



TECNOLOGÍAS APROPIADAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS EN FINCAS CAFETERAS



TECNOLOGÍAS APROPIADAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS EN FINCAS CAFETERAS

Nelson Rodríguez Valencia*

Laura Vanessa Quintero Yepes**

Andrés Felipe Osorio Ocampo**

Samuel Antonio Castañeda***

Ángel de Miguel García****

Joop Harmsen****

Iemke Bisschops****

* Investigador Científico III

** Asistente de Investigación

*** Auxiliar de Investigación

Disciplina de Poscosecha

Centro Nacional de Investigaciones de Café
Cenicafé

**** Wageningen University
and Research. Environmental Research

GESTIÓN INTELIGENTE DEL AGUA



Gestión Inteligente del Agua - Manos al Agua es una asociación público-privada que generó un modelo para habilitar y mejorar los sistemas para la cooperación intersectorial, la caficultura sostenible, la protección ambiental, y la toma de decisiones, que ha permitido contribuir a enfrentar los desafíos del desbalance hídrico para el sector cafetero y su cadena de valor, estableciendo condiciones ambientales, sociales y productivas para reducir la pobreza, mejorar el bienestar rural, contribuir a la paz y alcanzar el desarrollo sostenible en la zona rural colombiana.



TECNOLOGÍAS APROPIADAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS EN FINCAS CAFETERAS



AGUA PARA UNA CAFICULTURA SOSTENIBLE

Es un Proyecto a cinco años que trabajó en los departamentos de Antioquia, Caldas, Cauca, Nariño y Valle del Cauca, con un enfoque de manejo de 25 microcuencas en función de la gestión integral del recurso hídrico, vinculando a más de 11.630 familias caficultoras, en una zona de intervención de 148.754 hectáreas.



Socios Fundadores

Roberto Vélez Vallejo
Gerente General
Federación Nacional de Cafeteros (FNC)

Jean-Marc Duvoisin
CEO, Nespresso

Mark Schneider
Chief Executive Officer
Nestlé

Alejandro Gamboa Castilla
Director General
Agencia de Cooperación Internacional de Colombia
APC Colombia

Wageningen University and Research

Álvaro L. Gaitán Bustamante
Director Cenicafé

Ministerio de Asuntos Exteriores de los Países Bajos y Netherlands Enterprise Agency

Comité Directivo

Marcelo Burity
Green Coffee Development
Nestlé

Paulo Barone
Sustainability Program - Coffee
Nespresso

Charon Zondervan
Wageningen University and Research
Programme Coordinator
Environmental Sciences Group

Hernando Duque Orrego
Gerente Técnico
FNC

Director del Proyecto Manos al Agua, FNC

Rodrigo Calderón Correa

Comité Técnico Científico

Wouter Wolters
Wageningen University and Research
Environmental Research

Carlo Conforto Galli
Technical Manager Water Resources
Nestlé

Nelson Rodríguez
Investigador Científico
Cenicafé, FNC

Laura Miguel Ayala
Wageningen University and Research
Environmental Research

Comité Operativo

Ricardo Piedrahita
Strategic Sourcing and Sustainability Manager
Supply Chain
Nestlé Colombia

Santiago Arango
Green Coffee Project Manager
Nespresso Colombia

Nelson Rodríguez
Ph.D. en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Investigador Científico
Cenicafé, FNC

Equipo Administrativo, Coordinador, Científico y Técnico del Proyecto

Comité Editorial Cenicafé

Álvaro León Gaitán Bustamante
Ph.D. Director - Cenicafé

Pablo Benavides Machado
Ph.D. Ing. Agrónomo
Entomología - Cenicafé

Juan Rodrigo Sanz Uribe
Ph.D. Ing. Mecánico
Poscosecha - Cenicafé

Carmenza Esther Góngora Botero
Ph.D. Microbióloga
Entomología - Cenicafé

José Ricardo Acuña Zornosa
Ph.D. Microbiólogo
Fisiología - Cenicafé

Siavosh Sadeghian Khalajabadi
Ph.D. Ing. Agrónomo
Suelos - Cenicafé

Secretaría técnica del Comité editorial, revisión de textos y corrección de estilo

Sandra Milena Marín López
Ing. Agrónoma MSc

Revisión textos Proyecto GIA
Paola Castaño Aristizábal

Revisión editorial
Carlos Alfonso Tibaduiza Vianchá
Ing. Agrícola - Cenicafé

Diseño y Diagramación
Julieth Sofía Veloza Beltrán

Fotografías
Archivo Cenicafé
David Bonilla Abreo

Impreso por
Javegraf

Tabla de contenido

	Resumen	6
1	Introducción	9
2	Generalidades	13
	Usos del recurso hídrico.....	14
	Programa de uso eficiente y ahorro de agua.....	21
	Sistemas de tratamiento de aguas residuales.....	22
3	Potabilización del agua	33
	Sistemas de potabilización y abastecimiento del agua.....	34
	Destilación casera para la obtención de agua potable.....	34
	Rendimiento del proceso de destilación.....	37
	Caracterización del agua.....	37
	Sistemas de filtración casera.....	39
4	Tratamiento de aguas residuales domésticas	47
	Sistemas de tratamiento en el sitio de origen.....	48
5	Tratamiento de aguas residuales del café	83
	Características de las aguas residuales del café.....	85
	Tratamientos de aguas residuales del café evaluados en Cenicafé.....	86
6	Implementaciones de sistemas de tratamiento de aguas realizados en el proyecto GIA	109
	Criterios de selección.....	110
	Disminución de la contaminación en las microcuencas GIA por implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales.....	110
7	Conclusiones y recomendaciones	119
	Conclusiones.....	120
	Recomendaciones.....	122
	Literatura citada.....	126



RESUMEN

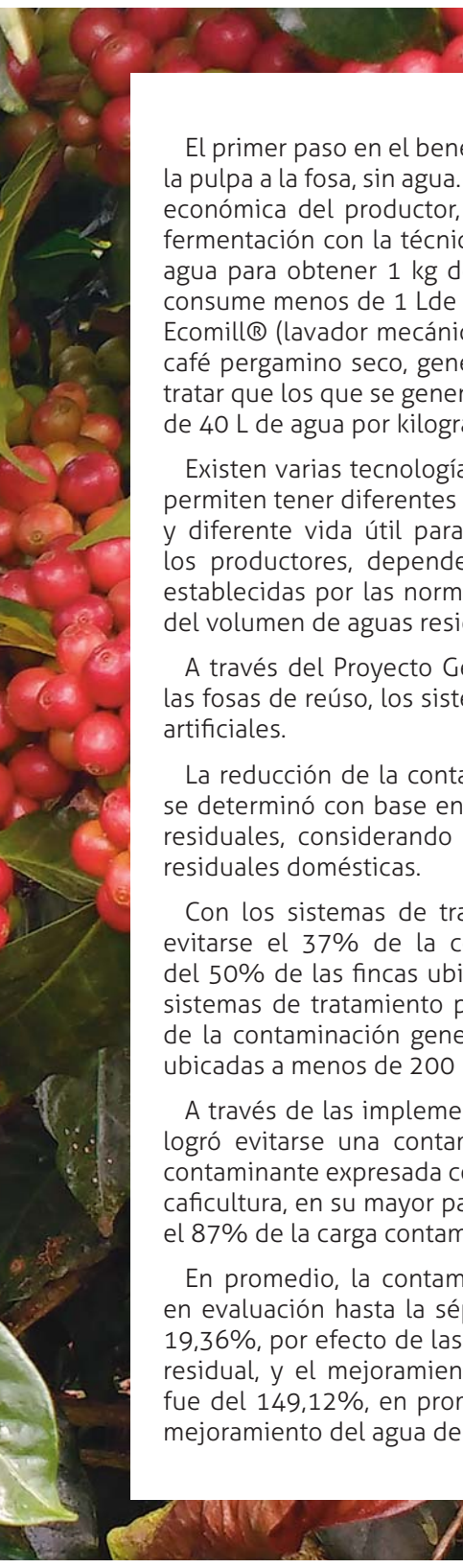
En las fincas cafeteras se requiere agua potable para consumo y agua de buena calidad para el beneficio del café. En las fincas principalmente se obtienen dos tipos de aguas residuales que ocasionan impacto sobre los recursos naturales agua, suelo, aire, biodiversidad; ellas son: las aguas residuales provenientes de las viviendas (aguas residuales domésticas) y las aguas residuales provenientes del proceso de beneficio del café (aguas mieles).

A través del Proyecto Gestión Inteligente del Agua se ha contribuido con implementaciones para obtener agua potable para consumo humano y para realizar el tratamiento de las aguas residuales generadas en las fincas cafeteras, basadas en las tecnologías apropiadas para las zonas rurales por su eficiencia y costo, y se han investigado nuevas tecnologías con el fin de ofrecer a los productores de café una mayor diversidad de alternativas en el manejo y tratamiento de las aguas residuales generadas en las fincas.

Para la potabilización del agua se evaluaron con buenos resultados la filtración lenta, la nanofiltración y la destilación. Para el tratamiento de las aguas residuales de las viviendas se evaluaron los sistemas sépticos constituidos por una trampa de grasas, un tanque séptico en polietileno, un filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA) empacado con tusas de maíz o con trozos de botellas no retornables o trozos de guadua que permitan la colonización y adherencia de un biofilm microbiano y su posterior tratamiento en un humedal artificial (estanque con relación largo ancho menor a cuatro, impermeabilizado y sembrado con plantas), los cuales constituyen una de las soluciones más acertadas para cumplir con la normativa colombiana para vertimientos al suelo (Decreto 1594 de 1984) y para vertimientos a cuerpos de agua superficial (Resolución 631 del 2015). Es de vital importancia que el diseño y cálculo de la capacidad de las unidades que forman parte del sistema séptico se realicen de acuerdo a lo estipulado en el Reglamento de Agua y Saneamiento de Colombia (RAS 2000) y que se realice una eliminación periódica de los lodos del tanque séptico, para lo cual se diseñó un sistema basado en el principio del sifón invertido.

La principal estrategia para el tratamiento de las aguas residuales del café es la adopción del beneficio ecológico del café, entendido como el proceso en el cual se emplean menos de 10 L de agua para obtener 1 kg de café pergamino seco, en el cual se realiza un manejo apropiado a la pulpa y al mucílago que se generan en la transformación del fruto al grano seco.





El primer paso en el beneficio ecológico del café es el despulpado y el transporte de la pulpa a la fosa, sin agua. Dependiendo de la producción de la finca y de la capacidad económica del productor, en el lavado del grano pueden utilizarse los tanques de fermentación con la técnica de los cuatro enjuagues que consumen menos de 5 Lde agua para obtener 1 kg de café pergamino seco, el desmucilaginado mecánico que consume menos de 1 Lde agua por kilogramo de café pergamino seco y la tecnología Ecomill® (lavador mecánico) que consume menos de 0,5 Lde agua por kilogramo de café pergamino seco, generando, en todos los casos, menores volúmenes de agua a tratar que los que se generan en el beneficio convencional del café, que consume más de 40 L de agua por kilogramo de café pergamino seco.

Existen varias tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales del café, que permiten tener diferentes eficiencias, diferentes costos de inversión y mantenimiento y diferente vida útil para el sistema de tratamiento, cuya selección, por parte de los productores, dependerá, además de la normativa nacional, de las exigencias establecidas por las normativas locales, de la capacidad económica del productor y del volumen de aguas residuales generadas en función de la producción.

A través del Proyecto Gestión Inteligente del Agua se implementaron y evaluaron las fosas de reúso, los sistemas modulares de tratamiento anaerobio y los humedales artificiales.

La reducción de la contaminación de carga contaminante en las microcuencas GIA se determinó con base en las 3.346 implementaciones para el tratamiento de aguas residuales, considerando intervenciones en aguas residuales del café y en aguas residuales domésticas.

Con los sistemas de tratamiento para las aguas residuales de la vivienda logró evitarse el 37% de la contaminación generada por los vertimientos domésticos del 50% de las fincas ubicadas a menos de 200 m de los cuerpos de agua. Con los sistemas de tratamiento para las aguas residuales del café logró evitarse el 29,5% de la contaminación generada por los vertimientos del café del 50% de las fincas ubicadas a menos de 200 m de los cuerpos de agua.

A través de las implementaciones realizadas en el tratamiento de aguas residuales logró evitarse una contaminación, en las microcuencas, de 2.443 t/año de carga contaminante expresada como DQO, lo que es de gran importancia por estar situada la caficultura, en su mayor parte, en la macrocuenca Magdalena-Cauca, donde se genera el 87% de la carga contaminante del país.

En promedio, la contaminación evitada en las 11 microcuencas que continuaron en evaluación hasta la séptima campaña de monitoreo de calidad del agua fue del 19,36%, por efecto de las implementaciones de los sistemas de tratamiento de agua residual, y el mejoramiento encontrado en la calidad del agua superficial en ellas fue del 149,12%, en promedio, para un factor de potencialización en beneficio del mejoramiento del agua de 9.

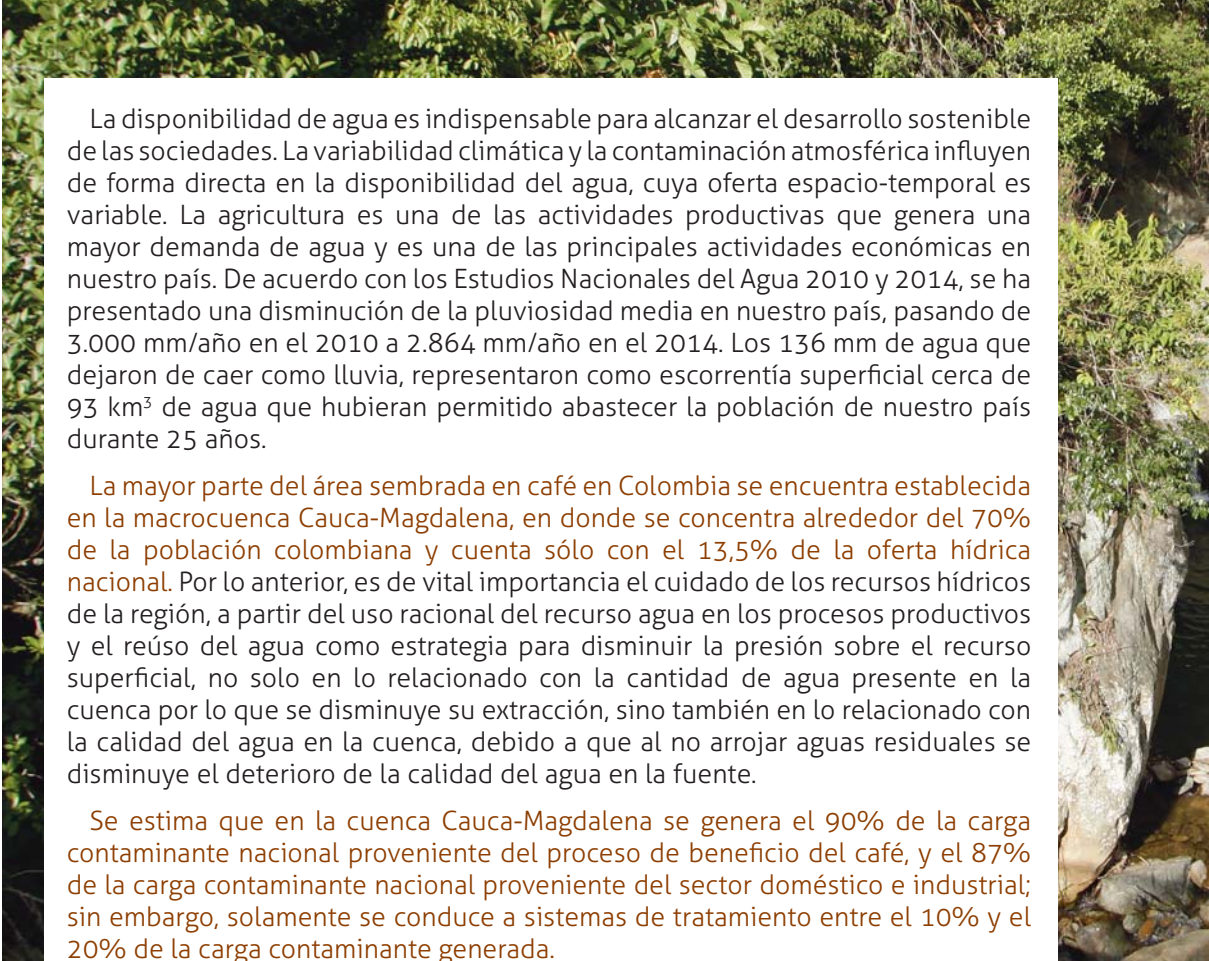




Tratamiento de aguas en fincas cafeteras

INTRODUCCIÓN

1



La disponibilidad de agua es indispensable para alcanzar el desarrollo sostenible de las sociedades. La variabilidad climática y la contaminación atmosférica influyen de forma directa en la disponibilidad del agua, cuya oferta espacio-temporal es variable. La agricultura es una de las actividades productivas que genera una mayor demanda de agua y es una de las principales actividades económicas en nuestro país. De acuerdo con los Estudios Nacionales del Agua 2010 y 2014, se ha presentado una disminución de la pluviosidad media en nuestro país, pasando de 3.000 mm/año en el 2010 a 2.864 mm/año en el 2014. Los 136 mm de agua que dejaron de caer como lluvia, representaron como escorrentía superficial cerca de 93 km³ de agua que hubieran permitido abastecer la población de nuestro país durante 25 años.

La mayor parte del área sembrada en café en Colombia se encuentra establecida en la macrocuenca Cauca-Magdalena, en donde se concentra alrededor del 70% de la población colombiana y cuenta sólo con el 13,5% de la oferta hídrica nacional. Por lo anterior, es de vital importancia el cuidado de los recursos hídricos de la región, a partir del uso racional del recurso agua en los procesos productivos y el reúso del agua como estrategia para disminuir la presión sobre el recurso superficial, no solo en lo relacionado con la cantidad de agua presente en la cuenca por lo que se disminuye su extracción, sino también en lo relacionado con la calidad del agua en la cuenca, debido a que al no arrojar aguas residuales se disminuye el deterioro de la calidad del agua en la fuente.

Se estima que en la cuenca Cauca-Magdalena se genera el 90% de la carga contaminante nacional proveniente del proceso de beneficio del café, y el 87% de la carga contaminante nacional proveniente del sector doméstico e industrial; sin embargo, solamente se conduce a sistemas de tratamiento entre el 10% y el 20% de la carga contaminante generada.

El 43,5% de los municipios de Colombia reportan tener plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, pero sólo el 26% las tienen en operación (SISPD, 2013). De las plantas que funcionan, unas realizan tratamiento preliminar, otras realizan tratamiento primario y otras realizan tratamiento secundario, por lo que el impacto ambiental sobre el recurso hídrico es muy significativo y se está constituyendo en la principal causa de la disminución en la disponibilidad del recurso.

En el año 2010 Colombia promulgó su Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico, la cual contiene ocho principios: **1.** El agua es un bien de uso público y su conservación es responsabilidad de todos. **2.** El consumo humano tendrá prioridad sobre otros usos y prima el uso colectivo sobre el uso individual. **3.** El agua es un recurso estratégico para el desarrollo social, cultural y económico. **4.** La gestión del recurso armoniza con los procesos locales, regionales y nacionales. **5.** La cuenca hidrográfica es la unidad fundamental para



la planificación y gestión del recurso. **6.** El agua dulce es un recurso escaso y su uso debe ser racional. **7.** La gestión del recurso tendrá enfoque participativo y multisectorial con equidad social. y **8.** El acceso a la información e investigación son fundamentales en la gestión integral del recurso hídrico.

Para facilitar el logro de los principios, la política nacional hídrica cuenta con:

- Instrumentos de planificación, en los cuales se destacan los planes de ordenamiento en manejo de cuencas (Decreto 1640 del 2012 del MADS)
- Instrumentos de comando y control, entre los cuales se destacan los programas de uso eficiente y ahorro de agua (PUEAA), los planes de saneamiento y manejo de vertimientos (PSMV) y las normas de vertimientos (Decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Agricultura, Decreto 3930 del 2010 del MAVDT y Resolución 631 del 2015 del MADS).
- Instrumentos económicos, entre los cuales se destacan las tasas de uso de agua (Decreto 155 del 2004 del MAVDT), las tasas retributivas (Decreto 2667 del 2012 del MADS) y los incentivos tributarios (Decreto 3172 del 2003 del Ministerio de Hacienda).
- Instrumentos de información como el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH).
- Instrumentos financieros, de conservación y sancionatorios (Ley 1333 del 2009 del MAVDT).

A través de la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico y de sus instrumentos legales se busca la conservación del recurso en cantidad y calidad en las diversas microcuencas de la geografía nacional, que permitan mantener la oferta hídrica actual y futura para los diversos usos activos y pasivos del agua en Colombia.

