha sido sometida a procesos de tratamiento para su potabilización.

Agua potable o agua para consumo humano. Es aquella que cumple características físicas, químicas y microbiológicas, que la hacen apta para consumo humano. Se utiliza en bebida directa, en la preparación de alimentos o en la higiene personal, y no produce efectos adversos en la salud humana.

Agua para uso doméstico. Es aquella que reúne requisitos de calidad que la hacen apta para diferentes usos en el hogar.

Agua para usos productivos en el campo. Es el agua cruda o residual doméstica tratada, que reúne características físicas, químicas y microbiológicas, para ser utilizada en actividades agrícolas y/o pecuarias, de acuerdo a los estándares de calidad del Decreto 1594 de 1984 y Decreto Único 1076 del 2015.

Aguas grises. Son los desechos líquidos generados en el lavamanos, la ducha, el lavaplatos y el lavadero de la vivienda. Son llamadas también aguas jabonosas y, por principio, contienen muy pocos microorganismos patógenos.

Aguas residuales domésticas. Desechos líquidos provenientes de la actividad doméstica en viviendas. Contienen excretas, agua de lavado de cocina, entre otras. Son la combinación de aguas grises y aguas con excretas.

Alcantarillado sanitario. Sistema compuesto por todas las instalaciones destinadas a la recolección, transporte y tratamiento de las aguas residuales domésticas.

Cámara de inspección. Estructura de ladrillo o concreto, de forma usualmente cilíndrica, que remata generalmente en su parte superior en forma tronco-cónica, y con tapa removible para permitir la ventilación, el acceso y el mantenimiento de los colectores.

Carga contaminante. Es el producto de la concentración másica promedio de una sustancia por el caudal volumétrico promedio del líquido que la contiene determinado en el mismo sitio; en un vertimiento se expresa en kilogramos por día.

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 t ha-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.

Cuerpo de agua. Sistema de origen natural o artificial, localizado sobre la superficie terrestre, conformado por elementos físicos-bióticos y masas o volúmenes de agua, contenidas o en movimiento.

Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅).

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 DBO₅ 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 10,0 cm y 20,0 cm de alto) con una pequeña cantidad de raíces (no más de 5,0 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.

Filtración. Proceso mediante el cual se remueven las partículas suspendidas y coloidales del agua, al hacerlas pasar a través de un medio poroso.

Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA).

Consiste en un tanque de polietileno o construido en ladrillo y mampostería, empacado con material filtrante, en el cual se realiza la depuración de las aguas residuales provenientes del tanque séptico, las cuales ingresan por el fondo del tanque y ascienden a través del medio filtrante.

Fuente de abastecimiento. Depósito o curso de agua superficial o subterránea utilizada por la población ya sea proveniente de aguas atmosféricas, superficiales, subterráneas o marinas para atender sus necesidades de agua.

Inodoro. Aparato sanitario utilizado para recoger y evacuar los excrementos humanos y animales hacia la instalación de saneamiento y que mediante un cierre de sifón de agua limpia impide la salida de los olores del desagüe hacia los espacios habitados.

Lodos. Subproductos sólidos que resultan del tratamiento de las aguas residuales domésticas.

Mampostería. Sistema constructivo realizado con ladrillos o piedras, adheridos o unidos a base de mortero de cemento.

Mantenimiento. Conjunto de acciones que se ejecutan en las estructuras, instalaciones y/o equipos para prevenir daños o para la reparación de los mismos cuando se producen.

Nata. Sustancia espesa que se forma sobre el agua almacenada en el tanque séptico, compuesto por residuos grasos y otro tipo de desechos orgánicos e inorgánicos flotantes.

Nivel freático. Profundidad de la superficie de un acuífero libre con respecto a la superficie del terreno.

Norma de vertimiento. Conjunto de parámetros y valores que debe cumplir el vertimiento en el momento de la descarga.

Operación. Conjunto de acciones para mantener en funcionamiento un sistema.

Parámetro. Variable que, en una familia de elementos, sirve para identificar cada uno de ellos mediante su valor numérico.

Patógenos. Microorganismos que pueden causar enfermedades en el ser humano.

Pretratamiento. Procesos que acondicionan las aguas residuales o el agua cruda proveniente de una fuente superficial o subterránea para su tratamiento posterior.

Punto de descarga. Sitio o lugar donde se realiza un vertimiento al cuerpo de agua, al alcantarillado o al suelo.

Sedimentación simple. Proceso en el cual los sólidos suspendidos en el agua se decantan por gravedad.

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.

Sólidos sedimentables. Fracción del total de sólidos en el agua que se separan de la misma por acción de la gravedad, durante un período determinado.

Soluciones individuales de saneamiento. Sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales implementados en el sitio de origen.

Tanque séptico (o pozo séptico). Sistema individual de tratamiento de aguas residuales domésticas para una vivienda o conjunto de viviendas, que combina la sedimentación y la digestión anaerobia de los lodos.

Trampa de grasa. Recipiente que tiene como propósito separar físicamente la grasa de las aguas residuales de la cocina, la ducha y el lavadero.

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.

Vertimiento. Descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido.

Vertimiento puntual. El que se realiza a partir de un medio de conducción, del cual puede precisarse el punto exacto de descarga al cuerpo de agua, al alcantarillado o al suelo.

Vertimiento no puntual. Aquel en el cual no puede precisarse el punto exacto de descarga al cuerpo de agua o al suelo, tal es caso de vertimientos provenientes de escorrentía, aplicación de agroquímicos u otros similares.

Zanja de infiltración. Excavación larga y angosta realizada en el suelo para acomodar las tuberías de distribución del agua residual decantada en el tanque séptico, y para su siguiente infiltración en el suelo permeable.

Preguntas frecuentes



1. ¿Es necesaria la trampa de grasa en el sistema de pretratamiento del agua?

Respuesta: Sí, es indispensable. Tiene como objetivo separar físicamente la grasa presente en las aguas residuales provenientes de la cocina, la ducha y el lavado de ropa, con el propósito de evitar que las grasas y residuos de jabones y detergentes disminuyan la eficiencia del tratamiento biológico realizado a las ARD en las etapas siguientes del proceso depurativo.

2. ¿Cuál debe ser el tamaño de la trampa de grasas?

Respuesta: Se recomienda un volumen mínimo de 250 L. Se requiere un tanque de polietileno por durabilidad y costo, y que se ubique recibiendo las aguas residuales provenientes de la cocina, el lavadero, el lavamanos y la ducha.

3. ¿El tanque de aplicación debe ir al mismo nivel que el FAFA?

Respuesta: Se recomienda que esté un poco por debajo del nivel del FAFA para facilitar el flujo de agua. La cota de desnivel se requiere esté por encima de los 25,0 cm.

4. ¿Cuál es la profundidad y ancho del área de siembra del filtro verde?

Respuesta: Se recomienda una profundidad de 0,7 m y un ancho de 5,0 m para optimizar el uso de la geomembrana comercial que tiene un ancho de 7,0 m. En caso de que pueda conseguirse un material impermeabilizante con anchos superiores, la profundidad del filtro verde puede ser hasta de 1,0 m y su ancho sujeto a las dimensiones del material utilizado.

5. ¿Puede utilizarse plástico como impermeabilizante, en reemplazo de la geomembrana?

Respuesta: La utilización de plástico presenta el inconveniente de un mayor riesgo (respecto a la geomembrana) al daño mecánico por punzonado y rasgado, lo que ocasionaría, de presentarse, infiltración del agua residual en el suelo, lo cual no está permitido en la normativa nacional relacionada con el manejo de aguas residuales. Se recomienda adquirir un material impermeabilizante garantizado por el fabricante para una vida útil similar a la de los tanques de polietileno. Para la instalación del material 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 descalzo para evitar algún tipo de daño en el material impermeabilizante.

6. ¿Puede construirse un canal de aireación y drenaje con tubería PVC de aguas lluvias?

Respuesta: No es recomendable, dado que su resistencia mecánica es menor que la que tiene la tubería de PVC-S, que es la recomendable por precio y durabilidad. No es necesario que el canal de aireación y drenaje se construya con tubería PVC-P.

7. ¿Qué tipo de gravilla se utiliza para cubrir la tubería de aireación y drenaje?

Respuesta: Puede utilizarse triturado o gravilla de mano (entre 1,5 y 2,5 cm de diámetro).

8. ¿Qué textura debe tener el suelo utilizado para el cultivo de la vegetación del filtro verde?