De acuerdo con información base generada en la formulación del Proyecto Gestión Inteligente del Agua, en el año 2012, apoyada en información del Sistema de Información Cafetero, Departamento Nacional de Planeación y el SISBÉN, el porcentaje de la caficultura que cuenta con un servicio apropiado de acueducto es del 31%, y que tiene servicio apropiado de alcantarillado es del 2%.

A través del Proyecto Gestión Inteligente del Agua con el lema **"Manos al Agua"**, se han beneficiado directamente cerca de 2.400 caficultores, ubicados a menos de 200 m de los cuerpos de agua, en 25 microcuencas cafeteras, con el uso de dispositivos ahorradores de agua, sistemas de nanofiltración para obtener agua potable, plantas de tratamiento para aguas residuales domésticas y aguas residuales del beneficio del café, contribuyendo con ello al mejoramiento de la calidad de vida de los caficultores y la calidad de los ecosistemas hídricos de la zona cafetera asentados en la macrocuenca Cauca-Magdalena.





Tratamiento de aguas en fincas cafeteras

GENERALIDADES

2

Usos del recurso hídrico

En las fincas cafeteras se requiere el agua para las actividades domésticas, agrícolas y de producción animal. En las actividades domésticas se requiere para el consumo (agua de bebida y preparación de alimentos), aseo personal (ducha, lavado de cara, lavado de manos, cepillado de dientes), lavado de la ropa y de utensilios de la cocina, limpieza de las instalaciones y de los vehículos, y para el uso en saneamiento ambiental (arrastre de excretas y orina). En las actividades agrícolas del sector cafetero se requiere en el riego de los germinadores y almacigos del café, del huerto y en el beneficio del café y en la limpieza del beneficiadero. En las actividades de producción animal se requiere en la producción pecuaria, porcícola, piscícola y de aves, tanto para consumo de los animales como para la limpieza de la infraestructura.

En Colombia el agua es un bien público, por lo tanto, es necesario adquirir el derecho para su uso.



Derecho al uso del agua

En Colombia existen aguas de dominio público y de dominio privado.

Aguas de dominio público: comprenden los ríos, las aguas que corren por cauces artificiales derivadas de uno natural, los lagos, las lagunas, las ciénagas, los pantanos, las aguas de la atmósfera, las aguas lluvias.

Aguas de dominio privado: son aquellas que brotan naturalmente y que desaparecen por infiltración o evaporación dentro de una misma heredad (nacen y mueren en el mismo predio), lo cual difícilmente ocurre, por lo que la mayoría de aguas son de dominio público.

Existen varias formas para adquirir derecho al uso de las aguas y sus cauces:

Uso por ministerio de la ley

Toda persona puede usar las aguas de uso público que discurren por cauces naturales sin autorización, si es para beber, bañarse, lavar ropas y otros objetos similares, de acuerdo con las normas sanitarias sobre la materia y con las de protección de los recursos naturales renovables. Estos usos no dan exclusividad o prioridad a los primeros que hagan uso del derecho; además, el uso es gratuito, es decir, que ni el Estado ni los particulares cobran por ello.

Si son aguas que corren por un cauce artificial, también pueden usarse para usos domésticos o abrevaderos; esto, si el uso al que se destinen no requiere que se conserven en estado de pureza, no ocasionen daños al canal o acequia, ni se imposibilite o estorbe el aprovechamiento al concesionario de las aguas.

Para usar las aguas de dominio privado con fines domésticos se requiere:

- Que con la utilización de estas aguas no se ocasione perjuicio a la finca donde se encuentran.
- Que el uso doméstico se haga sin establecer derivaciones, ni emplear máquinas, ni aparatos, ni alterar o contaminar el agua de forma que se imposibilite el aprovechamiento por el dueño del predio.
- Que previamente se haya acordado con el dueño del fundo, el camino y las horas para hacer efectivo ese derecho.

Uso por concesión

La concesión de aguas es una de las maneras de adquirir derecho a su aprovechamiento para las actividades o fines que las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, requieran.

Esta es una manera para garantizar su conservación, así como su distribución equitativa. Es por ello que toda persona natural o jurídica, pública o privada, requiere concesión o permiso para su uso.

Se debe solicitar concesión de aguas en todos los casos en que su uso no esté autorizado por ministerio de la ley. Por ejemplo, para aprovechar el agua para los siguientes fines:

- Abastecimiento doméstico en los casos en que se requiera derivación.
- Riego y silvicultura.
- Abastecimiento de abrevaderos cuando se requiera derivación.
- Uso industrial.
- Explotación minera y explotación petrolera.
- Generación hidroeléctrica.
- Acuicultura y pesca.
- Recreación y deportes.

Uso por permisos

Permisos comunes para la extracción de materiales de arrastre de los cauces o lechos de las corrientes o depósitos de aguas. Para ello, se deberá presentar solicitud ante la autoridad ambiental de la región.

Uso por asociación

Cuando se conforman asociaciones y empresas comunitarias para el uso de las aguas y de los cauces. Las asociaciones de usuarios de aguas estarán constituidas por quienes aprovechen aguas de una o varias corrientes comprendidas por el mismo sistema de reparto. Deberán constituirse por documento y tener unos estatutos que regulen las relaciones entre todos los usuarios.

Prioridad en el uso del agua

Hay un orden de prioridad para las concesiones de agua. El uso doméstico tendrá siempre prioridad sobre los demás; los usos colectivos sobre los individuales y los de los habitantes de una región sobre aquellos de fuera de ella.

El otorgamiento de aguas para satisfacer concesiones está sujeto a la disponibilidad del recurso, por lo tanto, el Estado, es decir la autoridad ambiental, no es responsable cuando por causas naturales no pueda garantizarse la cantidad de agua concedida. El orden en el cual se otorgaron las concesiones no da prioridad, y en casos de escasez, la autoridad ambiental definirá el mejor procedimiento para distribuirla.

Las concesiones se otorgan por un término no mayor de 10 años, salvo las destinadas a la prestación de servicios públicos o a la construcción de obras de interés público o social que podrán ser otorgadas por períodos hasta de 50 años.

Calidad del agua según su uso

A través del Decreto 1594 de 1984, el Ministerio de Agricultura y el Ministerio de Salud de Colombia establecieron los parámetros de calidad y sus valores máximos permisibles para el agua destinada al consumo humano y doméstico, preservación de flora y fauna, uso agrícola, pecuario, recreativo, industrial y transporte.

De todos los usos del recurso descritos, el que requiere de agua de mejor calidad es aquel destinado para el consumo humano, siendo necesario realizar una potabilización al agua.

En la resolución 2115 del 2007 del Ministerio de la Protección Social y del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial se define la potabilización como "el conjunto de operaciones y procesos que se realizan al agua cruda, con el fin de modificar sus características físicas, químicas y microbiológicas para hacerla apta para consumo humano".

Sistemas de abastecimiento de agua

Los sistemas de abastecimiento de agua se refieren a las actividades y elementos requeridos para disponer de agua en forma continua, tanto en las viviendas como en los procesos productivos.

Los métodos más utilizados para el abastecimiento de agua son: el acarreo, la recolección y almacenamiento de las aguas lluvias, la excavación de pozos para aprovechar las aguas subterráneas que se encuentran cerca de la superficie y la captación a partir de fuentes superficiales y su distribución a las viviendas o sistemas productivos con o sin tratamiento.

En la mayoría de los casos en que se utiliza el agua directamente de la fuente, sin realizarse algún tratamiento para purificarla, se está incumpliendo la normativa ambiental vigente, relacionada con los criterios de calidad para destinación del recurso.

Plantas potabilizadoras de agua

Se conoce con el nombre de agua potable al agua que ha sido tratada con el objetivo de hacerla apta para el consumo humano. Esta agua no debe tener organismos, sustancias químicas, minerales o impurezas que puedan causar enfermedades.

En la potabilización el agua se somete a unos procesos de tratamiento; los más importantes de ellos son: la clarificación, la filtración y la desinfección.

Clarificación: es un proceso para remover las partículas suspendidas del agua turbia y hacerla clara, en el cual se adicionan sustancias químicas conocidas como coagulantes, siendo las más utilizadas las sales de hierro y aluminio, que permiten la formación de partículas sedimentables y de esta forma eliminar la contaminación del agua. El proceso puede ser acelerado mediante la utilización de otras sustancias químicas conocidas con el nombre de floculantes.

Filtración: es un proceso que consiste en pasar el agua a través de varias capas de material poroso con el fin de retener algunas bacterias y partículas suspendidas en el líquido.

Desinfección: es un proceso que permite eliminar los microorganismos presentes en el agua. Entre los desinfectantes más utilizados están el gas cloro y sus derivados, el yodo y el ozono.

Una planta de tratamiento para potabilizar el agua es una secuencia de procesos (realizados en diferentes estructuras) con el fin de remover totalmente los contaminantes microbiológicos presentes en el agua cruda, y parcialmente los físicos y químicos, hasta llevarlos a los límites aceptables exigidos por las normas estatales.

Existen varios tipos de plantas potabilizadores, siendo las más comunes las plantas convencionales y las plantas compactas.

Plantas convencionales: en este tipo de plantas se realizan los procesos de coagulación, sedimentación, filtración, cloración, de forma secuencial en diferentes tanques o estructuras.

Plantas compactas: son plantas en las cuales los procesos de tratamiento se llevan a cabo en un módulo prefabricado (Figura 1). Son recomendables para abastecer de agua a pequeñas comunidades.



Figura 1. Planta compacta instalada en el departamento de Antioquia.

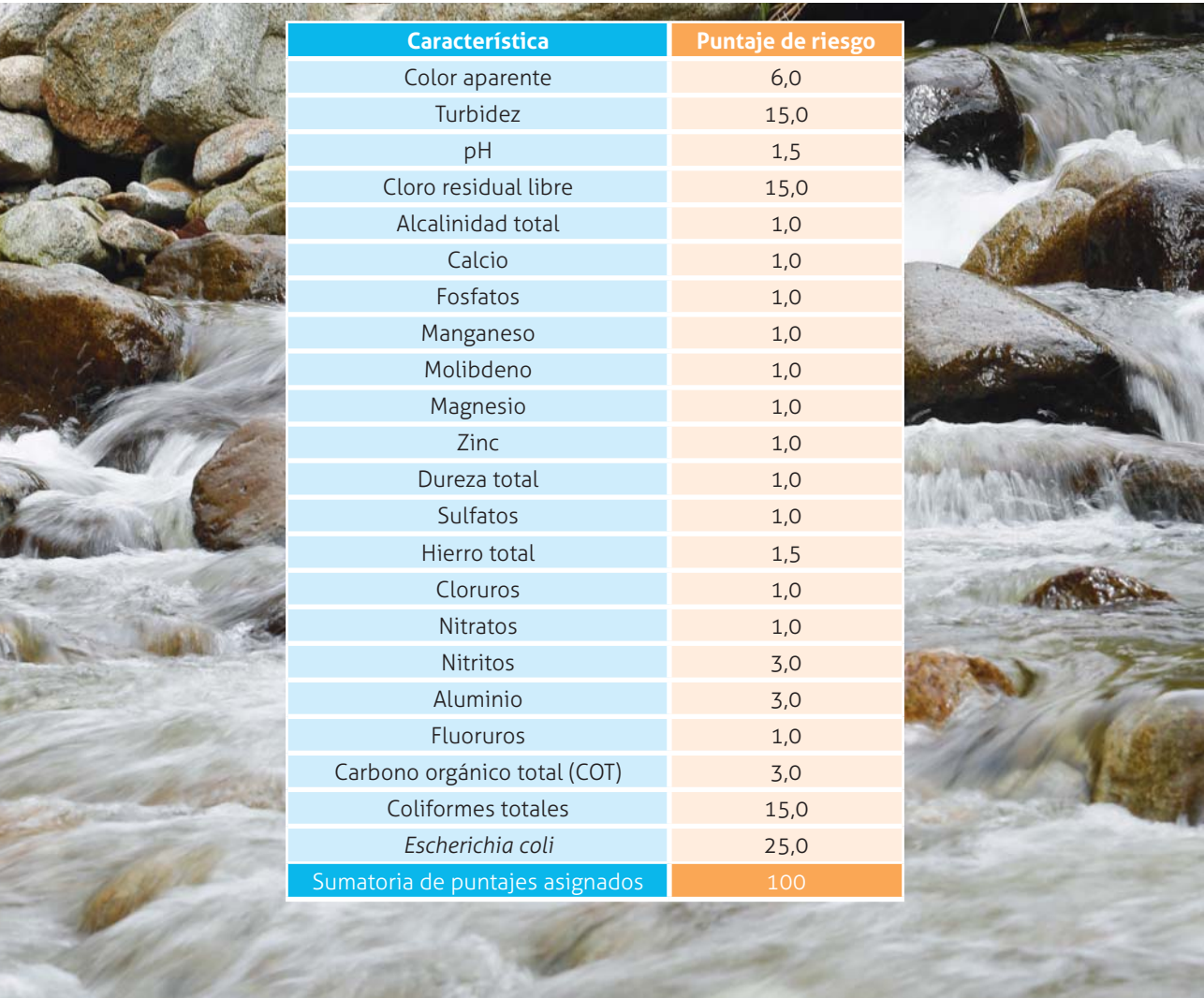
Índice de riesgo de la calidad del agua (IRCA)

El IRCA se refiere al índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano, el cual es un instrumento básico para garantizar la calidad del agua. Está definido en la Resolución 2115 del 2007, expedida por el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial.

Para el cálculo de este índice de riesgo se asignan unos valores (puntaje de riesgo) para aquellas características del agua que no cumplan con los valores establecidos en la resolución. Las características consideradas son: color, turbidez, pH, cloro residual, alcalinidad, calcio, fosfatos, manganeso, molibdeno, magnesio, zinc, dureza, sulfatos, hierro, cloruros, nitrato, nitritos, aluminio, fluoruros, carbono orgánico total y coliformes totales y fecales.

A los parámetros que no presentan riesgo se les da un puntaje de cero y a los que sí presentan riesgo se les dan diferentes puntajes dependiendo de la importancia y el efecto que pueda tener este riesgo sobre la salud humana (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros y puntajes de riesgo en el cálculo del IRCA (Fuente: MAVDT, 2007).



Característica	Puntaje de riesgo
Color aparente	6,0
Turbidez	15,0
pH	1,5
Cloro residual libre	15,0
Alcalinidad total	1,0
Calcio	1,0
Fosfatos	1,0
Manganeso	1,0
Molibdeno	1,0
Magnesio	1,0
Zinc	1,0
Dureza total	1,0
Sulfatos	1,0
Hierro total	1,5
Cloruros	1,0
Nitratos	1,0
Nitritos	3,0
Aluminio	3,0
Fluoruros	1,0
Carbono orgánico total (COT)	3,0
Coliformes totales	15,0
<i>Escherichia coli</i>	25,0
Sumatoria de puntajes asignados	100

El valor del IRCA es cero cuando se cumple con los valores aceptables para cada una de las características anteriores contempladas en la Resolución y 100 puntos cuando no se cumple con ellos.

Cálculo del IRCA

Para el cálculo del IRCA se utiliza la Ecuación 1:

$$\text{IRCA (\%)} = \frac{\sum \text{puntajes de riesgo asignados a las características no aceptables}}{\sum \text{puntajes de riesgo asignados a todas las características analizadas}} \times 100 \quad 1$$

De acuerdo con los resultados del IRCA se define la clasificación del nivel del riesgo del agua suministrada para consumo humano (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación del IRCA y Nivel de Riesgo (Fuente: MAVDT, 2007).

Clasificación IRCA (%)	Nivel de riesgo	IRCA por muestra (Notificaciones que adelantará la autoridad sanitaria de manera inmediata)	IRCA mensual (Acciones)
80,1 - 100	Inviabile sanitariamente	Informar a la persona prestadora, al Comité de Vigilancia Epidemiológica (COVE), alcalde, gobernador, Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), Ministerio de la Protección Social (MPS), Instituto Nacional de Salud (INS), Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), Contraloría General y Procuraduría General.	Agua no apta para el consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora, alcaldes, gobernadores y entidades del orden nacional.
35,1 - 80,0	Alto	Informar a la persona prestadora, Comité de Vigilancia Epidemiológica (COVE), alcalde, gobernador y la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD).	Agua no apta para el consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora y de los alcaldes y gobernadores respectivos.
14,1 - 35,0	Medio	Informar a la persona prestadora, Comité de Vigilancia Epidemiológica (COVE), alcalde y gobernador.	Agua no apta para el consumo humano, gestión directa de la persona prestadora.
5,1 - 14,0	Bajo	Informar a la persona prestadora y al Comité de Vigilancia Epidemiológica (COVE).	Agua no apta para el consumo humano, susceptible de mejoramiento.
0 - 5,0	Sin riesgo	Continuar el control y la vigilancia.	Agua apta para consumo humano. Continuar la vigilancia.

Jerarquía de las necesidades de agua

De acuerdo con la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), las necesidades mínimas diarias de agua por persona se establecen en la Tabla 3.

Tabla 3. Necesidades de agua en las viviendas (Fuente: Adaptado de OPS-OMS, 2009).

Actividad	Rango (L/día por persona)
Bebida	3-4
Preparación de alimentos	2-3
Higiene personal	6-7
Lavado de ropa	4-6
Uso sanitario	10-15

En la Figura 2 se establecen las jerarquías de las necesidades de agua.

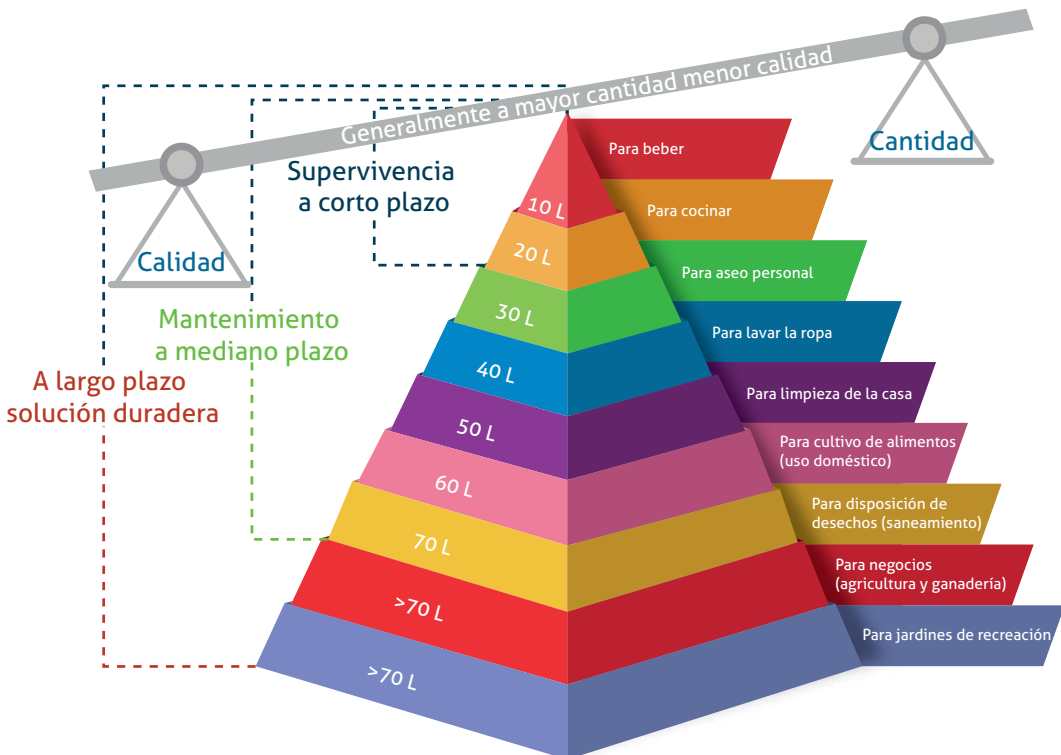


Figura 2. Jerarquías de las necesidades de agua (Fuente: Adaptado de OPS-OMS, 2009).

En Colombia se promulgó la Ley 373 de 1997 por la cual se estableció el programa para el uso eficiente y ahorro de agua, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, y la Resolución 726 del 2015 de la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, "Por la cual se adoptan medidas para promover el uso eficiente y ahorro de agua potable y desincentivar su consumo excesivo", el cual está definido en valores superiores a 28 m³/suscriptor-mes, en asentamientos entre los 1.000 y 2.000 m de altitud.

El uso eficiente del agua involucra tecnologías y prácticas mejoradas, con las cuales se proporciona igual o mejor servicio con menos agua; estas prácticas consisten en hacer uso racional y eficiente del agua, utilizándola en las cantidades mínimas según su uso. Estas prácticas pueden ser:

Prácticas de ingeniería: Se basan en la modificación de tuberías, accesorios y procedimientos de operación en el aprovechamiento del agua, y pueden dividirse:

- En la reducción de las pérdidas (revisar y arreglar las fugas).
- El reúso del agua, que consiste en utilizar el agua proveniente de una aplicación específica en otra aplicación diferente a la inicial.
- El reciclaje del agua que consiste en usar el agua en la misma aplicación en la que se usó inicialmente; es probable que para reciclar el agua, esta requiera de un tratamiento antes de ser usada nuevamente.