Respuesta: Se recomiendan los mismos suelos que se utilizan para el cultivo de café (entre franco-arenosos a franco-arcillo-limosos). No utilizar suelos arcillosos o arenosos. Los suelos arcillosos tienen una baja permeabilidad y dificultan el establecimiento del pasto vetiver. Los suelos arenosos, si bien tienen una permeabilidad alta, dificultan el anclaje del pasto vetiver y no le proveen los nutrientes necesarios para permitir su normal desarrollo.

9. ¿Qué tipo de perforaciones debe tener la tubería de aireación y drenaje del filtro verde?

Respuesta: 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 5/16", la otra mitad (que está sin perforaciones) se introduce en el canal central del fondo del filtro verde, ya impermeabilizado con la geomembrana, para conducir los drenados generados hacia el tanque instalado para este fin.

10. ¿Cuántas líneas de riego deben instalarse en el área con vegetación del filtro verde?

Respuesta: Deben instalarse cuatro líneas de riego, levantadas a 25 cm del suelo y con agujeros de 3/32" separados cada 10,0 cm. Las líneas de riego deben estar separadas 0,6 m de los bordes del área cultivada y separadas entre sí, cada 1,6 m (Figura 64).

11. ¿Cuál es el número de aireadores que deben instalarse en el área de siembra del filtro verde?

Respuesta: Para facilitar la aireación del suelo del filtro verde se recomienda instalar, en la tubería de aireación y drenaje, tramos verticales de tubería de 1,5 m, separados cada 3,0 m, para permitir el ingreso del aire desde la parte superior del filtro verde. Para evitar el taponamiento de la tubería de aireación y conducción de drenados se recomienda cubrirla con polisombra y aplicar gravilla, sólo en el ancho del canal central. Adicionalmente, se recomienda incorporar tubos de aireación de 1,5 m (perforando, cubriendo con polisombra y enterrando 60 cm), a una distancia de 1,25 m de cada orilla y separados entre sí cada 3,0 m.

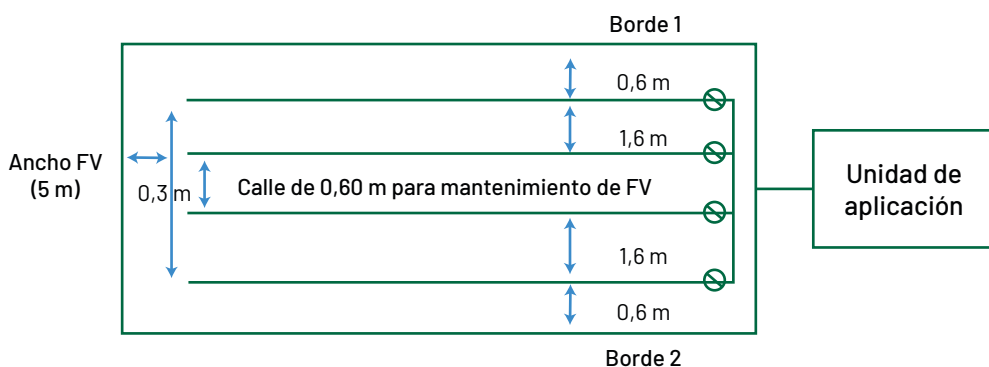
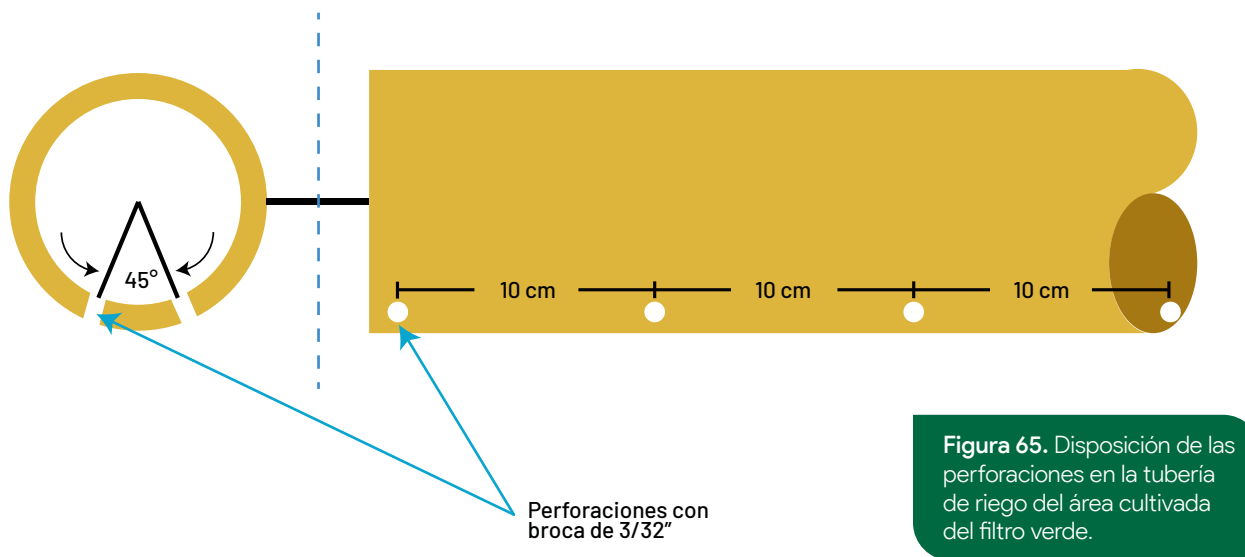


Figura 64. Diagrama de instalación de la tubería de riego en el área cultivada del filtro verde.

12. ¿Qué tipo de perforaciones debe tener la tubería de riego?

Respuesta: La tubería de riego debe estar perforada con agujeros de 3/32" separados cada 10,0 cm (dos líneas en la parte inferior de la circunferencia del tubo, en ángulo de 45° y con un traslape de 5,0 cm entre las dos líneas de perforaciones. Como complemento a las perforaciones de 3/32" en la tubería de riego, se recomienda elaborar canales de riego en la parte superior de la tubería PVC-P de 1/2" de 2,0 cm de ancho y 5,0 cm de largo, espaciados cada 20,0 cm, para cuando se presenten obstrucciones en las perforaciones, por lo que el agua residual aplicada pueda fluir por rebose (Figura 65).



13. ¿Cuál es la altura de la tubería de riego en el área de siembra del filtro verde?

Respuesta: La tubería de riego debe estar levantada 25,0 cm del suelo.

14. ¿Cuál debe ser la altura y el tipo del techo del área sembrado del filtro verde?

Respuesta: Se recomienda utilizar una cubierta plástica con una vida útil larga, para cubrir el techo y todas las paredes del invernadero. Cubiertas en agrolene calibre 8 o superior o en tela de polietileno tejida y laminada por ambas caras de 170 g m⁻² o superior, permiten una mayor vida útil de la cubierta, se hace el cerramiento completo del área sembrada, en plástico, dejando una pestaña libre de 10,0 a 20,0 cm en la parte superior de las paredes para permitir la salida del aire húmedo y caliente presente en el interior del filtro. Se recomienda que la altura del techo esté entre 1,90 m y 2,10 m. Alturas menores dificultan el ingreso del personal para realizar mantenimiento y alturas mayores disminuyen la temperatura media al interior del filtro verde, lo que disminuye las tasas de evapotranspiración.

15. ¿Cuál debe ser el color y el tipo de plástico utilizado como cobertura del área sembrada del filtro verde?

Respuesta: Se recomienda cubiertas en agrolene calibre 8 o superior o en tela de polietileno tejida y laminada por ambas caras de 170 g m⁻² o superior y que sea transparente, dado que la sombra interfiere en el desarrollo del pasto vetiver.

16. ¿Qué tipo de vegetación debe sembrarse en el filtro verde?

Respuesta: El pasto vetiver por su distribución y ambiente, por la gran variedad de suelos en los cuales se desarrolla, por su tolerancia al estrés hídrico por exceso y por defecto, por soportar amplios rangos de pH, temperatura y salinidad, aunado a su alto consumo de agua, es la especie recomendada para ser incorporada en el área de siembra del filtro verde (Tabla 11).

17. ¿Es necesaria la instalación de la unidad de inundación en el filtro verde?

Respuesta: Es fundamental. La unidad de inundación tiene como objetivo mantener inundada el área de siembra de filtro verde, con el fin de favorecer los procesos de evapotranspiración, para ello se utilizan dos llaves de paso PVC-P de 1 ½", 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.