Prácticas de comportamiento (conducta): Se basan en el cambio en las conductas de consumo del agua para lograr un uso más eficiente; con estos cambios se logra ahorrar agua sin tener que realizar modificaciones en las infraestructuras.

Manejo eficiente del agua en las viviendas

El uso promedio de agua en un hogar común puede variar entre los 150 y 250 l por persona cada día.



En las viviendas pueden realizarse diariamente una serie de actividades que permiten un ahorro en el consumo del agua; estas actividades pueden ser:

- Cerrar la llave mientras se realiza el cepillado los dientes, de esta manera, una familia de cinco personas puede ahorrar hasta 40 L de agua diarios.
- No utilizar el sanitario para eliminar papeles u otros elementos sólidos, dado que ellos requieren una descarga de agua. Estos elementos sólidos deben disponerse en la caneca de basura.
- Tomar duchas cortas y cerrar la llave mientras se enjabona.
- Enjuagar la máquina de afeitar en un recipiente, y no debajo del chorro de agua.
- Utilizar aparatos que ahorran agua, como sanitarios de baja descarga (menores a 6 L) o reductores de cantidad de agua en las tuberías, duchas y grifos.
- Asegurarse de que ninguno de los grifos ni el sanitario estén goteando.
- Regar prados y jardines al final de la tarde para disminuir pérdidas de agua por evaporación.
- Crear conciencia en todos los miembros de la familia acerca del ahorro del agua.

Realizando estas prácticas puede disminuirse el consumo de agua en el hogar, reduciendo el costo del servicio y aportando a la sostenibilidad de los ecosistemas hídricos.

Manejo eficiente del agua en el beneficio del café

El beneficio ecológico del café es un proceso mediante el cual se transforma el fruto de café en café pergamino seco (cps), siendo un proceso amigable con el ambiente, que permite obtener cafés con la calidad física y de taza característicos del café de Colombia (Roa *et al.*, 1999).

Los beneficiaderos ecológicos se caracterizan por cumplir, entre otras, dos características fundamentales:

- 1.** Que el consumo global de agua en el beneficio del café sea menor a 10 L/kg de cps.
- 2.** Que se realice manejo parcial o total a los subproductos (pulpa y mucílago) generados en el proceso de beneficio, con la aplicación de buenas prácticas (Rodríguez *et al.*, 2015).

En el proceso de beneficio ecológico, la tolva seca o con recirculación de agua, la fermentación natural y el lavado y clasificado del grano en tanques de fermentación, utilizando la técnica de los enjuagues (Zambrano, 1993), se aconsejan para caficultores con producciones menores a 1.000 kg de café cereza en el día pico. Para caficultores con producciones medianas y altas, mayores a 1.000 kg de café cereza, en el día pico, se recomienda para la clasificación hidráulica del fruto el uso del separador hidráulico de tolva y tornillo sinfin (Oliveros *et al.*, 2007), las tolvas húmedas con recirculación y el tanque sifón con recirculación, y para el lavado del grano los desmucilaginosos y lavadores mecánicos.

Sistemas de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con la información reportada por el IDEAM (2015), en el Estudio Nacional del Agua 2014, el consumo estimado de agua en el 2012 para uso doméstico fue de 2.963 millones de metros cúbicos; si se estima un factor de retorno del 80%, se tendría un valor diario de aguas residuales domésticas del orden de 6,5 millones de metros cúbicos, de las cuales solo se trata alrededor del 20%. Sin embargo, no todos los sistemas de tratamiento instalados funcionan apropiadamente, debido a causas diversas, como: **1.** Desconocimiento del funcionamiento del sistema. **2.** Mala operación y falta de mantenimiento del sistema. **3.** Falta de sostenibilidad financiera. **4.** Insuficiente conciencia ambiental de las poblaciones. **5.** Escasa participación público-privada en iniciativas para impulsar proyectos de saneamiento básico, sumado a sus deficiencias institucionales (MAVDI, 2010). El 80% restante se dispone, sin algún tratamiento, en cuerpos de agua (superficiales, subterráneos, marinos) o en el suelo, generando un gran deterioro de los recursos naturales.

Con la promulgación de la Política Nacional de la Gestión Integral del Recurso Hídrico se actualizaron instrumentos de planificación, comando y control, económicos, sancionatorios e informativos, con el objetivo de recuperar y conservar las diferentes fuentes hídricas. Uno de los principales instrumentos de planificación lo constituye el Decreto 1640 del 2012 que trata sobre planes de ordenamiento en manejo de cuencas hidrográficas; entre los instrumentos de comando y control se destacan el Decreto

3930 del 2010, que trata sobre disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, su ordenamiento y los vertimientos al agua, al suelo y a los alcantarillados, y la Resolución 631 del 2015 que trata sobre parámetros y valores máximos admisibles que deben cumplir los vertimientos antes de descargarlos a cuerpos de aguas superficiales; entre los instrumentos económicos se destaca el Decreto 2667 del 2012 que trata sobre el pago de tasas retributivas por la contaminación aún presente en los vertimientos generados; entre los instrumentos sancionatorios se destacan la Ley 1333 del 2009 y el Decreto 3678 del 2010 que tratan sobre la tasación de multas ambientales, y finalmente entre los elementos informativos se destacan el sistema de información ambiental (SIA) y el sistema información del recurso hídrico (SIRH).

El tratamiento de aguas residuales es una de las soluciones para atenuar el deterioro de la calidad del agua en los cuerpos superficiales, subterráneos y marinos, originado por la disposición de las aguas residuales que realizan los sectores productivos y residenciales.

Permiso de vertimientos

Un vertimiento es cualquier descarga de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido que se haga a un cuerpo de agua, al alcantarillado público o al suelo.

Toda persona cuya actividad genere vertimientos líquidos al agua o al suelo, debe solicitar un permiso de vertimientos. Por ejemplo, el agua que sale de la actividad minera, el vertimiento de una industria o del uso doméstico cuando no haya alcantarillado disponible.

El permiso de vertimientos es el derecho que otorga la autoridad ambiental para descargar aguas residuales a un cuerpo de agua, al suelo u otro medio, previo tratamiento de las mismas y cumpliendo con las normas de vertimientos puntuales. El permiso de vertimiento es importante para disminuir la contaminación del agua, del suelo y de las aguas subterráneas. Así es como se ayuda a conservar el recurso hídrico libre de contaminación. También puede evitarse una sanción por descargar aguas residuales sin el permiso de vertimientos.

El decreto 3930 del 2010, expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece: "toda persona natural o jurídica cuya actividad o servicio genere vertimientos a las aguas superficiales, marinas o al suelo, deberá solicitar y tramitar ante la autoridad ambiental competente, el respectivo permiso de vertimientos".

Parámetros caracterizadores de aguas residuales

Los parámetros que se utilizan con más frecuencia para caracterizar y evaluar la eficiencia de remoción de la contaminación presente en las aguas residuales pueden clasificarse en: **parámetros relacionados con la presencia de materia orgánica, parámetros relacionados con la presencia de sustancias nitrogenadas, parámetros relacionados con la presencia de sustancias fosforadas y parámetros relacionados con la presencia de enterobacterias.**

Las aguas superficiales y subterráneas, además de sustancias minerales y disueltas, pueden llevar en suspensión sustancias orgánicas provenientes del lavado de los suelos o del metabolismo de los organismos que viven en ellos. Además, los cuerpos de aguas superficiales y subterráneos pueden recibir descargas de aguas residuales de origen doméstico o industrial, las cuales provocan la contaminación en niveles variables.

Estas sustancias orgánicas representan una fuente de alimentación para los organismos (autótrofos y heterótrofos) presentes en el agua; tienden a desaparecer progresivamente por oxidación, y pasar a CO_2 , amoníaco, nitritos y nitratos, entre otros.

Por lo general las aguas naturales no contaminadas presentan cantidades mínimas de materia orgánica, salvo aquellas que provienen de bosques o aguas estancadas. La materia orgánica puede ser, en muchos casos, la responsable del color, el olor y el sabor del agua, los cuales deben ser eliminados durante el tratamiento, con el fin de hacerla apta para el consumo humano.

Cuantificación de la materia orgánica en aguas residuales. Se han establecido métodos para la determinación de las sustancias orgánicas presentes en el agua residual, a través de los siguientes parámetros:

Demanda química de oxígeno (DQO): es una medida del equivalente del oxígeno necesario para oxidar químicamente la materia orgánica presente en el agua. Es la cantidad de oxígeno que sustancias reductoras, como la materia orgánica, presentes en un agua residual, necesitan para descomponerse sin la intervención de microorganismos. A mayor contenido de DQO mayor será la contaminación de la muestra de agua (Figura 3.1 y 3.2).

Demanda biológica de oxígeno (DBO5): esta medida permite evaluar la cantidad de oxígeno (en mg/l) que debe proporcionarse a un cultivo bacteriano natural para que consuma los contaminantes orgánicos en cinco días. A mayor contenido de DBO5 mayor será la contaminación de la muestra de agua (Figura 3.3 y 3.4).

Carbono orgánico total (COT): mediante este análisis puede determinarse todo el carbono orgánico presente en una muestra de agua residual, el cual procede de todos los compuestos orgánicos que se encuentran formando parte de la muestra. A mayor contenido de COT mayor será la contaminación de la muestra de agua.

El COT puede relacionarse con la **DQO** (Hach, 2013), de acuerdo con la **Ecuación 2**:

$$\text{COT} = 0,2498 (\text{DQO}) + 4,6532 \quad \text{2}$$

Existen metodologías rápidas que permiten determinar la **DQO** en 2 h, como el método de reflujo cerrado, método colorimétrico, desarrollado por la HACH y aprobado por la U.S.EPA (HACH, 1988).

La eliminación de la materia orgánica se lleva a cabo mediante la coagulación-floculación, la sedimentación y la filtración; sin embargo, cuando la fuente de agua cruda tiene una carga orgánica y bacteriana muy grande, caso en el que la DBO_5 puede alcanzar valores muy altos, será necesaria una precloración, que debe constituirse en un proceso adecuadamente controlado.

Lo deseable es que las fuentes de agua cruda no presenten una carga orgánica elevada. Por la naturaleza de estos parámetros, las normas de calidad de agua establecen que los causantes de la contaminación orgánica deben estar ausentes en las aguas para consumo humano.



Figura 3. Equipos, implementos e insumos empleados en la caracterización físico-química de las aguas residuales.



Cuantificación de los sólidos presentes en aguas residuales. Como materia sólida se clasifica toda la materia, excepto el agua, contenida en los materiales líquidos. En saneamiento básico es necesario medir la cantidad de materia sólida contenida en una gran cantidad de sustancias líquidas que van desde aguas potables hasta aguas contaminadas (aguas residuales domésticas e industriales). Altos valores de sólidos en las aguas residuales (mayores a 500 ppm) pueden evidenciar problemas de contaminación.

Para la cuantificación de los sólidos presentes en las aguas residuales se utilizan los siguientes parámetros:

Sólidos totales (ST): son los que permanecen después de secar una muestra de agua residual a 105°C (Figura 4). Están constituidos por los sólidos suspendidos totales y los sólidos disueltos totales.

Figura 4. Estufa utilizada en la determinación de sólidos.



Sólidos suspendidos totales (SST): son el residuo no filtrable o material no disuelto presente en el agua residual (Figura 5).

Figura 5. Papel filtro utilizado en la determinación de sólidos suspendidos.

Sólidos sedimentables: son el volumen de sólidos que sedimenta en una hora por cada litro de agua residual, en un cono de Imhoff (Figura 6).

Figura 6. Determinación de sólidos sedimentables en conos Imhoff.



Cuantificación del nitrógeno presente en aguas residuales. Las formas de nitrógeno de mayor importancia en las aguas residuales son nitrato, nitrito, amoníaco y nitrógeno orgánico. La eliminación de nitrógeno se hace en varias fases. El nitrógeno se cuantifica de acuerdo con la metodología establecida en el manual Estándar métodos (APHA, AWWA, WPCF, 1992) (Figura 7).



Figura 7. Determinación del nitrógeno por el método Kjeldahl.

Cuantificación del fósforo presente en aguas residuales. El fósforo se encuentra en las aguas residuales casi exclusivamente en forma de fosfatos, clasificados en ortofosfatos y polifosfatos (Figura 8). El fósforo se cuantifica de acuerdo con la metodología establecida en el manual Estándar métodos (APHA, AWWA, WPCF, 1992).



Figura 8. Determinación de fósforo en aguas residuales.

Otros parámetros con significado sanitario

pH: es una medida de la acidez o alcalinidad de un agua residual. La escala de medición cubre el rango de 0 hasta 14 (siendo 7 el valor que representa la neutralidad). Valores de este parámetro por encima de 7 muestran condiciones de alcalinidad del agua, y por debajo de 7 representan condiciones de acidez del agua residual, que en muchos casos pueden evidenciar la presencia de sustancias contaminantes en el agua (Figura 9).



Figura 9. Equipo para la determinación de pH.

Coliformes totales y fecales. La evaluación de la calidad microbiológica del agua se efectúa mediante la determinación de indicadores. Los que comúnmente se utilizan son los coliformes totales, los coliformes termotolerantes (fecales), la *Escherichia coli* y las bacterias heterotróficas mesófilas aerobias viables (Aurazo, 2004).

Los coliformes son bacterias que habitan en el intestino de los mamíferos y también se presentan como saprófitos en el ambiente, excepto la *Escherichia*, que tiene origen intestinal. Los coliformes se determinan mediante filtración por membrana (Figura 10), de acuerdo a lo establecido en el manual Estándar métodos (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

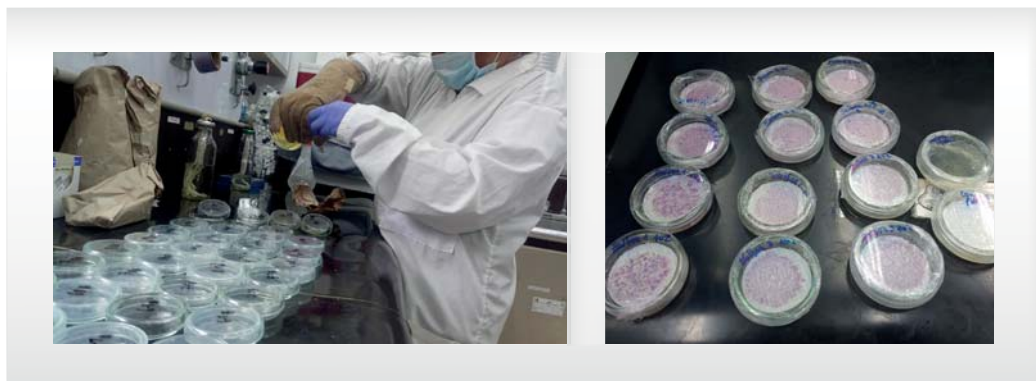


Figura 10. Determinación de coliformes totales y fecales.

Tipos de tratamiento de aguas residuales

Una vez conocidas las características físico-químicas y microbiológicas de las aguas residuales y teniendo muy presentes los objetivos de calidad deseadas en los efluentes tratados (dependiendo de las normativas vigentes o del uso posterior que se le quiera dar al recurso), es necesario seleccionar los tratamientos que desde el punto de vista técnico y económico sean los apropiados para realizar la depuración. Por lo general, lo que se busca es reducir los contaminantes presentes en el agua para verterla como un residuo inocuo al medio ambiente.

En el tratamiento de las aguas residuales generalmente es necesario combinar varias operaciones unitarias, cuyas bases pueden ser físicas, químicas o biológicas, con el propósito de eliminar, en primer lugar, el material en suspensión, luego las sustancias coloidales, y finalmente las sustancias disueltas.

Los tratamientos de las aguas residuales pueden clasificarse según el medio de eliminación de los contaminantes, la fase de depuración y el costo.

Según el medio de eliminación de los contaminantes, los tratamientos pueden ser:

Físicos: son aquellos en los cuales predomina la aplicación de fuerzas físicas; entre ellos podemos encontrar desbaste (utilizando rejillas o tamices que permitan retener material grueso), desengrasado (utilizando tanques que permitan la flotación de las grasas, detergentes y espumas), sedimentación (utilizando tanques sedimentadores que favorezcan el asentamiento del material particulado), filtración (utilización de filtros para retener sólidos en suspensión), evaporación (utilización de energía para permitir el cambio de estado del agua) y adsorción (utilización de materiales para retención de sólidos).

Químicos: son aquellos en los cuales la eliminación de los contaminantes se realiza mediante la adición de productos químicos, como es el caso de la adición de sales de hierro y aluminio para permitir la coagulación y floculación de las sustancias contaminantes o la adición de compuestos de calcio para retirar por precipitación compuestos de fósforo.

Biológicos: son los métodos de tratamiento en los cuales la eliminación de contaminantes es provocada por una actividad biológica. Los tratamientos biológicos más comunes son: lodos activos (utilización de microorganismos aeróbicos en presencia de burbujeo de aire o agitación de las aguas), filtros bacterianos (utilización de microorganismos adheridos a un soporte, en el cual se introduce oxígeno suficiente para asegurar la actividad microbiana), lagunaje (utilización de lagunas aireadas o sin airear,

en presencia de microorganismos), digestión anaeróbica (utilización de microorganismos que no necesitan oxígeno para su metabolismo).

Según la fase de depuración de los contaminantes, los tratamientos pueden ser:

Tratamiento preliminar: está destinado a preparar las aguas residuales para que puedan recibir un tratamiento posterior. Tiene como objetivo remover objetos grandes, evitando que se presente obstrucción de tuberías, presencia de sólidos flotantes, variación del caudal, entre otros, utilizando procesos físicos (manuales o mecánicos). Las unidades de tratamiento preliminar más utilizadas son las rejillas, los desengrasadores, los tanques de compensación y los desarenadores. En los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en las fincas cafeteras este tratamiento se realiza a través de la trampa de grasas, mientras que en los sistemas de tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café este tratamiento se realiza a través de la trampa de pulpas.

Tratamiento primario: consiste en la eliminación de una parte de los sólidos suspendidos y de la materia orgánica presente en el agua residual a través de procesos físicos (sedimentación, flotación y filtración), en algunos casos con procesos químicos (coagulación) y en otros con procesos biológicos (hidrólisis y acidogénesis). En los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en las fincas cafeteras este tratamiento se realiza a través del tanque séptico, y en los sistemas de tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café este tratamiento se realiza a través del reactor hidrolítico - acidogénico.

Tratamiento secundario: consiste en la transformación de compuestos que están en forma de sólidos disueltos en compuestos estables, por medio de tratamientos físicos (tratamiento térmico), químicos (precipitación y neutralización), o biológicos (lagunaje, lodos activados, filtros biológicos, biodiscos, reactores anaeróbicos de manto de lodos, UASB). En los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en las fincas cafeteras este tratamiento se realiza a través del filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA), y en los sistemas de tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café este tratamiento se realiza a través del reactor metanogénico.

Tratamiento terciario: es el último paso del tratamiento del agua residual con el fin de pulir el efluente del tratamiento secundario, eliminando elementos como el nitrógeno, fósforo, potasio y calcio, entre otros. En este paso pueden aplicarse tratamientos físicos (filtros), químicos (desinfección con compuestos de cloro) y biológicos (utilización de humedales). En los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas y del café este tratamiento se realiza a través de humedales artificiales.

Según el costo, los sistemas de tratamiento pueden clasificarse en:

Tecnologías de bajo costo: presentan, entre otras, las siguientes características:

- Facilidad de operación y mantenimiento.
- No se necesita personal especializado en su manejo.
- Requieren amplios tiempos de respuesta.
- Uso de equipamiento sencillo.
- Bajos costos energéticos.
- Buena integración en el medio rural.
- Rendimientos entre aceptables y buenos.
- Muy aptos en el sector agrícola.

En estas tecnologías pueden clasificarse los sistemas sépticos, los sistemas modulares de tratamiento anaerobio de las aguas residuales del café (SMTA), los biodigestores y los humedales artificiales.

Tecnologías convencionales: presentan las siguientes características:

- Requieren de instrumentación.
- Requieren mano de obra especializada.
- Tienen altos costos de inversión y operación.
- Baja integración al medio rural.
- Buenos resultados en depuración.

En estas tecnologías pueden clasificarse las plantas de lodos activados y los sistemas de tratamiento de mantos de lodos.







Tratamiento de aguas en fincas cafeteras

POTABILIZACIÓN
DEL AGUA

3

Sistemas de potabilización y abastecimiento del agua

El agua para el consumo humano debe cumplir con los requerimientos establecidos en el Decreto 1575 del 2007 y en la Resolución 2115 del 2007 que la hacen apta para ser ingerida y que la califican como agua potable. De acuerdo con el RAS (2000), las dotaciones netas de agua por persona-día, para usuarios de acueductos con bajo nivel de complejidad (< 2.500 habitantes) son del orden de 100 a 150 L (Tabla 4).