18. ¿Debe forrarse completamente en plástico el área de siembra del filtro verde?

Respuesta: Sí, es necesario para favorecer el incremento de la temperatura al interior del área cultivada del filtro verde y favorecer los procesos de evapotranspiración del agua residual pretratada, dejando una pestaña libre de 10,0 a 20,0 cm en la parte superior de las paredes para permitir la salida del aire húmedo y caliente presente en el interior del área de siembra.

19. ¿Cuál es el mantenimiento básico que debe realizarse a los filtros verdes?

Respuesta: Está relacionado con actividades frecuentes como 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 recibo de drenados, la construcción de canales de escorrentía para el manejo de las aguas lluvias y limpieza de la cubierta plástica.

20. ¿Sólo puede instalarse el filtro verde en un área plana?

Respuesta: No, el filtro verde puede instalarse en área con pendiente. Para este caso es necesario elaborar terrazas que permitan la instalación del área con vegetación que debe realizarse en un terreno plano. El suelo que se retire de la parte alta de la pendiente puede ser utilizado para rellenar una barrera construida con trinchos, en la parte baja de la pendiente, incrementando con ello el área de la superficie plana necesaria para la instalación de la vegetación.

21. ¿En qué puede utilizarse la biomasa cosechada del filtro verde?

Respuesta: El pasto vetiver cosechado puede utilizarse en la alimentación animal, para la extracción de aceites esenciales (con aplicación en perfumería), en la elaboración de artesanías y la producción de abonos verdes, entre otros usos. Su composición foliar es muy similar en macronutrientes al de la pulpa de café, por lo que la biomasa cosechada puede adecuarse a un tamaño de partícula de 2,0 cm y mezclarse con la pulpa de café en los procesadores. Esta mezcla tiene dos ventajas: la primera es que permite incrementar la capacidad de retención de aguas residuales en los procesadores de pulpa y la segunda es que permite incrementar la cantidad de abono orgánico producido en la finca.

22. ¿Puede reusarse el agua de drenado proveniente del filtro verde?

Respuesta: Sí, es posible reusarlo en la producción agrícola, pero para ello es necesario dar cumplimiento a la normativa para el reúso de las aguas tratadas condensada en la Resolución 1256 del 23 de noviembre del 2021 (MADS, 2021b) (que derogó a la Resolución 1207 del 2014), mediante la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones, teniendo como objeto establecer las disposiciones relacionadas con el uso de las aguas residuales y aplica a las autoridades ambientales y a los usuarios de dichas aguas. Se estima que el costo de la caracterización, exigida por la autoridad ambiental supera, en el año 2025, los 3 millones de COP, por lo que, desde lo económico, no se recomienda su reúso y en su lugar se recomienda su recirculación sobre el área sembrada del filtro verde hasta su evaporación total.

23. ¿Cuál debe ser el tamaño de la unidad de drenados del filtro verde?

Respuesta: Se recomienda un volumen que sea, como mínimo, la mitad del volumen del tanque utilizado como Filtro Anaeróbico (FAFA).

24. ¿Qué ancho deben tener los bordes del área de siembra del filtro verde para facilitar las labores de mantenimiento?

Respuesta: Se recomienda, como mínimo un ancho de 50 cm, para facilitar el desplazamiento y las labores de mantenimiento del personal.

25. ¿Cuál debe ser el ancho del camino central del área de siembra del filtro verde para facilitar las labores de mantenimiento?

Respuesta: Se recomienda, como mínimo un ancho de 50 cm, para facilitar el desplazamiento y las labores de mantenimiento del personal.

26. ¿Cómo se siembra el pasto vetiver?

Respuesta: Se siembran esquejes de 10,0 cm de tallo y 5,0 cm de raíz. Con la ayuda de un palo ahoyador puede realizarse el agujero en el cual se introduce el esqueje. Se recomienda que la siembra se realice al cuadro a 30,0 cm de distancia entre esquejes.