La dotación neta corresponde a la cantidad mínima de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante sin considerar las pérdidas que ocurran en el sistema de acueducto. De acuerdo con datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), las cantidades de agua potable necesarias para la preparación de alimentos oscila entre 2 y 3 L/persona-día y como bebida entre 3-4 L/persona-día.

Tabla 4. Dotaciones de consumo (Fuente: RAS, 2000, Título B).

Nivel de complejidad del sistema	Población (habitantes)	Dotación neta mínima (L/hab - día)	Dotación neta máxima (L/hab - día)
Bajo	< 2.500	100	150
Medio	2.501 a 12.500	120	175
Medio alto	12.501 a 60.000	130	-
Alto	>60.000	150	-

De acuerdo con la caracterización de las microcuencas GIA, se estableció que solo el 31,2% de las fincas encuestadas tienen servicio de acueducto que les suministra agua potable. Dependiendo de la calidad del agua de la fuente (agua cruda), en las fincas cafeteras pueden utilizarse varios métodos sencillos para obtener agua apta para el consumo, tales como la destilación y la filtración.

Destilación casera para la obtención de agua potable¹

En las fincas cafeteras pueden acondicionarse algunos utensilios de la cocina para realizar una destilación del agua cruda. El agua destilada obtenida permite cumplir con todos los parámetros exigidos para el agua para consumo humano, pues está exenta de contaminantes químicos y biológicos.

A continuación se presentan los materiales y el procedimiento para obtener agua potable en fincas cafeteras mediante un proceso de destilación, con el fin de satisfacer las necesidades de agua para consumo (5 a 7 L/persona-día).

¹ RODRÍGUEZ V., N.; CASTAÑEDA, S.A.; QUINTERO Y., L.V.; OSORIO O., A.F. Evaluación de un sistema de destilación casero para la potabilización de agua cruda en fincas cafeteras. Manizales: Cenicafé, 2016. 7 p.

Materiales necesarios:

- ✓ Olla a presión o tetera.
- ✓ Fuente calórica (energía eléctrica, gas natural, gas propano, leña).
- ✓ Serpentín de enfriamiento fabricado con varilla de aluminio $\frac{1}{4}$ ".
- ✓ Recipiente plástico para el almacenamiento del agua de enfriamiento.
- ✓ Recipiente plástico para el almacenamiento de agua destilada.
- ✓ Recipiente plástico para la salida del agua de enfriamiento.

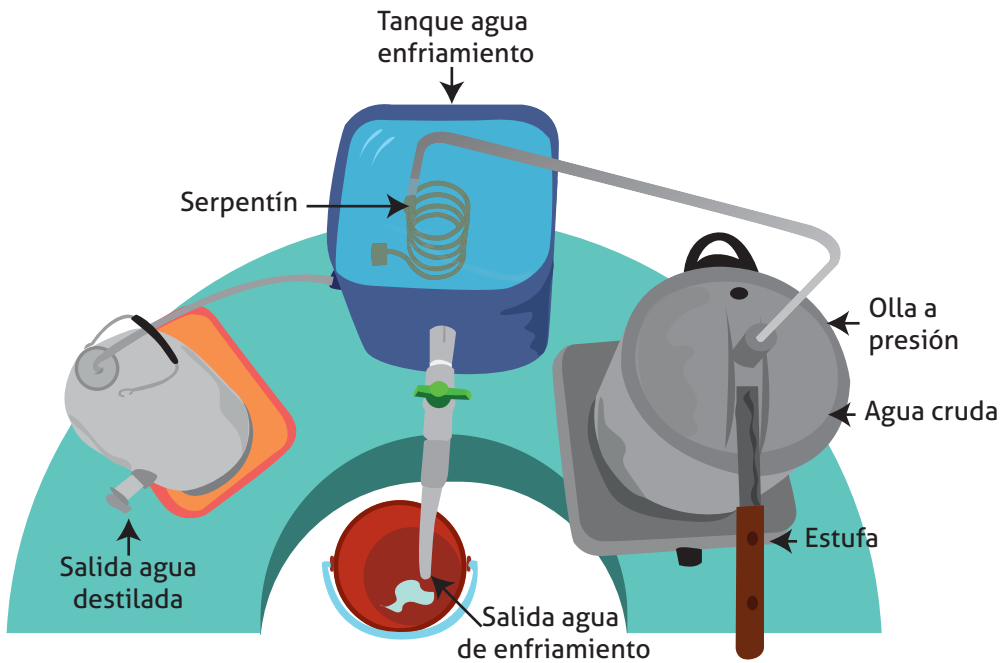


Figura 11. Sistema de destilación con olla a presión.

Sistema de destilación con olla a presión. Consiste en adaptarle a la salida del vapor de la tapa de la olla a presión, (una vez retirada la válvula o tope), un espiral elaborado con varilla de aluminio de $\frac{1}{4}$ ", el cual se sumerge en un recipiente que contenga agua, con el fin de condensar el vapor de agua; al extremo libre del espiral o serpentín en aluminio se debe adaptar una manguera que conduzca el agua hasta un recipiente de almacenamiento (Figura 11). Se recomienda adaptarle al recipiente en el cual está sumergido el espiral, una válvula que permita la descarga del agua de enfriamiento cuando sea necesario realizar el recambio, ya sea por presencia de algas o de materiales suspendidos en la misma.

El agua cruda se coloca dentro de la olla, la cual se tapa y se coloca sobre una fuente de calor hasta que se logre destilar por lo menos entre el 60%-70% del agua cruda inicial.

Sistema de destilación con tetera. Otra forma de obtener el agua destilada es mediante el uso de una tetera, a la cual se le acopla un serpentín elaborado con varilla de aluminio, el cual se sumerge en un tanque conteniendo agua para el enfriamiento del vapor generado. Al extremo libre del serpentín se le adapta una manguera para transportar el agua destilada hasta el recipiente de almacenamiento (Figura 12).

El agua cruda se coloca dentro de la tetera, la cual se tapa y se coloca sobre una fuente de calor hasta que se logre destilar por lo menos entre el 60% y el 70% del agua cruda inicial.

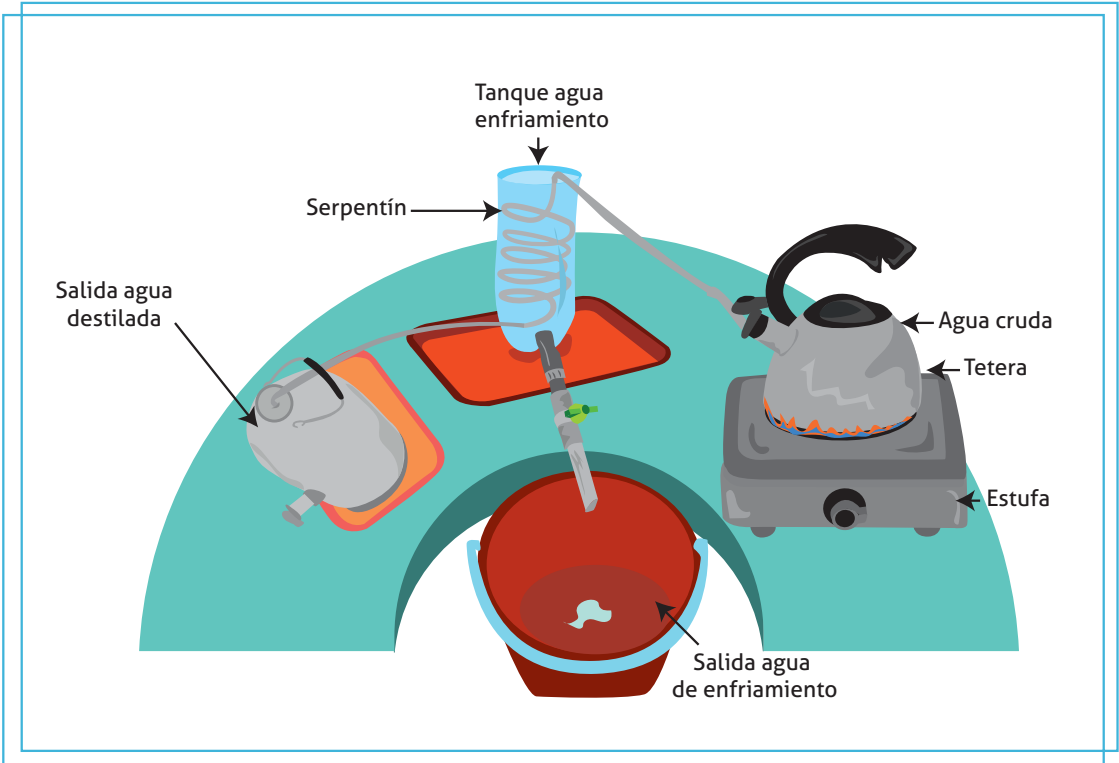


Figura 12. Sistema de destilación con tetera.

Rendimiento del proceso de destilación

En la Tabla 5 se presenta la información de la cantidad de agua cargada en la tetera (2,5 L) y en la olla a presión (6,0 L) en diferentes ensayos; de igual forma se presentan los tiempos de destilación y la cantidad de agua obtenida.

Tabla 5. Cantidad de agua generada y tiempo de destilación.

Tipo de sistema	Cantidad de agua cruda (l)	Tiempo de proceso (h)	Cantidad de agua destilada (L)	Cantidad de agua destilada (L/h)
Tetera	2,0	1,32	1,37	1,03
Tetera	2,0	1,24	1,45	1,17
Tetera	2,5	1,41	2,00	1,42
Pitadora	5,0	2,27	2,28	1,00
Pitadora	3,0	2,18	1,79	0,82
Pitadora	2,0	1,39	1,31	0,94

Caracterización del agua

En la Tabla 6 se presentan los resultados de las caracterizaciones del agua realizadas en tres evaluaciones y los valores exigidos en la Resolución 2115 del 2007 (en la cual se establecen los límites máximos permisibles para el agua potable).

Tabla 6. Resultados de los análisis del agua destilada vs la normativa de agua potable.

Parámetros	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Valor máximo permisible Resolución 2115
	Agua cruda	Agua destilada	Agua cruda	Agua destilada	Agua cruda	Agua destilada	
pH (unidades)	6,97	7,07	6,85	7,02	7,01	7,04	6,5-9,0
Color aparente (Un-Pt-Co)	14	0	15	0	14	0	15
Turbidez (NTU)	1	0	2	0	1	0	2
Sólidos totales (ppm)	230	12	150	10	180	8	500
COT (ppm)	24	12	22	10	23	11	5
Coliformes totales (UFC/100 mL)	Incontables	0	Incontables	0	Incontables	0	0
Coliformes fecales (UFC/100 mL)	34	0	37	0	43	0	0

De las variables monitoreadas, solo el carbono orgánico total superó el límite máximo de la norma. En promedio el valor final fue 11 ppm y la norma colombiana para el agua potable exige un valor máximo de 5 ppm. El puntaje asignado por el no cumplimiento del valor del parámetro es de 3, con lo cual el valor del índice de riesgo de la calidad del agua (IRCA) es del 3%, el cual se encuentra en la escala de 0% al 5%, con el cual se considera que no existe riesgo y que el agua es apta para consumo humano y que se debe continuar con el control y la vigilancia.

Costos

Para el cálculo de los costos se tuvo en cuenta la potencia de la estufa eléctrica utilizada en las evaluaciones, con el fin de encontrar los kilovatios por hora (kWh) necesarios para la producción de 1 L de agua destilada. A partir del consumo de energía por hora (en kWh) se realizaron los cálculos del costo de energía, utilizando otras fuentes energéticas como gas natural y gas propano. La idea principal es que los caficultores aprovechen el calor no utilizado de sus fogones de leña, que permanecen encendidos toda la jornada laboral.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los casos:

Energía eléctrica: teniendo en cuenta la cantidad de agua destilada y la potencia de la estufa (1,15 kWh), se calcularon los kilovatios por hora por litro de agua (kWh/L) requeridos. Los resultados se presentan Tabla 7.

Tabla 7. Agua destilada por hora y cantidad de kilovatios por hora (kWh) requeridos.

Cantidad de agua destilada (L/h)	kilovatios requeridos por litro de agua destilada (kw/L)
1,03	1,112
1,17	0,983
1,42	0,810
1,00	1,145
0,82	1,400
0,94	1,220
Promedio	1,11

En promedio, se requieren 1,11 kWh para producir 1 L de agua destilada. El costo promedio de 1 kWh en la ruralidad es de \$250 COP. En este sentido, generar un litro de agua destilada, utilizando energía eléctrica, tiene un costo de \$280 (USD 0,088), 1 USD = 3.200 COP.

Gas natural: teniendo como referencia que 1 m³ de gas natural equivale a 11,70 kWh, se requieren 0,0949 m³ de gas natural para generar 1 L de agua destilada. El costo de 1 m³ de gas natural en la zona rural es de \$900 COP, por lo que producir 1 L de agua destilada usando gas natural tiene un costo aproximado de \$85 COP (USD 0,027) (Tabla 8).

Gas propano: en el caso del gas propano se tomó como referencia una pipeta de gas promedio de 40 libras, lo cual equivale a 18 kg de gas propano y tiene un costo de \$48.000 COP. Aproximadamente 1 kg de gas propano equivale a 13,39 kWh. Para producir 1 L de agua destilada se necesitan 0,083 kg de propano, que en promedio tiene un costo de \$ 220 COP (USD 0,069) (Tabla 8).

Leña: también puede aprovecharse el calor generado en las cocinas campesinas que funcionan a base de leña, durante el tiempo que no se está utilizando en la cocción de alimentos.

Tabla 8. Costos de la potabilización de un litro de agua.

Fuente de energía	Costo USD/L	Cumple Norma Colombiana
Leña	N/A	Sí
Eléctrica	0,088	Sí
Gas propano	0,069	Sí
Gas natural	0,027	Sí

Sistemas de filtración casera²

Cuando se dispone de agua cruda de buena calidad, la cual puede evaluarse a través de las características físicas evaluadas a través de nuestros sentidos, tales como ausencia de color, turbidez, sólidos, olor y sabor, pueden utilizarse filtros caseros para acondicionar el agua para el consumo. Los mejores filtros son aquellos que tienen tamaños de partícula muy pequeños como los nanofiltros, con tamaños de partícula menores a 100 nm.

Filtros que incluyen nanofiltración (tamaño de partícula de 20 nm). El nanofiltro puede purificar, según su fabricante, hasta 20.000 l de agua cruda, con un ciclo de vida funcional de 3 años y un costo de USD 65, a una tasa de 210 L/día. El filtro tiene un mecanismo de auto-obstrucción. Si el filtro no suministra agua a pesar de la limpieza y lavado del prefiltro, significa que la vida útil ha finalizado.

El filtro funciona vertiendo el agua cruda en la cubeta plástica. En el interior de la cubeta existe una membrana la cual retiene las partículas sólidas del agua. Luego, el agua pasa por gravedad a través de una manguera de plástico y pasa por el cartucho que contiene la membrana purificadora la cual retiene contaminantes tales como bacterias, virus, parásitos y partículas finas. El agua limpia y segura queda lista para salir a través de la llave azul (Figura 13).

La suciedad acumulada dentro del cartucho purificador puede ser liberada a través de la llave de salida roja, presionando tres veces la pera roja de limpieza de la membrana, después del uso. El filtro funciona por simple gravedad y no requiere repuestos o mantenimiento que no sea limpieza; tampoco requiere pilas o electricidad.

² RODRÍGUEZ V., N. Evaluación de filtros caseros para la potabilización de agua. Informe anual de actividades 2015-2016. Manizales: Cenicafé, 2016. 51 p.

Filtro de micro-nanofiltración

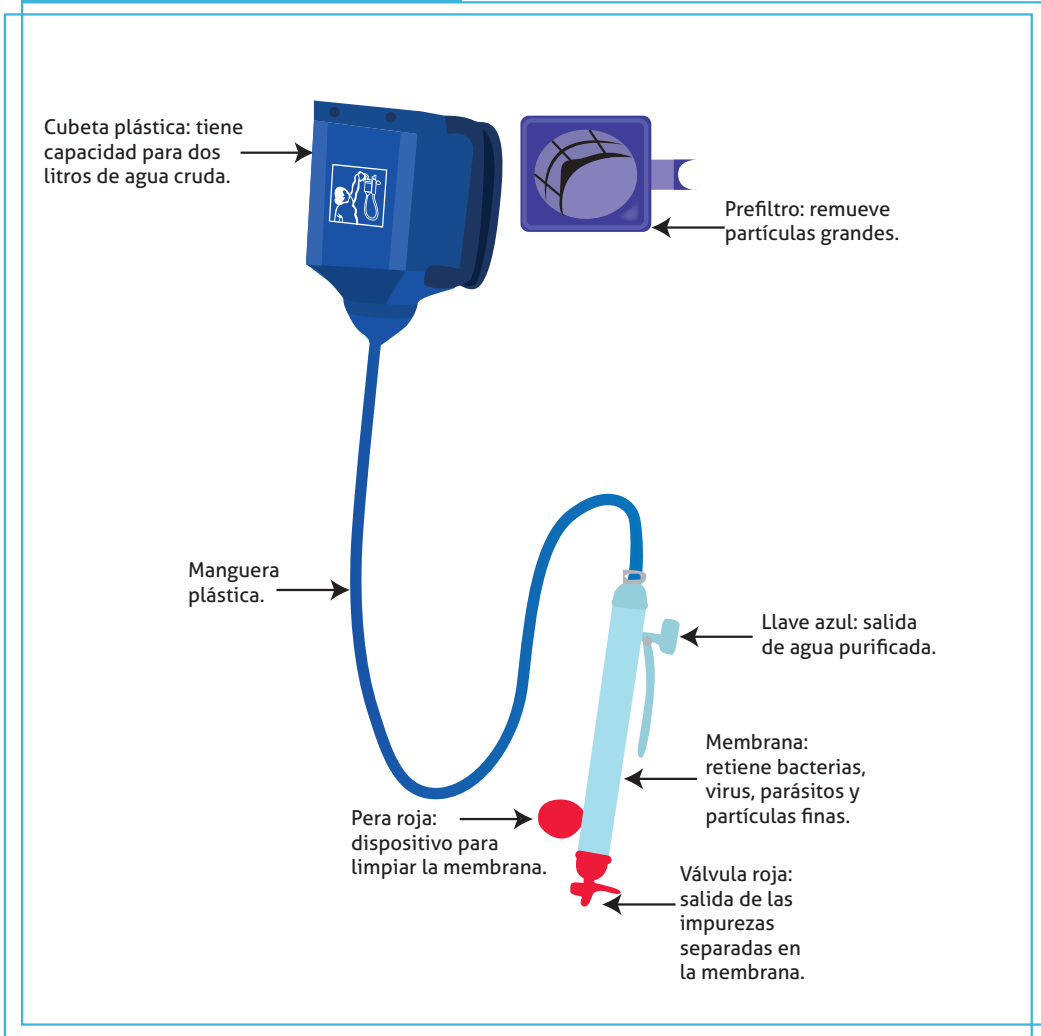


Figura 13. Sistema de nanofiltración Fuente: www.iwanagreen.com.

Filtros que incluyen microfiltración seguida de nanofiltración (Tamaño de partícula entre 1.000 nm y 20 nm). El filtro de micro-nanofiltración puede purificar, según su fabricante, hasta 15.000 l de agua cruda, con una vida útil de 2 años, un costo de USD 45, a una tasa de 33 l/día. Está elaborado con arcilla porosa y carbón activado, ambos tratados con un baño de plata coloidal. Es un proceso combinado de micro-filtración en cerámica y nano-filtración gota a gota, en una columna de carbón activado (Figura 14). No requiere de electricidad o presión para operar.

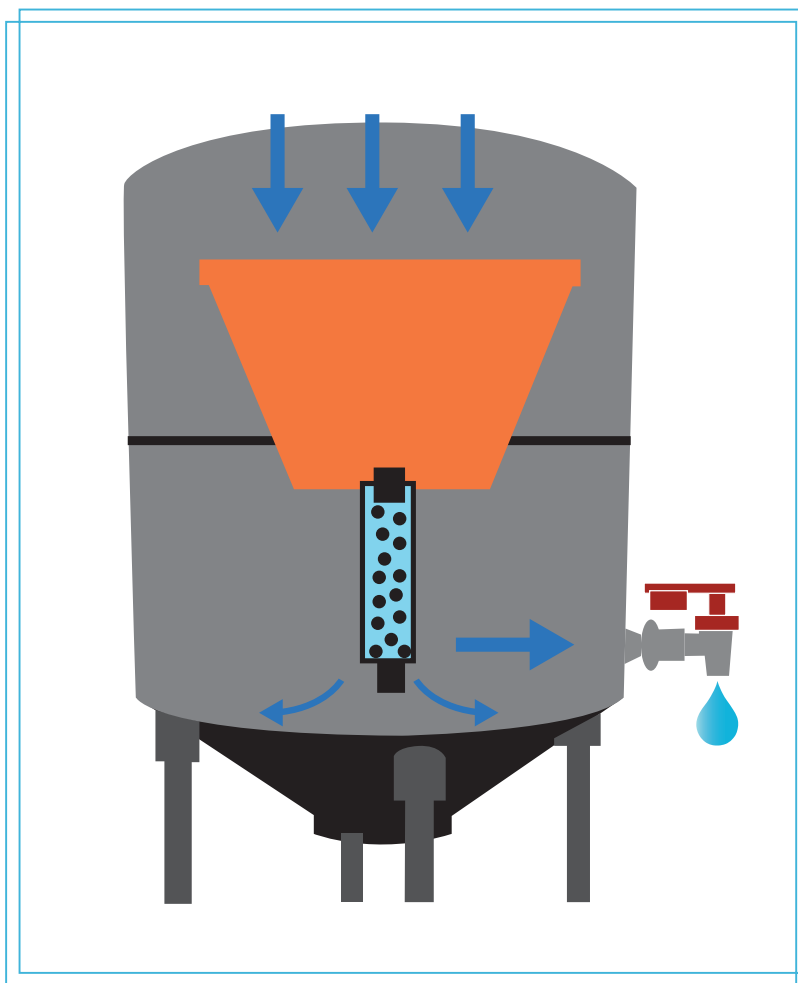


Figura 14. Sistema de microfiltración seguida de nanofiltración. Fuente: www.filtroekofil.com

El proceso de purificación del agua comprende básicamente tres etapas:

- **Micro-filtración** para la retención de elementos y organismos patógenos contaminantes. El agua cruda se coloca en el recipiente que está fabricado en arcilla porosa, con un tamaño promedio de poro de 1.000 nm.
- **Eliminación de microorganismos dañinos** por la acción germicida de la plata coloidal, impregnada tanto en la cerámica filtrante como en el carbón activado.
- **Filtración en una columna de carbón activado** para la eliminación y remoción total de microorganismos y elementos tóxicos de tamaños nanométricos. Una vez el agua ha pasado a través de la arcilla porosa por micro-filtración, se colecta en un recipiente intermedio que direcciona el agua para que descienda por gravedad en una columna de carbón activado, también impregnado con plata coloidal.

El mantenimiento del filtro se realiza lavando con agua limpia y cepillo, por lo menos cada 15 días, todos los componentes del sistema de filtración.

En la Figura 15 se muestra aspectos de la toma de muestra del agua filtrada.



Figura 15. Toma de muestras del agua filtrada.

En la Tabla 9 se presentan los resultados de purificación de agua cruda, utilizando los dos sistemas de filtración descritos.

Tabla 9. Resultados de los análisis del agua filtrada vs normativa de agua potable

Tipo de agua/ parámetros	Agua cruda	Agua del nanofiltro poro 20 nm	Agua del micro-nanofiltro Poro<1.000 nm	Valor máximo permisible Res. 2115 del 2007
pH (Unidades)	6,99	7,56	6,59	6,50 – 9,00
Color aparente(Un Pt-Co)	22	12	6	15
Turbidez (NTU)	4	2	1	2
Conductividad (μ S/cm)	139	134	159	1.000
Sólidos totales (ppm)	135	131	95	500
COT (ppm)	45	18	7	5
Coliformes totales (UFC/100 mL)	Incontables	0	0	0
Coliformes fecales (UFC/100 mL)	53	0	0	0
Fosfatos (ppm)	0,44	0,12	0,35	0,50
Nitratos (ppm)	1,60	0,40	1,00	10
IRCA	50,0	3	3	5

De las variables monitoreadas solo el carbono orgánico total superó el límite máximo de la norma. En promedio el valor final fue de 18 ppm para el agua proveniente del nanofiltro y de 7 ppm para el agua proveniente del micro-nanofiltro, mientras que la norma colombiana para el agua potable exige un valor máximo de 5 ppm. El puntaje asignado por el no cumplimiento del valor del parámetro es de 3, siendo **el valor del índice de riesgo de la calidad del agua (IRCA) del 3%, que se encuentra en la escala de 0% al 5%, para la cual se considera que no existe riesgo y que el agua es apta para consumo humano y debe continuarse con el control y la vigilancia.**

Los resultados permiten concluir que es posible obtener agua potable a través de los sistemas de filtración, siempre y cuando el agua que ingrese al filtro sea de buena calidad visual y organoléptica, que se utilicen nanofiltros con un tamaño de poro igual o inferior a 20 nm y se realice el mantenimiento y retrolavado del filtro permanentemente, con el fin de mantener su efectividad.

En la Tabla 10 se presentan los costos de purificación a través de los sistemas de filtración evaluados.

Tabla 10. Costo de los sistemas de filtración

Fuente de energía	Costo \$COP/litro de agua	Cumplimiento de norma de agua potable
Micro-nanofiltración	0,003	Sí
Nanofiltración	0,003	Sí

Si se considera una necesidad de agua para consumo (como bebida y en la preparación de alimentos) de 5 L/persona-día y familias compuestas por 4 personas, se tendrían unas necesidades básicas de suministro de agua potable de 20 L/día, que pueden obtenerse con los métodos de destilación y filtración.

Dentro del Proyecto GIA se instalaron 900 nanofiltros familiares y 64 nanofiltros comunitarios para proveer agua de consumo a los beneficiados del proyecto (Figura 16).

El 82% de los nanofiltros evaluados mantuvo una eficiencia completa en la eliminación de coliformes fecales, que permiten obtener agua de calidad microbiológica.

Se evidenciaron varias causas por las cuales los nanofiltros no generaron agua potable: **1.** Pérdida de la vida útil del nanofiltro por la cantidad de agua tratada. **2.** Contaminación cruzada que permitió la contaminación del agua tratada. **3.** Falta de retrolavado del filtro, perdiendo su eficiencia. **4.** Muy mala calidad del agua cruda que llega al nanofiltro.



Figura 16. Nanofiltros comunitarios.

Para el buen funcionamiento de los filtros purificadores, y de acuerdo con lo observado en la práctica, se recomienda:

- Ubicar el filtro en un sitio limpio, alejado de fuentes contaminantes.
- Realizarle un retrolavado diario y limpieza externa.
- Cuando se observe que el agua que se desea filtrar presenta olor, color o material suspendido, debe realizarse un pretratamiento utilizando un filtro de arena, antes de que el agua ingrese al nanofiltro.
- Manipular el filtro con las manos limpias.

Debe tenerse en cuenta que los filtros funcionan de manera adecuada cuando el agua a tratar proviene de una fuente de agua de buena calidad. Si las fuentes de agua son de calidad media, mala o muy mala, la eficacia de los filtros baja considerablemente.







Tratamiento de aguas en fincas cafeteras

**TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DOMÉSTICAS**

4

Tratamiento de aguas residuales domésticas

El Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia, con la Resolución 1096 del año 2000 adopta el Reglamento de Agua Potable y Saneamiento (RAS) como el documento técnico que fija los criterios básicos y requisitos mínimos que deben reunir los diferentes procesos involucrados en la conceptualización, el diseño, la construcción, la supervisión técnica, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, de agua potable y saneamiento básico, con el fin de garantizar su seguridad, durabilidad, funcionalidad, calidad, eficiencia y sostenibilidad.

Sistemas de tratamiento en el sitio de origen (RAS, 2000)

Son aquellos que se utilizan en lugares aislados, donde no existen redes de alcantarillado o donde se requiere remover sólidos suspendidos antes de verter el agua residual al sistema de alcantarillado.

Antes de proceder a diseñar un sistema de tratamiento en el sitio es necesario obtener la siguiente información:

- Cantidad y calidad del agua residual.
- Tipo de suelo y permeabilidad.
- Temperatura (media mensual y anual).
- Uso de la tierra.
- Requerimientos de calidad para descargas superficiales y subsuperficiales.
- Pendiente del terreno.

Sistemas sépticos para el tratamiento de las aguas residuales domésticas

Uno de los sistemas más eficientes y utilizados para el tratamiento de las aguas residuales domésticas son los sistemas sépticos, los cuales están constituidos por cuatro unidades: trampa de grasas, tanque séptico, filtro anaeróbico y campo de infiltración.

La selección del lugar apropiado para instalar el sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas, es una variable importante que debe estudiarse. Algunas normas generales que deben seguirse son:

- Debe ubicarse en sitios donde no genere contaminación de cuerpos de agua.
- No debe localizarse en zonas con nivel freático alto (nivel bajo el cual el suelo se encuentra saturado de agua) o propensas a posibles inundaciones.
- Debe instalarse en un sitio que permita el flujo, por gravedad, de las tuberías domiciliarias.
- En general, deben buscarse terrenos planos que permitan realizar la menor excavación posible.
- Deben instalarse lejos de árboles y arbustos, cuyas raíces puedan desnivelar y romper las unidades del sistema.

Componentes del sistema séptico

A continuación, se describen cada una de las unidades del sistema séptico y se indica cómo se realiza el diseño, dimensionamiento y mantenimiento de las mismas.

Trampa de grasas

Tienen como propósito separar físicamente la grasa de las aguas residuales de la cocina, la ducha y el lavadero. Las aguas residuales se mueven más despacio al entrar en la trampa, permitiendo que las partículas de grasa, que son más ligeras que el agua, se enfríen, solidifiquen y floten, permitiendo que el agua sin grasa ingrese al tanque séptico (Figuras 17 y 18).

Se construyen con tanques pequeños de flotación, generalmente de acero inoxidable, hormigón o materiales plásticos resistentes, donde la grasa se localiza en la superficie, y es retenida mientras el agua aclarada sale por una descarga inferior. No lleva partes mecánicas.

Localización

Deben localizarse lo más cerca posible de la fuente de agua residual (cocina, lavadero, ducha) y aguas arriba del tanque séptico, para prevenir problemas de obstrucción y malos olores en las unidades siguientes del sistema de tratamiento.

Parámetros de diseño

El diseño debe realizarse de acuerdo con las características propias y el caudal del agua residual a tratar, teniendo en cuenta que la capacidad de almacenamiento mínimo, expresada en kilogramos (kg) de grasa, debe ser de por lo menos una cuarta parte del caudal de diseño (caudal máximo horario) expresado en litros por minuto (l/min).

El tanque debe tener 0,25 m² de área por cada litro por segundo, una relación ancho:largo de 1:4 hasta 1:18, una velocidad ascendente mínima de 4 mm/s. En las Tablas 11 y 12 pueden consultarse los caudales, capacidades de retención y tiempos de retención hidráulica típicos que deben usarse para las trampas de grasa.

Entradas y salidas

El diámetro de la tubería de entrada debe ser mínimo de 2", a través de un codo, y el diámetro de la tubería de salida entre 2" y 4", a través de una T. El extremo final del tubo de entrada debe estar sumergido por lo menos a 0,35 m. El tubo de salida debe localizarse por lo menos a 0,15 m del fondo del tanque y debe estar sumergido, de ser posible, por lo menos a 0,90 m.

La distancia entre los dispositivos de entrada y salida debe ser lo suficiente para retener la grasa y evitar que este material sea arrastrado con el efluente, con la mínima turbulencia para permitir la flotación de la grasa y su diferencia de nivel debe ser por lo menos de 5 cm.

Tabla 11. Capacidades de retención de grasa (Fuente: RAS, 2000).

Tipo de afluente	Caudal (L/min)	Capacidad de retención de grasa (kg)	Capacidad máxima recomendada (L)
Cocina	56	14	190
Habitación sencilla	72	18	190
Habitación doble	92	23	240
Dos habitaciones sencillas	92	23	240
Dos habitaciones dobles	128	32	330
Lavaplateo volumen de agua mayor de 115 L	56	14	115
Lavaplateo volumen de agua mayor de 190 L	92	23	240
Lavaplateo volumen entre 190 y 378 L	144	36	378

Tabla 12. Tiempos de retención hidráulico (Fuente: RAS, 2000).

Tiempo de retención (minutos)	Caudal de entrada (L/min)
3	120 - 540
4	600 - 1.140
5	1.200 ó más

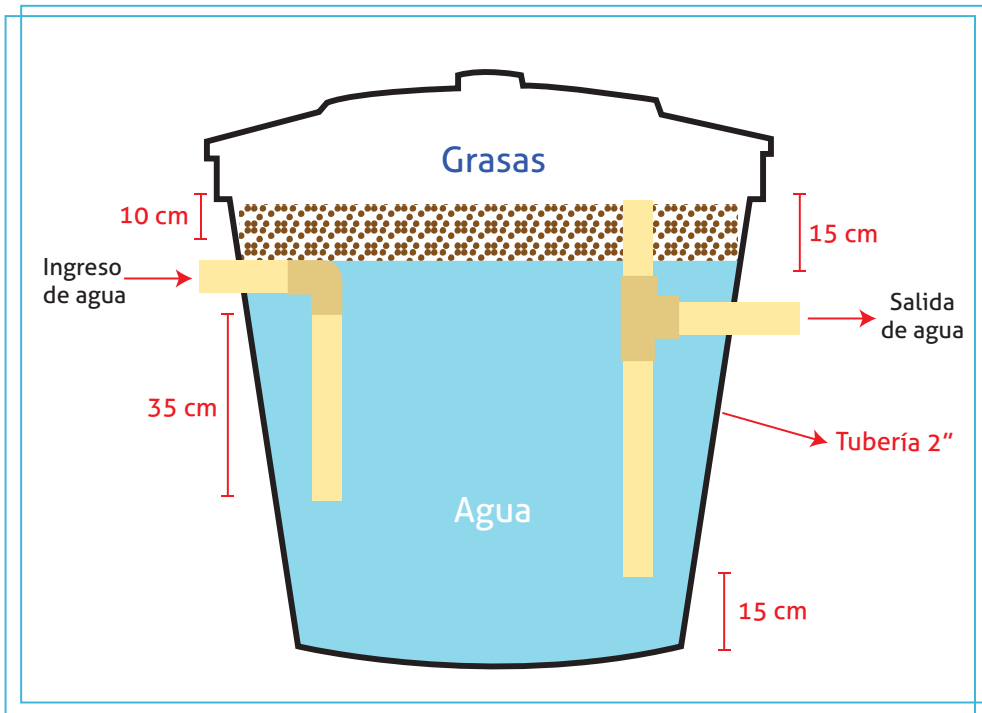


Figura 17. Trampa de grasas.



Figura 18. Aspecto de las grasas flotantes de la trampa de grasas.

Operación y mantenimiento

Las trampas de grasa deben 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.

Se recomienda una frecuencia de mantenimiento trimestral, aplicando el siguiente protocolo:

- Levante la tapa de la trampa de grasa con cuidado.
- Elimine los residuos de la trampa de grasa con ayuda de un recipiente.
- Raspe la tapa y los lados de la trampa con una espátula. Retire los depósitos (trozos) grandes de grasa o aceites que se acumulan en la trampa y colóquelos en un recipiente.
- Vuelva a instalar las partes de la trampa de grasa y cierre la tapa de la trampa.
- Mezcle las grasas retiradas de la trampa con cal apagada en relación 1:1, y disponga la mezcla en los procesadores de pulpa de café, para su compostaje y obtención de abono orgánico.

Tanque o pozo séptico (RAS, 2000)

Es un sistema individual de disposición de aguas residuales para una vivienda o conjunto de viviendas, que combina la sedimentación y la digestión. Los sólidos sedimentados acumulados se remueven periódicamente y se descargan normalmente en una instalación de tratamiento. Son tanques generalmente subterráneos o medio-enterrados, sellados, diseñados y construidos para el saneamiento rural. Deben llevar un sistema de postratamiento.

Se recomiendan solamente para:

- Áreas desprovistas de redes públicas de alcantarillados.
- Alternativa de tratamiento de aguas residuales en áreas que cuentan con redes de alcantarillado locales.
- Retención previa de los sólidos sedimentables, cuando la red de alcantarillado presenta diámetros reducidos.

No está permitido que les entre:

- Aguas lluvia ni desechos capaces de causar interferencia negativa en cualquier fase del proceso de tratamiento.

Tipos de pozos sépticos

- Según el material: de concreto, fibra de vidrio o polietileno.
- Según la geometría: rectangulares o cilíndricos.

Localización del pozo séptico

Deben conservarse las siguientes distancias mínimas:

- 1,50 m de distancia de construcciones, límites de terrenos, sumideros y campos de infiltración.
- 3,0 m de distancia de árboles y cualquier punto de redes públicas de abastecimiento de agua.
- 15,0 m de distancia de pozos subterráneos y cuerpos de agua de cualquier naturaleza.

Geometría del pozo séptico

Los tanques pueden ser cilíndricos o rectangulares (Figura 19). Los cilíndricos se utilizan cuando se quiere minimizar el área útil, aumentando la profundidad; y los prismáticos rectangulares en los casos en que se requiera mayor área horizontal o mayor profundidad. En la Tabla 13 se presentan los valores mínimos y máximos de la profundidad útil del tanque.

Tabla 13. Valores de profundidad útil (RAS, 2000).

Volumen útil (m ³)	Profundidad útil mínima (m)	Profundidad útil máxima (m)
Hasta 6	1,2	2,2
De 6 a 10	1,5	2,5
Más de 10	1,8	2,8

El diámetro interno mínimo de los tanques debe ser de 1,10 m; el largo interno mínimo de 0,80 m y la relación ancho:largo mínima para tanques rectangulares de 2:1 y máxima de 4:1.

Se recomiendan unidades múltiples, en serie, para tanques de volúmenes pequeños a medianos, que sirvan hasta 30 personas. Para otro tipo de tanques se recomienda lo siguiente:

- Tanques cilíndricos: tres unidades en serie.
- Tanques prismáticos rectangulares: dos unidades en serie.



Figura 19. Tanques sépticos instalados en el departamento del Cauca.

Dimensionamiento del tanque séptico (RAS, 2000)

El tanque séptico se diseña con los siguientes parámetros: **1.** Número de contribuyentes. **2.** Contribución de aguas residuales: L/hab-día. **3.** Contribución de lodo fresco: L/hab-día. **4.** Intervalo de limpieza en años. **5.** Tasa de acumulación de lodos digeridos (F), días. **6.** Tiempo de retención, días. **7.** Volumen útil.

Para el cálculo del volumen útil del tanque séptico se utiliza la Ecuación **3** :

$$V_U = 1.000 + N_c (C \times T + K \times L_f) \quad \text{3}$$

Donde:

N_c : número de contribuyentes.

C : contribución de aguas residuales por habitante (L/día) (Tabla 14) .

T : tiempo de retención en días (Tabla 15).

K : tasa de acumulación de lodo digerido (días) (Tabla 16) .

L_f : contribución de lodo fresco (L/hab-día) (Tabla 14).

Tabla 14. Contribución de aguas residuales y lodo fresco para ocupantes permanentes y temporales (RAS, 2000).

Tipo ocupantes	Predio	Unidad	Contribución de aguas residuales (C) y lodo fresco Lf (L/día)	
			C (L/hab-día)	Lf (L/día)
Ocupantes permanentes	Clase alta	Persona	160	1,0
	Clase media	Persona	130	1,0
	Clase baja	Persona	100	1,0
	Hotel (excepto lavandería y cocina)	Persona	100	1,0
	Alojamiento provisional	Persona	80	1,0
Ocupantes temporales	Fábrica en general	Persona	70	0,3
	Oficinas temporales	Persona	50	0,2
	Edificios públicos o comerciales	Persona	50	0,2
	Escuelas	Persona	50	0,2
	Bares	Persona	6	0,1
	Restaurantes	Comida	25	0,01
	Cines, teatros o locales de corta permanencia	Local	2	0,02
	Baños públicos	Tasa sanitaria	480	4,0

Tabla 15. Tiempo de retención de acuerdo a la contribución de aguas residuales (RAS, 2000).

Contribución diaria (L)	Tiempo de retención (TR)	
	Días	Horas
Hasta 1.500	1,00	24
De 1.501 a 3.000	0,92	22
De 3.001 a 4.500	0,83	20
De 4.501 a 6.000	0,75	18
De 6.001 a 7.500	0,67	16
De 7.501 a 9.000	0,58	14
> 9.000	0,50	12



Tabla 16. Tasa de acumulación de lodos digeridos de acuerdo al intervalo de limpieza (RAS, 2000).

Intervalo de limpieza (años)	Valores de K por intervalo de temperatura ambiente (T) en °C		
	T ≤ 10	10 ≤ T ≤ 20	T > 20
1	94	65	57
2	134	105	97
3	174	145	137
4	214	185	177
5	254	225	217

Instalación del tanque

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). Sobre el fondo de la excavación debe vaciarse una cama de arena o material limpio y libre de piedras angulares de la misma excavación, nivelada y compactada, sobre la cual se apoyará el tanque. Posteriormente se realizan las conexiones entre los accesorios de PVC. Para equilibrar presiones, el tanque debe llenarse con agua hasta el nivel inferior de la tubería de salida y, seguidamente, en el espacio comprendido entre las paredes del tanque y las de la excavación deben adicionarse capas de arena compactadas una a una, con un pisón.