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
- Congreso de la República de Colombia. (1997). *Ley 373 de 1997 por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=342>
- Congreso de la República de Colombia. (2009). *Ley 1333 de 2009 por la cual se establece al procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=36879>
- Corporación Autónoma Regional de Caldas. (2023). *Resolución número 2023-0377 del 22 de febrero de 2023. Por medio de la cual se adopta el protocolo para el registro de usuarios del recurso hídrico de vivienda rural dispersa*. https://corpocaldas2022.blob.core.windows.net/webadmin/file_RESOLUCION_CvUbpkNE.pdf
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2023). *Boletín técnico. Encuesta Nacional de Calidad de Vida (ECV) 2022*. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/condiciones_vida/calidad_vida/2022/bol-ECCV-PDET-2022.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2023). *Estudio Nacional del Agua 2022*. IDEAM. https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/boletines/2024-08-27/estudio_nacional_del_agua_2022.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. IDEAM. <https://cta.org.co/descargables-biblionet/agua-y-medio-ambiente/Estudio-Nacional-del-Agua-2018.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010a). *Decreto Número 3930 de 2010. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones*. <https://www.habitatbogota.gov.co/decreto-3930-2010>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010b). *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, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010c). *Resolución Número 2086 Por el cual se adopta la metodología para la tasación de multas consagradas en el numeral 1º del artículo 40 de la Ley 1333 del 21 de julio de 2009 y se toman otras determinaciones*. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=87525>
- 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*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/decreto-2667-de-2014.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015a). *Resolución 1076 del 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*.

- <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Decreto-1076-de-2015.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015b). *Resolución 631 del 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.* <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018a). *Decreto 050 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.minambiente.gov.co/documento-entidad/decreto-050-de-2018/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018b). *Decreto 1090 del 2018. Por el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro de Agua y se dictan otras disposiciones.* <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/decreto-1090-de-2018.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018c). *Resolución 1257 del 2018. Por el cual se desarrollan los parágrafos 1 y 2 del artículo 2.2.3.2.1.1.3. del Decreto 1090 de 2018, mediante el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015.* <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-1257-de-2018.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021a). *Resolución Número 0699. 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://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-0699-de-2021.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021b). *Resolución 1256 del 2021 Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones.* <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=85084>
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). *Resolución 1096 del 2000. Por el cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico.* RAS. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/1096%20-%202000.pdf>
- Ministerio de Desarrollo Económico, & Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2000). *Tratamiento de Aguas Residuales.* (Sección II Título E.; Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS-2000., p. 144).
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2010). *Sistemas de acueducto.* (Título B.; Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS., p. 480). <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulob-030714.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2014). *Decreto 1287 del 2014 por el cual se establecen los criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.* Bogotá, D.C., Colombia.

- <https://www.suin-juriscal.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Decretos/1259502>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/18911>
- Office of Water Program Operations. (1980). *Onsite Wastewater Treatment and Disposal Systems. Design Manual*. (p. 391). U.S. Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/septic_1980_osdm_all.pdf
- Office of Water Program Operations. (2005). *Guía del dueño de hogar para sistema sépticos* (p. 19). U.S. Environmental Protection Agency. <https://iucacat.iu.edu/iupui/6761697>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2013). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. FAO. <https://www.fao.org/4/i3247s/i3247s.pdf>
- Productos Plásticos de Colombia [PROPLACOL]. (2024). *Telas plásticas tejidas de alta densidad*. <https://proplacol.com/>
- Productos Químicos Andinos [PQA]. (2021). *Producto Agroblick Esp 6. Y geomembranas*. <https://www.pqapag.co/productos-y-servicios/Agmacaaglack>
- Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L., & Castañeda, S. A. (2024). Construya y opere una biocama para el manejo y tratamiento de las aguas contaminadas con agroquímicos. *Boletín Técnico Cenicafé*, 49, 1–40. <https://doi.org/10.38141/10781/049>
- Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L., & Castañeda, S. A. (2022a). *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>
- Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L., & Castañeda, S. A. (2022b). *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., Osorio-Ocampo, A. F., Castañeda, S. A., De Miguel García, A., Harmsen, J., & Bisschops, I. (2018). *Tecnologías apropiadas para el tratamiento de aguas en fincas cafeteras*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0043>
- 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>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [Superservicios] (2024). Informe Nacional de cobertura de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo 2023. <https://storymaps.arcgis.com/stories/07790a09379849a9aa32e8a91e15315e>
- Truong, P., Van, T. T., & Pinnars, E. (2008). *Aplicaciones del sistema vetiver manual técnico de referencia* (2a ed.). The Vetiver Network International. https://vetiver.org/TVN-Manual_Vf.pdf