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 2", a través de una T. El extremo final del tubo de entrada debe estar sumergido por lo menos a 0,35 m y el tubo de salida debe estar sumergido por lo menos 0,45 m. La distancia entre los dispositivos de entrada y salida debe ser suficientemente amplia para retener la grasa y evitar que este material sea arrastrado con el efluente, y con la mínima turbulencia para permitir la flotación de la grasa, con una diferencia de nivel de por lo menos 5 cm.

El tamaño, la forma y la disposición de los tubos de entrada y salida están diseñados para que las aguas negras permanezcan en el tanque un mínimo de 24 horas, con el fin de que se efectúen procesos bioquímicos y físicos que permitan el apropiado tratamiento de las aguas residuales.

Para los tanques sépticos semienterrados o instalados sobre la superficie del suelo se recomienda que su color sea negro para aprovechar de forma eficiente la energía solar que reciben (Figura 21).

Resultados experimentales de la evaluación de tanques de polietileno negro con aditivo UV (que los protege de los rayos ultravioleta), semienterrados o instalados sobre la superficie, realizadas en Cenicafé han mostrado una vida útil de 25 años, sin que se evidencien daños por condiciones ambientales.

Funciones del tanque séptico

El tanque séptico tiene las siguientes funciones:

Separar los sólidos de la parte líquida, actuando como un sedimentador. Los sólidos más pesados se precipitan como lodo en el fondo del tanque y parte de la grasa, que puede provenir de los servicios sanitarios y las partículas de menor densidad que el agua, ascienden a la superficie, formando una nata.

Permitir una degradación inicial de la materia orgánica. El ambiente al interior del tanque contiene cantidades bajas de oxígeno, permitiendo el desarrollo de microorganismos anaerobios que descomponen la materia orgánica en gases, principalmente CO_2 y CH_4 .

Almacenamiento de lodos y natas. El tanque se diseña considerando los tiempos de limpieza y evacuación de lodos.

Permitir que el agua residual que llega al filtro anaeróbico (siguiente unidad del sistema séptico) esté clarificada. En el tercio medio del tanque el líquido queda clarificado, debido a que en la parte superior se depositan las natas y en la parte inferior los lodos (Figura 20).

Teniendo en cuenta que únicamente pueden llegar al tanque séptico las aguas negras provenientes de la vivienda, las aguas lluvias debe separarse para evitar que ingresen al sistema de tratamiento.

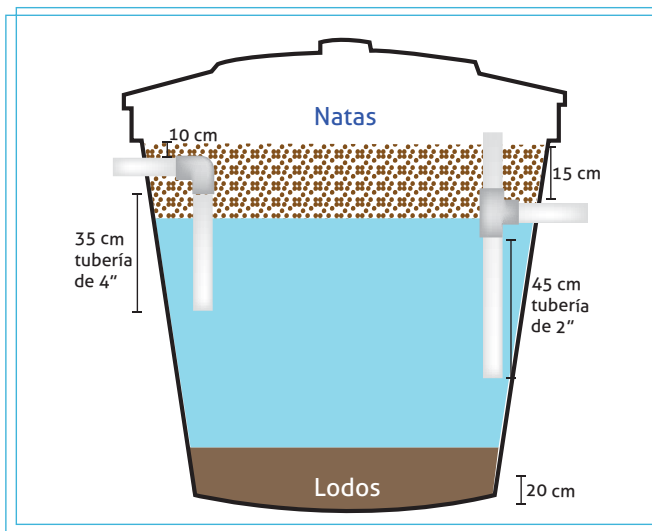


Figura 20. Detalles del tanque séptico

Los tanques sépticos pueden estar completamente enterrados -solo la tapa sobresale-, semienterrados o instalados sobre la superficie del suelo. Todas estas instalaciones presentan ventajas y desventajas, a saber:

Los tanques completamente enterrados presentan como ventaja que existe un menor riesgo de daño del tanque por efecto de las condiciones ambientales y menores riesgos de daño por algún tipo de impacto. Como desventaja se tiene que su mantenimiento puede ser menos práctico y que no se aprovecha la energía solar que favorece la actividad de los microorganismos responsables del tratamiento del agua.

Los tanques instalados sobre el suelo presentan como ventaja el aprovechamiento de la energía solar que favorece la actividad de los microorganismos responsables del tratamiento del agua, y hace más práctico el mantenimiento del sistema. Como desventaja se tiene el mayor riesgo de daño del tanque por efecto de las condiciones ambientales o por algún tipo de impacto.

Los tanques semienterrados (hasta la mitad), disminuyen los riesgos de daños por impacto y por condiciones ambientales, y aprovechan la energía solar en parte de su superficie, lo que favorece la actividad de los microorganismos responsables del tratamiento del agua y facilitan las labores de mantenimiento (Figura 21).



Figura 21. Tanques sépticos semienterrados.

Operación y mantenimiento (RAS, 2000)

Los lodos y las espumas acumuladas deben ser removidos en intervalos equivalentes al período de limpieza del diseño, el cual con frecuencia se establece en 1 año. Estos intervalos se pueden ampliar o disminuir, siempre que estas alteraciones sean justificadas y no afecten los rendimientos de operación ni se presenten olores indeseables.

Debe realizarse una remoción periódica de lodos por personal capacitado, que disponga del equipo adecuado para garantizar que no haya contacto entre el lodo y las personas. Antes de cualquier operación en el interior del tanque, la cubierta debe mantenerse abierta durante un tiempo suficiente (>15 min) para la remoción de gases tóxicos o explosivos.

En ningún caso los lodos removidos pueden arrojarse a cuerpos de agua. En zonas aisladas, los lodos pueden disponerse en lechos de secado (que se describen más adelante). Los lodos secos pueden disponerse en rellenos sanitarios o en campos agrícolas, cuando estos últimos no estén dedicados al cultivo de hortalizas, frutas o legumbres que se consumen crudas.

Se recomienda retirar anualmente las natas y el lodo en exceso acumulados en el tanque séptico; para retirar los lodos se aconseja utilizar un dispositivo de sifón invertido. Las natas retiradas deben mezclarse con cal apagada en relación 1:1 y disponer la mezcla en los procesadores de pulpa de café, para su compostaje y obtención de abono orgánico.

Eliminación de lodos³

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, pues la oportuna eliminación de los mismos contribuye a disminuir la colmatación del filtro anaerobio que se instala a continuación del tanque séptico, disminuye la generación de malos olores y permite mantener la capacidad de almacenamiento y el tiempo de retención del agua residual.

Para facilitar esta práctica, a través del proyecto GIA se ha evaluado la eliminación de lodos con el principio del sifón invertido.

En la parte interna del tanque séptico, junto a una de las paredes, se ubica un tubo en PVC-P de 1 ½" que llegue desde el borde superior del tanque hasta 20 cm antes del fondo, y con un corte a 45° en el extremo inferior (Figura 22).

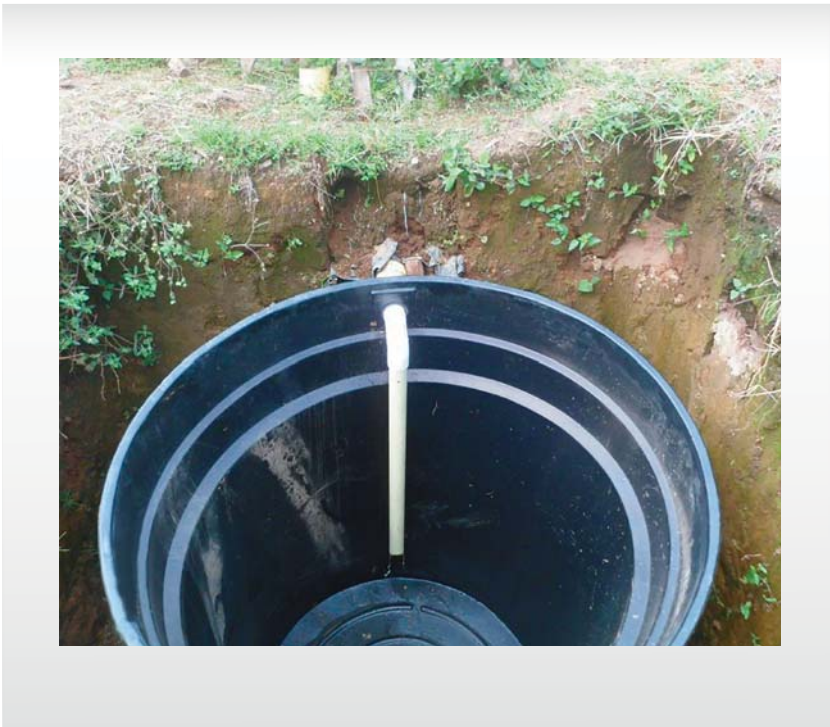


Figura 22. Tubo interno del tanque séptico para la eliminación de lodos.

³ RODRÍGUEZ V., N.; CASTAÑEDA, S.A.; QUINTERO Y. Construya un dispositivo para la evacuación de los lodos generados en las plantas de tratamiento y un lecho para su secado. Manizales: Cenicafé, 2016. 10 p.

En el extremo superior se acopla un codo PVC-P de 1 ½" seguido de un tubo de 8 cm de longitud PVC-P de 1 ½", de un adaptador hembra PVC-P de 1 ½" y de una arandela de neolite con perforación interna de 1 ½", cuya parte lisa se coloca en contacto con la pared interna del tanque, a la cual se le realiza una perforación interna de 1 ½". Hacia la pared externa del tanque, junto al orificio realizado, se coloca otro empaque de neolite (de las mismas características anteriores), con la parte lisa en contacto con la pared externa del tanque, un adaptador macho PVC-P de 1 ½" seguido de un tubo de 12 cm de longitud PVC-P de 1 ½" y un tapón liso PVC-P de 1 ½". Este dispositivo de salida permanece así hasta el momento de realizar la evacuación de lodos.

Aparte se construye el dispositivo externo de eliminación de lodos (Figura 23) que se acoplará al tapón liso que se encuentra ubicado en la parte externa del tanque séptico, el cual consta de una Tee PVC-P de 1 ½" y un tubo de 15 cm de longitud PVC-P de 1 ½" colocado en la parte central de la Tee. A continuación se acopla en uno de los extremos de la Tee un tubo de 8 cm de longitud PVC-P de 1 ½", un codo PVC-P de 1 ½", un tubo PVC-P de 1 ½" que llegue hasta el suelo, un codo PVC-P de 1 ½" y un tubo PVC-P de 1 ½" de 20 cm de longitud al cual se acopla un adaptador hembra 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 de la manguera se acopla un adaptador macho de polietileno de 1 ½", un adaptador hembra PVC-P de 1 ½", un tubo de 20 cm de longitud PVC-P de 1 ½" y una llave de paso lisa PVC-P de 1 ½" para controlar la salida del lodo.



Figura 23. Dispositivo externo para la eliminación de lodos.

Para la eliminación de los lodos se retira el tapón liso ubicado en la parte externa del tanque séptico, se acopla el dispositivo externo descrito anteriormente, acoplando el tapón liso, retirado, sobre la tubería ubicada en la parte central de la Tee, como se muestra en la Figura 24.



Figura 24. Acoplamiento del dispositivo de sifón invertido para la eliminación de lodos.

Luego se retira el tapón liso ubicado encima de la "T" y se adiciona agua para purgar el sistema (Figura 25), teniendo la precaución de tener cerrada la llave de paso. Cuando el agua llene toda la tubería se coloca de nuevo el tapón y se abre la llave de paso para retirar los lodos (Figura 26).



Figura 25. Purga del sistema para la eliminación de lodos.



Figura 26. Salida de lodos.

Los efluentes de los tanques sépticos no deben ser dispuestos directamente en un cuerpo de agua superficial; deben ser tratados adicionalmente para mejorar la calidad del vertimiento.

Lechos de secado de lodos (RAS, 2000)

Son construcciones que permiten eliminar una cantidad suficiente de agua de los lodos retirados del tanque séptico, para que estos puedan ser manejados como material sólido.

Un lecho de secado debe ser diseñado para retener, en una o más secciones, el volumen total de lodo removido del tanque séptico. Los elementos estructurales del lecho incluyen: muros laterales, tuberías de drenaje, capas de arena y grava, divisiones o tabiques, decantadores, canales de distribución de lodo y muros.

Los muros laterales deben tener un borde libre entre 0,5 y 0,9 m por encima de la arena, asegurándose de que no existan filtraciones laterales a través de los muros separadores. En la Tabla 17 aparecen los valores de área requerida por habitante según el tipo de lodo a secar.

Tabla 17. Área requerida según la fuente del lodo y el cubrimiento del lecho (RAS, 2000).

Fuente de lodo inicial	Área (m ² /hab) (lecho sin cobertura)	Área (m ² /hab) (lecho con cobertura)
Primario	0,07 – 0,14	0,05 – 0,09
Primario más químicos	0,14 – 0,23	0,09 – 0,173
Primario más filtros percoladores de baja tasa	0,12 – 0,17	0,086 – 0,145
Primario más lodos activados de desecho	0,16 – 0,51	0,094 – 0,156

Como medios de drenaje se recomienda utilizar capas de grava con espesores entre 20 y 46 cm y capas de arena con espesores entre 30 y 46 cm.

Las partículas de grava deben presentar un diámetro entre 3 y 25 mm. La arena debe tener partículas limpias, duras, durables y libres de arcilla, polvo, ceniza u otro material extraño, con un tamaño de partícula entre 0,30 y 0,75 mm. En la Figura 27 se presenta la secuencia de construcción de los lechos de secado.

Una vez determinada el área necesaria para el secado de los lodos, se determina el ancho y largo de los lechos (de acuerdo con el área disponible en el terreno). Se realiza la excavación y se ubica la tubería de aireación; después se impermeabiliza el fondo con plástico o geomembrana y se adicionan la capa de grava y arena, y el ladrillo.

La recolección de percolados se efectúa a través de tuberías de drenaje de 4", con una pendiente mayor al 1%, localizada por debajo de la capa de grava.

Finalmente, se construye una cubierta que proporcione un techo al lecho de secado. La necesidad de utilizarla depende de las condiciones ambientales de la zona. Su uso se recomienda en zonas de alta precipitación.

Se debe realizar mantenimiento a los lechos, que contemple los siguientes aspectos:

- Control de olores.
- Control del lodo influente.
- Control de las dosificaciones.
- Operación bajo condiciones de carga mínima y máxima.
- Operación bajo condiciones de caudal mínimo y caudal máximo.
- Programa de inspección periódico.
- Control de insectos y crecimiento de plantas.
- Manejo de la torta de lodos seca.





1
Excavaciones y ubicación de tubería de aireación



2
Impermeabilización de los lechos de secado



3
Adición capa de grava



4
Adición de la capa de arena



5
Empaque con ladrillo



6
Construcción del techo para los lechos de secado



7
Aspecto final de los lechos de secado



8
Canales de descarga

Figura 27. Proceso de construcción de lechos de secado de lodos.

Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA)

Dado que en el tanque séptico ocurre una separación líquido-sólido, principalmente, su eficiencia en la eliminación de la carga orgánica contaminante de las aguas residuales domésticas está alrededor del 30%-40% (RAS, 2000), siendo necesario realizarle un tratamiento posterior al agua de salida del tanque séptico, con el fin de lograr el cumplimiento de los valores máximos admisibles de los parámetros establecidos por la normativa colombiana para descargas al suelo y a cuerpos de agua superficiales.

Una de las opciones técnicas y económicas para realizar este postratamiento es el filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA), que consiste en un tanque de polietileno empacado con material filtrante en el cual el agua residual proveniente del tanque séptico llega hasta 10 cm antes del fondo y asciende a través del medio filtrante, sobre el cual se establecen microorganismos anaerobios encargados de realizar un tratamiento biológico al agua residual pre-tratada en el tanque séptico, eliminando entre el 60%-80% de la carga orgánica contaminante que ingresa a la unidad (RAS, 2000). El agua tratada sale por la parte alta del FAFA. El efluente podrá ser dirigido a un humedal artificial y luego a un campo de infiltración o a un pozo de absorción.

Ubicación

El filtro anaeróbico se instala recibiendo las aguas provenientes del tanque séptico.

Diseño del filtro anaerobio

El volumen útil del filtro anaeróbico se calcula de acuerdo a la [Ecuación 4](#), recomendada en el RAS- 2000, Título E.

$$V_f = 1,60 * N * C * T \quad 4$$

Donde:

V_f : Volumen útil, m³

N : Número de contribuyentes

C : Contribución de aguas residuales por habitante (L/día)

T : Tiempo de retención en días

El filtro anaerobio puede llenarse con cualquiera de los siguientes medios filtrantes:

- Grava gruesa de 2 ½".
- Trozos de guadua de 7,5 a 10 cm de diámetro y de 10 a 15 cm de longitud.
- Tubos de polietileno de 2" a 3" de diámetro y de 10 cm de longitud.
- Recortes de llanta picados en trozos de 5 x 5 cm.
- Tusas de maíz.
- Trozos de botellas no retornables.

Para el diseño se requiere conocer los datos de porosidad y la superficie específica de los medios filtrantes a utilizar en los filtros anaerobios, los cuales pueden consultarse en la Tabla 18.

Tabla 18. Características de algunos medios filtrantes (RAS, 2000).

Material filtrante	Porosidad (%)	Área superficial (m ² /m ³)	Referencia
Botellas no retornables	98,7	52	Orozco, 2003
Trozos de guadua	77,8	48	Zambrano, 1999
Tusas de maíz	55,6	172	Rendón, 2014
Arena-gravosa	86,0		
Rosetones		100	

Con el valor de la porosidad del medio filtrante se calcula el volumen efectivo del filtro anaeróbico, dividiendo el volumen útil (Vu) entre el valor de la porosidad como fracción (Ecuación 5).

$$V_{total \text{ filtro anaeróbico}} = Vu / \text{porosidad del medio filtrante} \quad 5$$

Instalación

El filtro anaerobio se instala de la misma manera que el tanque séptico (Figura 28). Una vez está listo el hueco, se coloca el tanque enterrado total o parcialmente y se instalan la tubería y demás accesorios, teniendo presente que la tubería de entrada de 2" llega hasta 10 cm antes del fondo del tanque. Se deposita el material filtrante de manera aleatoria y se llena con agua hasta 5 cm por debajo del tubo de salida, el cual también debe ser de 2".

El flujo a través del filtro anaeróbico, que es ascendente, pasa por todo el medio filtrante, colocando en contacto el agua residual con los microorganismos adheridos al medio filtrante (Figura 29).

Operación y mantenimiento

Se recomienda hacer la inspección del filtro anaerobio cada 6 meses, de la siguiente forma:

- Destapar el tanque séptico y observar su nivel de agua.
- Si la tubería de salida del agua del tanque séptico está sumergida en el agua es porque el filtro FAFA está colmatado (taponado) y requiere mantenimiento.
- Destapar el FAFA. Introducir una barra metálica en el medio filtrante hasta tocar el fondo del tanque. Sacudir el medio filtrante realizando movimientos circulares con la barra de manera que la biocapa de bacterias se desprenda y pueda flotar.
- Introducir por la T de salida del filtro anaeróbico una manguera con agua a presión hasta el fondo del tanque, para realizar un flujo ascendente de agua limpia a través del tanque.
- Retirar la capa de biomasa flotante de la superficie y disponerla en el procesador de pulpa.



Figura 28. Filtros anaeróbicos semienterrados.

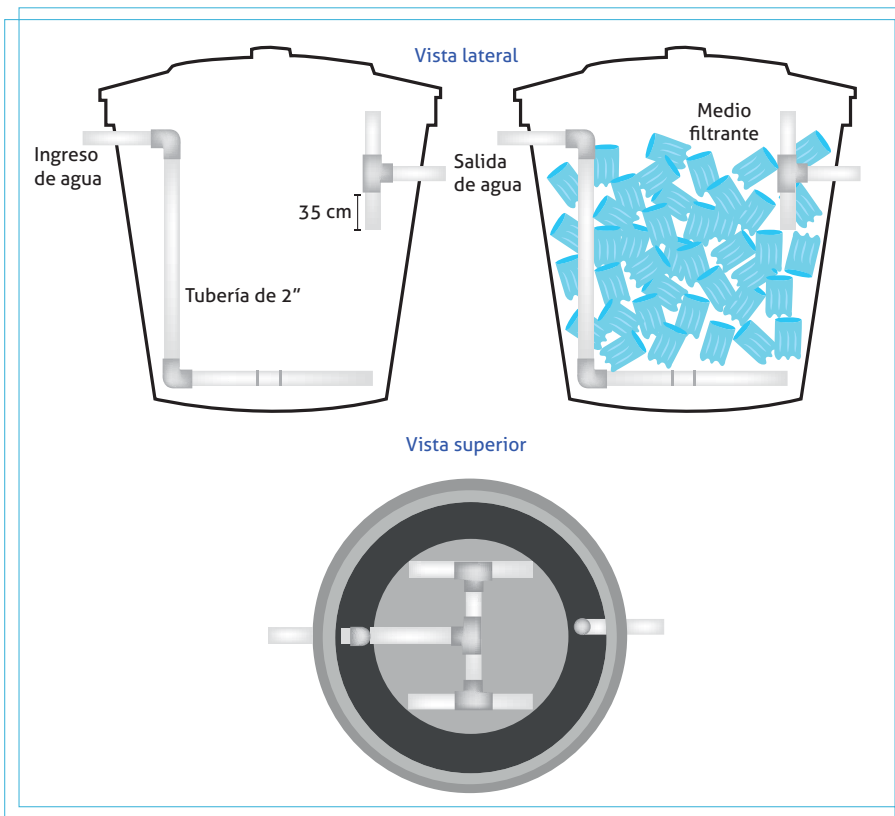


Figura 29. Características de los filtros anaeróbicos.

Humedales artificiales

Los humedales artificiales son aquellos construidos por el hombre, que simulan todas las características de las tierras húmedas naturales, y que ofrecen una alternativa para el tratamiento de aguas residuales con respecto a las plantas de tratamiento convencionales, dado que son relativamente económicos de construir y operar, de fácil mantenimiento, y que adicionalmente proporcionan un tratamiento efectivo y confiable para aguas residuales por ser relativamente tolerantes a las fluctuaciones hidrológicas y a las velocidades de carga contaminantes (Hammer, 1991).

Los sistemas de humedales se describen típicamente por la posición de la superficie del agua y el tipo de vegetación presente (U.S. EPA, 2000). Los humedales pueden clasificarse en sistemas de flujo horizontal, de flujo vertical o combinados.

Existen dos tipos de humedales artificiales de flujo horizontal desarrollados para el tratamiento de aguas residuales: sistemas de flujo libre (SHFL) y sistemas de flujo subsuperficial (SHFS) (Metcalf y Eddy, 1995).

Se definen como humedales artificiales de flujo libre superficial (SHFL) aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera (Figura 30). La mayoría de los humedales naturales son sistemas SHFL, entre los que se incluyen a los fangales (principalmente con vegetación de musgos), zonas pantanosas (principalmente de vegetación arbórea) y las praderas inundadas (principalmente con vegetación herbácea y macrófitas emergentes). La observación de la mejora en la calidad del agua en humedales naturales llevó al desarrollo de humedales artificiales para tratar de reproducir, en ecosistemas construidos, los beneficios de calidad del agua y hábitat. En los humedales SHFL el agua fluye sobre la superficie del suelo con vegetación desde un punto de entrada hasta el punto de descarga. En algunos casos el agua se pierde completamente por evapotranspiración y percolación en el humedal (U.S. EPA, 2000).

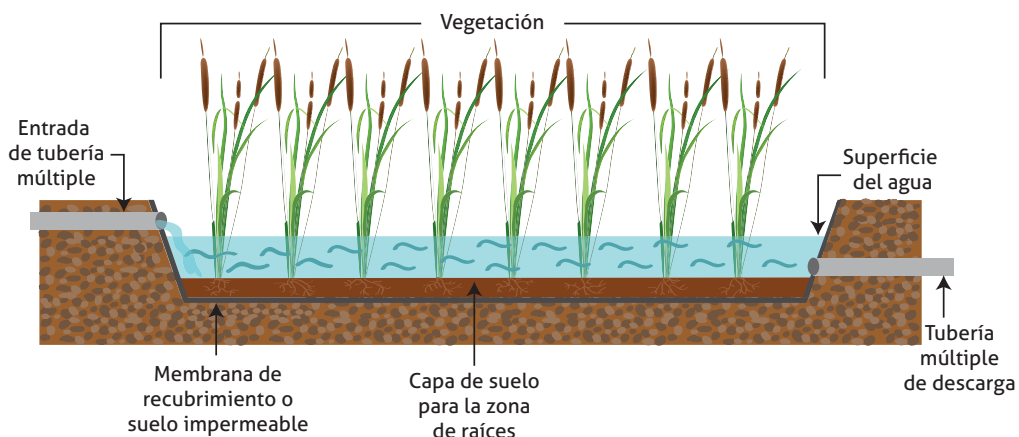


Figura 30. Esquema de un humedal de flujo libre superficial (Fuente: U.S. EPA, 2000).

Un humedal artificial de flujo subsuperficial (SHFS) está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual o su fase final de tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado. Como medio se utiliza grava, arena u otro tipo de materiales del suelo (Figura 31). El medio se cultiva con la vegetación emergente, y por diseño, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio (U.S. EPA, 2000).

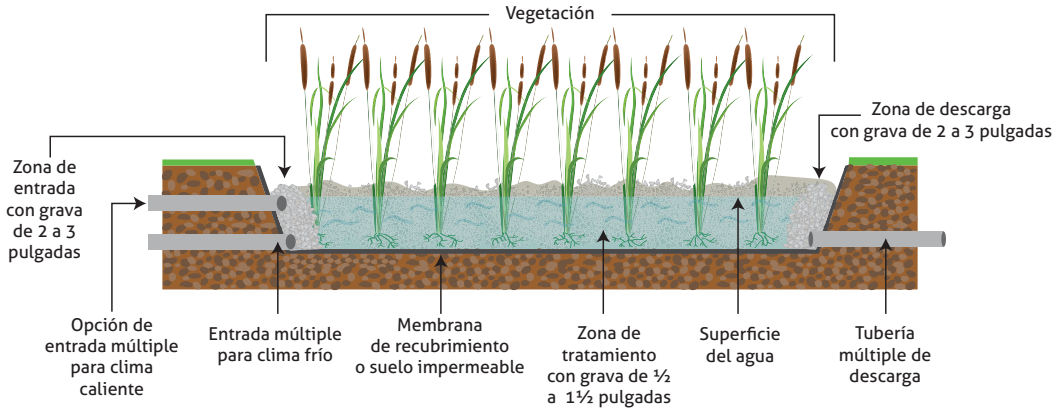


Figura 31. Esquema de un humedal de flujo subsuperficial (Fuente: U.S.EPA, 2000).

Ubicación

Los humedales deben localizarse aguas abajo de un tanque séptico o de un filtro anaeróbico. Para esto debe hacerse una evaluación de las características del suelo, localización de cuerpos de agua, topografía, localización geográfica, líneas de propiedad y vegetación existente para localizar adecuadamente el humedal (RAS, 2000).

Diseño del humedal artificial

Debe seleccionarse una metodología que garantice el correcto funcionamiento del sistema, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Conductividad hidráulica.
- Granulometría.
- Flujo sumergido para todas las condiciones de caudales.

Además se recomiendan los siguientes parámetros para el caso de humedales de flujo subsuperficial:

Área superficial: para la determinación del área superficial del humedal se recomiendan dos alternativas:

- Usar los siguientes valores de carga hidráulica: 0,032 m²/L-día (para zonas frías o donde haya restricciones de espacio) y 0,021 m²/L-día (para zonas cálidas o donde haya restricciones de espacio).

b) Método incluyendo la cinética del proceso Ecuación 6 :

$$A_s = l \cdot W = \left[\frac{Q \ln \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{K_t \cdot d \cdot n} \right] \quad 6$$

Donde:

As: Área superficial necesaria, m²

L: Longitud del estanque, m

W: Ancho del estanque, m

n: Porosidad

d: Profundidad del estanque, m

Ce: Concentración de DQO, DBO del efluente, mg/L

Co: Concentración de DQO, DBO del afluente, mg/L

KT: Constante de velocidad de primer orden dependiente de la temperatura, d⁻¹

Q: Caudal medio, m³/d

La profundidad del humedal se fija en 0,5 m y la porosidad de la piedra utilizada como medio de soporte fue calculada en 0,45 (roca triturada) por Rodríguez (2009).

$KT = K_{20} (1,06)^{(T-20)}$, T en °C (Reed *et al.*, 1995, citado por Rodríguez, 2009).

$K_{20} = 0,678 \text{ d}^{-1}$ (Reed *et al.*, 1995, citado por Rodríguez, 2009), para aguas residuales domésticas.

Sección transversal: se calcula mediante la ley de Darcy que describe el régimen de flujo en un medio poroso y es aceptada para ser utilizada en el diseño de los humedales con flujo subsuperficial que utilizan como medio en el lecho, suelo o grava (Ecuación 7)

$$A_c = \left[\frac{Q}{K_s \cdot S} \right] \quad 7$$

Donde:

A_c: Área transversal, m²

Q: Caudal medio, m³/día

K_s: Conductividad hidráulica, m³/m²-día

S: Pendiente del depósito, m/m (como fracción)

Para los humedales SHFS la velocidad de flujo K_s x S debe limitarse a 6,8 m/día para minimizar el arrastre localizado de películas biológicas (Metcalf y Eddy, 1995). La conductividad utilizada para el diseño nunca puede ser mayor que la del medio de soporte; debe reducirse dicha conductividad en un orden de magnitud para tener en cuenta los efectos de atascamiento asociados a la retención de sólidos en los humedales.

Ancho del estanque (W) (Metcalf y Eddy, 1995). El ancho del estanque se calcula mediante la Ecuación 8.

$$W = \left(\frac{A_c}{d} \right) \quad 8$$

Donde:

W : Ancho del estanque (m).

A_c : Área transversal (m²).

d : Profundidad del estanque (m).

Tiempo de detención hidráulico: para la determinación del tiempo de detención en humedales de flujo subsuperficial diseñados para la eliminación de DQO y DBO, se ha propuesto un modelo que asume flujo ideal de pistón (Ecuación 9).

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp \left[-K_t \cdot t \right] \quad 9$$

Donde:

C_e : Concentración de DQO, DBO del efluente (mg/L).

C_o : Concentración de DQO, DBO del afluente (mg/L).

K_t : Constante de velocidad de primer orden dependiente de la temperatura (d⁻¹).

t : Tiempo de detención real (días).

En la Tabla 19 se indican las características de los medios habitualmente empleados en sistemas SHFS, según Reed *et al.* (1995).

Tabla 19. Características típicas del medio en humedales de flujo subsuperficial (Fuente: Reed et al., 1995).

Tipo de medio	Tamaño efectivo D10* (mm)	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, Ks (m ³ /m ² /d)
Arena gruesa	2	28 a 32	100 a 1.000
Arena con grava	8	30 a 35	500 a 5.000
Grava fina	16	35 a 38	1.000 a 10.000
Grava mediana	32	36 a 40	10.000 a 50.000
Roca triturada	128	38 a 45	50.000 a 250.000

Diseño hidráulico (Reed, Crites y Middlebrooks, 1995): el diseño hidráulico de un humedal artificial es crítico para el éxito de su rendimiento. Todos los modelos de diseño que se usan actualmente asumen condiciones uniformes de flujo pistón, además no existen restricciones para el contacto entre los constituyentes del agua residual y los organismos responsables del tratamiento.

La relación largo:ancho tiene gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema. En teoría, grandes relaciones largo: ancho 10:1 o mayores asegurarían un flujo a pistón, pero en la parte alta se presentaría desbordamiento debido al incremento de la resistencia al flujo causado por la acumulación de residuos de vegetación, principalmente en sistemas de flujo libre superficial. Por lo tanto, relaciones 1:1 hasta aproximadamente 3:1 o 4:1 son aceptables.

Operación y mantenimiento

Una vez conocida el área necesaria del humedal, se procede a determinar el largo y el ancho, de tal forma que su relación no supere la razón 4:1, y se realizan las excavaciones con una profundidad de 0,5 m y una pendiente del 2%; luego, se impermeabiliza con geomembrana de 0,7 mm o con plástico negro calibre 6, incorporando los accesorios para la entrada y la salida del agua (la cual se ubica entre 5 y 10 cm por debajo de la superficie). Finalmente, se construye un marco en guadua para fijar el plástico o la geomembrana (Figura 32).





Trazado y excavación



Ubicación del plástico y empaques de caucho



Dispositivo de salida de cada laguna
(toma desde el fondo)



Disposición del marco para fijación
del material plástico

Figura 32. Construcción humedales horizontales de flujo subsuperficial (Fuente: Rodríguez, 2009).

Posteriormente se adiciona la grava para la siembra de las plantas, de tal forma que cubra el dispositivo de salida. Se utiliza grava de tamaño medio, aproximadamente entre 2 y 3 cm de diámetro (Figura 33).



Figura 33. Granulometría de la grava utilizada en los humedales
(Fuente: Rodríguez, 2009).

Paso seguido, se siembran plantas emergentes como la enea, pasto vetiver o platanillas (Figura 34), en cuadro, a una densidad de 30 plantas/m².

Para la siembra de las plantas se retira todo el material extraño adherido a las raíces, se siembran el mismo día de extracción de la planta y 5 cm por encima del fondo de las lagunas.

La elección de la vegetación depende del tipo de residuos, de la radiación solar, la temperatura, la estética, la vida silvestre deseada, las especies nativas y la profundidad del humedal.

En la Figura 35 se presentan los humedales construidos en el Proyecto de Gestión Inteligente del Agua - GIA.

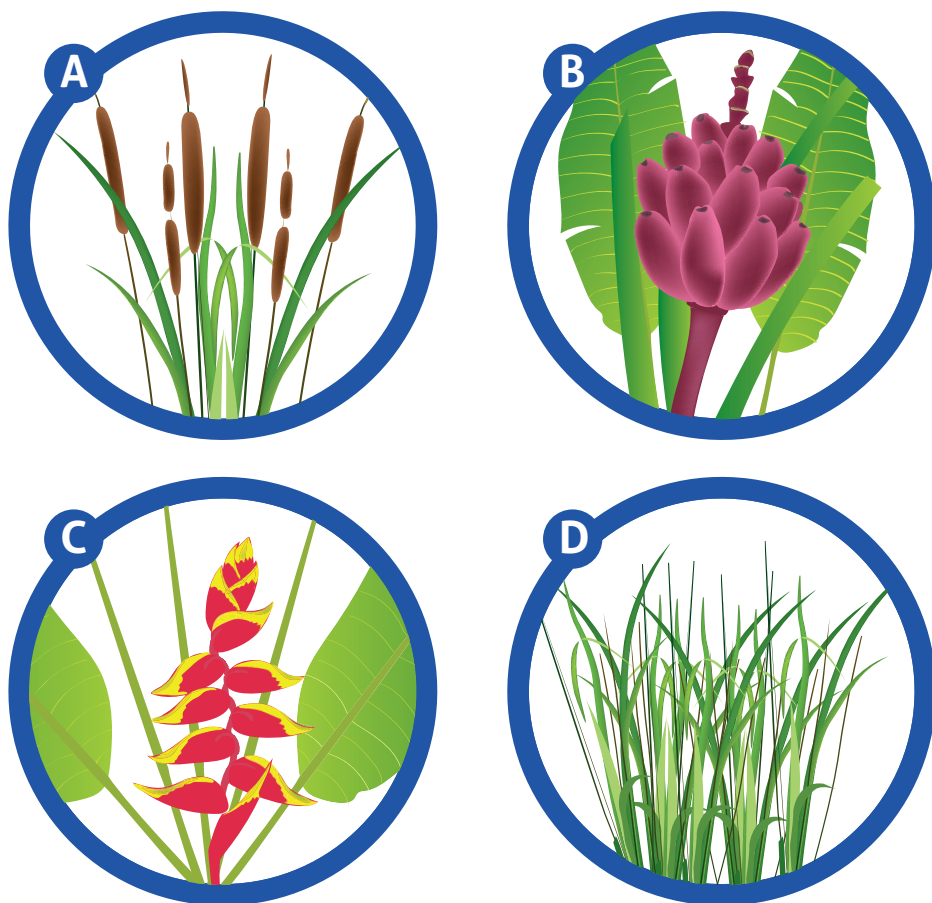


Figura 34. Plantas utilizadas en los humedales. A. Enea (*Typha* spp); B. Bananito rojo (*Musa coccinea*); C. Heliconias (*Heliconia* spp); D. Pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) (Fuente: Rodríguez, 2009).

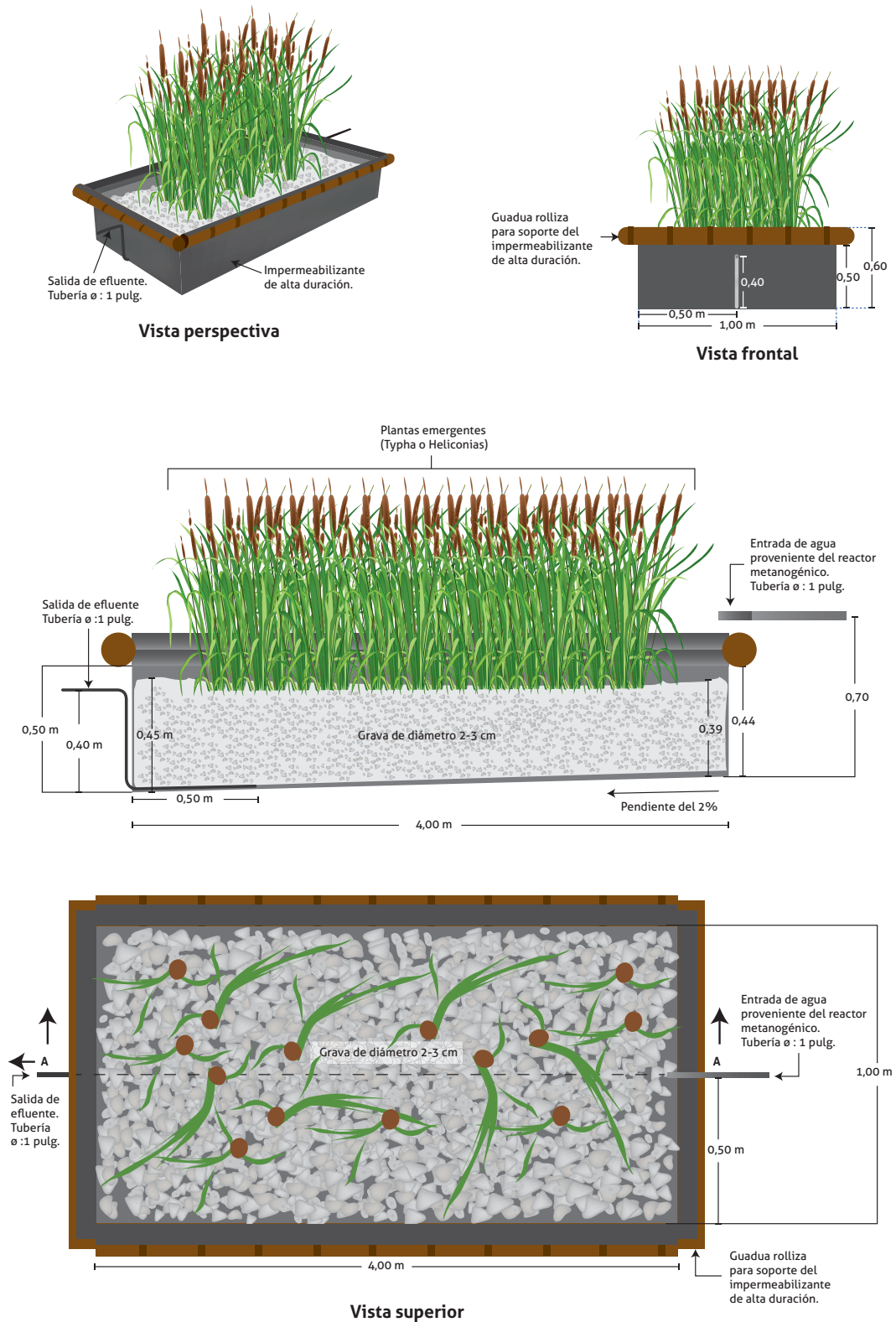


Figura 35. Esquema de los humedales construidos en el Proyecto GIA.

Campos de infiltración (RAS,2000)

Consisten en una serie de trincheras angostas y relativamente superficiales rellenas con un medio poroso (normalmente grava), que se utilizan para la disposición final de los vertimientos en el suelo.

Localización

Deben localizarse aguas abajo de los filtros anaeróbicos o de los humedales artificiales y deben ubicarse en suelos cuyas características permitan una absorción del agua residual que sale del sistema de tratamiento, con el fin de no contaminar las aguas subterráneas. Los canales de infiltración deben localizarse en un lecho de piedras limpias cuyo diámetro debe estar comprendido entre 10 y 60 mm.

Dimensionamiento

En la Tabla 20 aparecen las dimensiones que deben usarse en la construcción de los campos de infiltración.

Tabla 20. Dimensiones a utilizar en los campos de infiltración.

Parámetro	Dimensión
Diámetro de canales	0,10 – 0,15 m
Pendiente	0,3% – 0,5%
Largo máximo	30 m
Ancho del fondo	0,45 a 0,75 m

El área de absorción necesaria debe obtenerse con base en las características del suelo, que se determinan en los ensayos de infiltración (Figura 36). Para ello se realizan los siguientes pasos:

- Se excava un hoyo de 60 x 60 cm de lado, con la profundidad a la cual se va a construir el campo de infiltración (60 cm, aproximadamente). Después, en el centro de este, se cava otro hoyo de 30 x 30 x 30 cm.
- Luego, se llena el hoyo con agua. La saturación debe hacerse llenando con agua el hoyo cuantas veces sea necesario, durante 1 hora.
- Se deja drenar el agua completamente e inmediatamente se vuelve a llenar con agua limpia hasta una altura de 30 cm, y se anota el tiempo que tardan en bajar los primeros 2,5 cm, para lo cual debe disponerse de una regla graduada, o puede tomarse el promedio del tiempo que demoró en bajar los 30 cm.

Por ejemplo, si durante 30 minutos el nivel del agua desciende 5,0 cm, la tasa de percolación será de $30 \text{ min} / 5,0 \text{ cm} = 15 \text{ min} / 2,5 \text{ cm}$. Esta tasa de percolación se expresa en min/pulgada.



Figura 36. Ensayos de infiltración para el diseño de campos de infiltración.

Después de haber realizado los ensayos, se toman muestras de suelo de la excavación y se les determina la textura (propiedad física que está ligada al tamaño, distribución y continuidad de los poros).

El área de absorción necesaria se obtiene con base en las características del suelo, que se determinan en los ensayos de infiltración. En la Tabla 21 se presentan valores típicos que pueden usarse para el diseño.

Tabla 21. Áreas de absorción típicas de acuerdo con los tiempos de infiltración (RAS, 2000).

Tiempo de infiltración	Área de absorción necesaria en el fondo del campo (m ²)	
	Habitaciones	Escuelas
Minutos/pulgada	Por cuarto	Por salón
2	4,50	0,8
3	5,50	1,0
4	6,50	1,1
5	7,50	1,2
10	9,0	1,7
15	12,0	2,0
30	16,5	2,8
60*	22,0	3,5

*Por encima de 60 minutos no se recomienda esta solución

En la Tabla 22 se presentan las tasas de aplicación recomendadas de acuerdo al tiempo de infiltración y a la textura del suelo.

Tabla 22. Tasas de aplicación según tiempo de infiltración y textura del suelo (RAS. 2000).

Tiempo de infiltración (min/pulgada)	Textura del suelo	Porosidad del suelo	Tasa de aplicación (m ³ /m ² -día)
< 1	Arena gruesa o grava	Absorción rápida	No se recomienda
2			
3			
4	Arena fina Franco - arenosa	Absorción media	0,05
5			0,03
10	Franco - arcillosa	Absorción lenta	0,02
15			
30			
45	Arcilla compacta	Terreno semipermeable	0,008
50		Terreno impermeable	No se recomienda
>60			

Con el valor de la tasa de aplicación y el caudal diario del agua a infiltrar se determina el área del campo de infiltración.

Operación y mantenimiento

En el sistema de infiltración debe instalarse una caja de distribución que tiene como objetivo recibir el agua proveniente del filtro anaeróbico o del humedal artificial y repartir el efluente hacia las zanjas del campo de infiltración. Las zanjas deben diseñarse con base en las condiciones del terreno, caudal y el área disponible. Se construyen tres zanjas de 0,6 a 1,5 m de profundidad, cuya longitud depende de la capacidad de absorción del terreno. El objeto de este sistema es repartir las aguas efluentes en el subsuelo, el cual al filtrar las mismas por sus poros disminuye su impacto ambiental sobre las aguas subterráneas. Este sistema no es apropiado cuando el terreno es pantanoso, arcilloso, posee nivel freático alto o cuando no se dispone de área suficiente.

El agujero superior de la caja de distribución es la entrada y se conecta al efluente del filtro anaerobio o del humedal. Los tres orificios restantes son la salida y se conectan a la tubería (PVC - sanitaria) perforada de irrigación (Figura 37). En caso de no utilizarse alguno de los tres orificios, deberá reemplazarse por un tubo corto provisto de un tapón. Deben operarse en condiciones aerobias. Para esto, deben proveerse tubos de ventilación protegidos contra el ingreso de insectos.

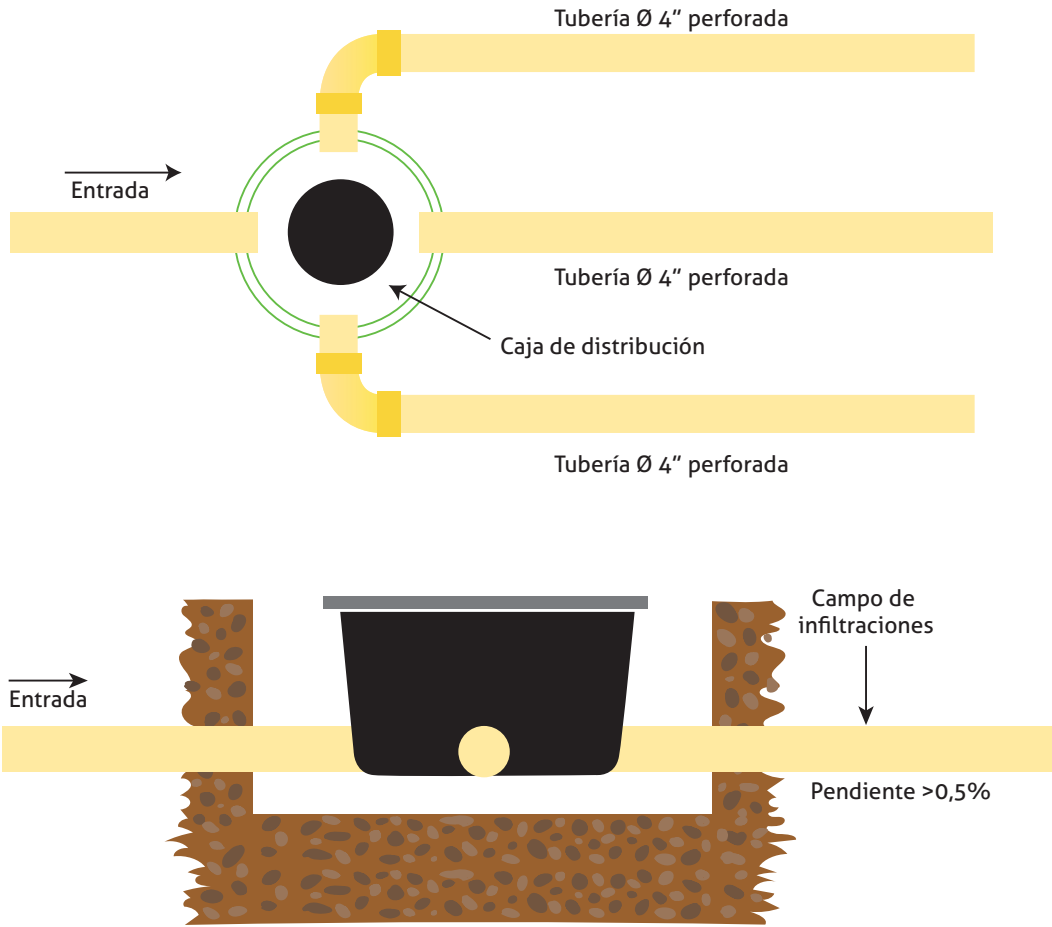


Figura 37. Esquema de la caja de distribución. fuente: (Colombit, 2000).

Cuando esté instalada la caja de distribución debe procederse a preparar la tubería; para tal fin, deben realizarse una serie de perforaciones en dos líneas, con broca de 3/16", separadas 10 cm entre cada una (Figura 38).

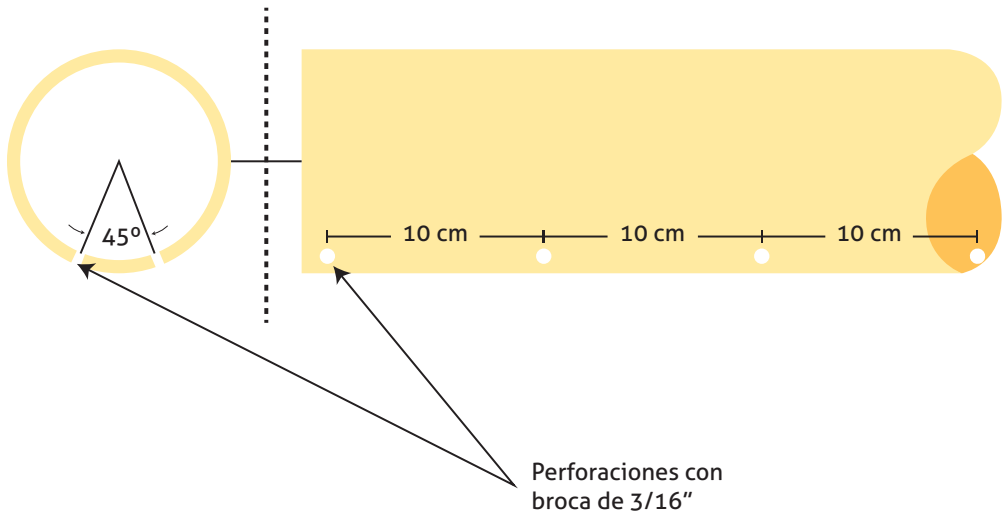


Figura 38. Esquema de las perforaciones en la caja de distribución.
fuente: (Colombit, 2000).

Posteriormente se procede a realizar una excavación de 60 cm de ancho, por una profundidad mínima de 60 cm. Sobre la excavación se dispone una cama de 15 cm de altura con gravilla de 2 a 6 cm de diámetro. Sobre esta se ubican los tubos con sus perforaciones orientadas hacia abajo, se completa el relleno con otros 15 cm de gravilla, y finalmente se rellena con el material común sobrante de la excavación (Figura 39).

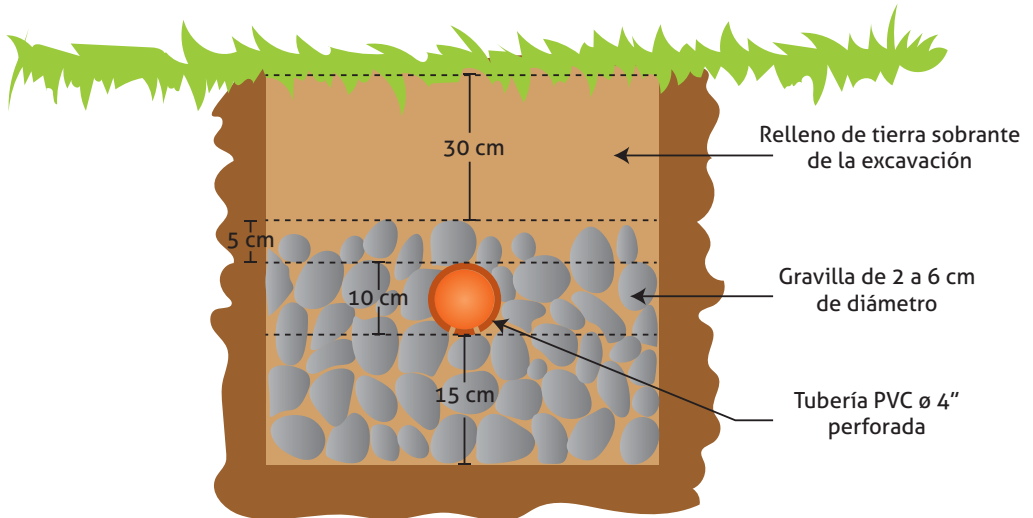


Figura 39. Esquema de una de las zanjas de infiltración.
Fuente: (Colombit, 2000).

Es importante asegurar que la cantidad de agua que se repartirá por cada uno de los ramales sea la misma, de manera que haya una absorción homogénea por parte del subsuelo.

Para favorecer la vida útil del sistema de infiltración se recomienda:

1. Todos los canales deben tener el mismo largo.
2. En terrenos planos, las líneas deben ubicarse paralelas a las curvas de nivel.
3. Para permitir una buena ventilación las líneas pueden terminar en pequeños pozos de 90 cm de diámetro, preferiblemente hechos con cascajo.
4. Se recomienda sembrar grama en el campo para ayudar a la absorción del líquido efluente.
5. Se recomienda el uso de cámaras dosificadoras con sifones para tener una buena distribución del agua residual en el tanque de infiltración.

En la Figura 40 se presenta el esquema integral de tratamiento recomendado para las aguas residuales domésticas, y que permite cumplir con la normatividad ambiental vigente.

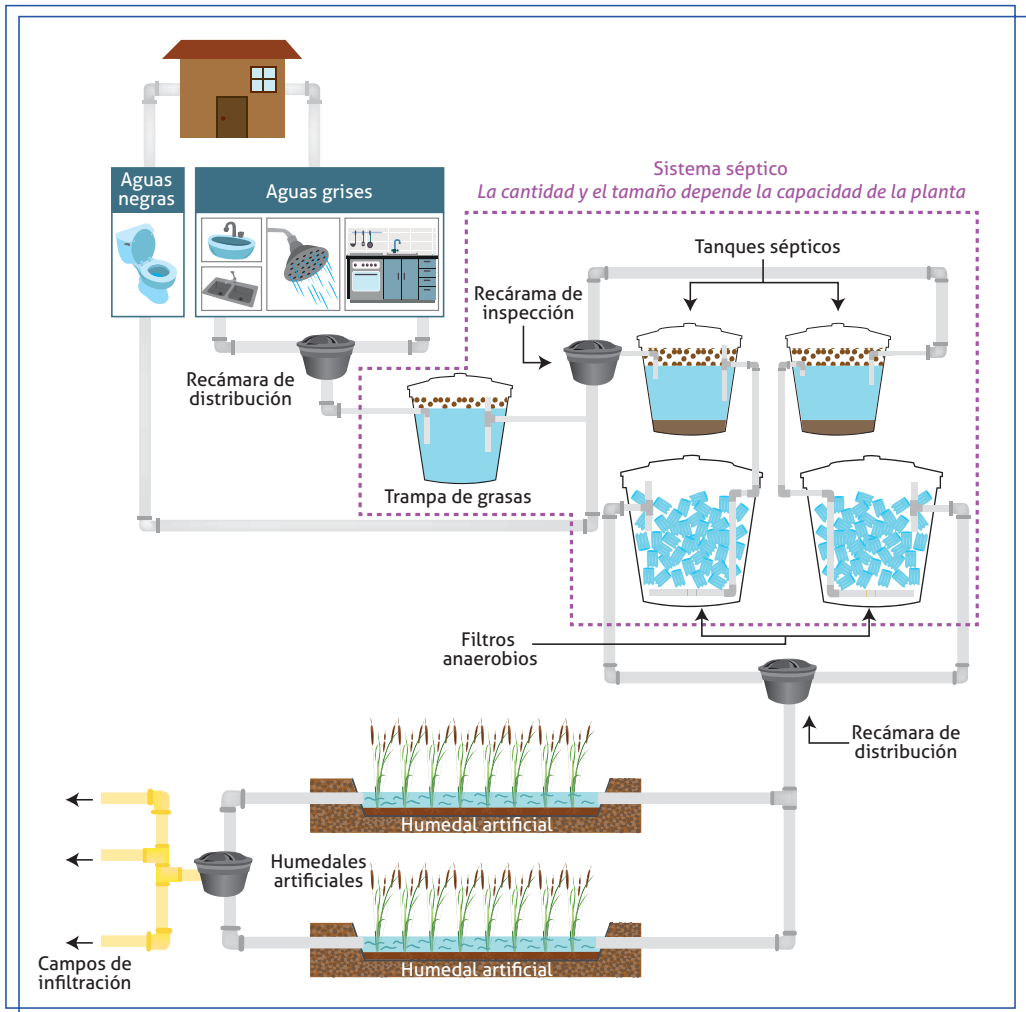


Figura 40. Esquema de sistema de tratamiento para aguas residuales domésticas.

En la Tabla 23 se presentan las recomendaciones que deben seguirse para el buen desempeño de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales de la vivienda.

Tabla 23. Recomendaciones para el buen desempeño de los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Lo que se debe hacer	Lo que no se debe hacer
Use el agua eficientemente para prevenir la sobrecarga del sistema séptico. Repare llaves o inodoros que gotean. Utilice accesorios de alto rendimiento. Use limpiadores de baño y detergentes de ropa comerciales con moderación.	El sistema séptico no es un bote de basura. No tire hilo dental, productos higiénicos femeninos, condones, pañales, hisopos, colillas de cigarro, borra de café, toallas de papel, pinturas o sustancias químicas peligrosas en el sistema.
Evite verter compuestos como acetona, aceites o alcohol, pues no se descomponen fácilmente.	No use destapadores de drenajes cáusticos para un desagüe tapado. En su lugar, use un tubo flexible para destapar tuberías.
Entérese de la ubicación del sistema séptico. Cuando haga la limpieza no extraiga la totalidad de los lodos.	No lave ni desinfecte el tanque séptico después de la extracción de lodos.
Cuando destape cualquier parte del sistema deje pasar un tiempo que garantice una adecuada ventilación, porque los gases acumulados pueden causar explosiones.	Nunca utilice cerillas o antorchas para inspeccionar un tanque séptico.
Mantenga registros de reparaciones, bombeos, inspecciones, permisos emitidos, y otras actividades del mantenimiento del sistema.	No maneje o estacione automóviles sobre cualquier parte del sistema séptico, ya que puede compactar el suelo y dañar las cañerías, tanques u otros componentes del sistema.







Tratamiento de aguas en fincas cafeteras

**TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DEL CAFÉ**

5

Tratamiento de aguas residuales del café

En los diferentes países productores de cafés lavados se han evaluado diversidad de tratamientos para la depuración de las aguas provenientes del proceso de beneficio del café.

En Colombia los dos organismos de investigación de la Federación Nacional de Cafeteros, el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) y el Laboratorio de Investigaciones sobre la Química del Café y los Productos Naturales (LIQC), este último fusionado a Cenicafé en la década de 1990, junto a Universidades y corporaciones autónomas regionales, han realizado investigaciones en ésta área en el transcurso de los últimos 30 años.

La aplicación de las diferentes tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales del beneficio de café ha estado ligada al tipo de beneficio utilizado y a las reglamentaciones que en materia de disposición de residuos líquidos prevalecen en cada uno de los países productores.

En Colombia Ávila y Ruiz (1989) estudiaron los procesos físicos de sedimentación y flotación como tratamientos preliminares para la adecuación de las aguas de beneficio del café antes de ser sometidas a procesos biológicos, concluyendo que la sedimentación es un proceso apropiado para implementarlo en sistemas de tratamiento, contrario a los resultados obtenidos con la flotación, la cual desde el punto de vista económico no es factible incorporar a los sistemas de tratamiento.

En México Noyola (1989) reporta el proceso biológico de la digestión anaerobia como el tratamiento adecuado para las aguas residuales del beneficio húmedo del café, y los reactores anaerobios de segunda generación (manto de lodos y filtro) como los indicados para llevar a cabo el proceso de depuración.

También en Colombia Buitrago y Ramírez (1991) evaluaron como tratamiento primario de las aguas residuales del café la coagulación con sales químicas de hierro y aluminio, encontrando que las condiciones más apropiadas del proceso fueron aquellas con pH entre 6,0 y 7,5, dosis de 30 ppm de alumbre y tiempo de sedimentación de 20 horas, permitiendo remover el 57% de los sólidos suspendidos y el 40% de los sólidos disueltos.

En Nicaragua Waser *et al.* (1991) reportan la utilización de reactores biológicos anaerobios de manto de lodos para el tratamiento de los efluentes del beneficio del café. Para afluentes neutralizados reportan eficiencias de remoción de DQO superiores al 80% en reactores anaerobios con tamaños entre 20 y 35 m³, operando a temperatura entre 18 y 22°C y con una carga aplicada de 2 kg DQO/m³r-día.

En Costa Rica Ochoa y Ramírez (1993) reportan la factibilidad técnica de utilizar procesos físicos en sedimentadores primarios y a continuación procesos biológicos en lagunas de oxidación como sistemas para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de los beneficiaderos en este país. Reportan que el lagunaje es apropiado como tratamiento secundario de aguas mieles y que en estos sistemas de tratamiento

puede removerse entre el 40% y 46% de la carga orgánica, para afluentes con pH de 4,0 y concentraciones de DBO en el rango 10.000 a 15.000 ppm.

En El Salvador Lardé (1996) investigó el tratamiento químico de la coagulación de las aguas residuales del café con una concentración en el rango 7.100 a 18.500 ppm de sólidos totales, utilizando hidróxido de calcio, encontrando como dosis óptima de coagulante entre 0,4% y 0,6% p/v y estimando reducciones del 39,7% en la DBO₅ con la dosis óptima de coagulante.

Y en Costa Rica Vásquez (1997) reporta que el 15% de los beneficiaderos tienen tratamientos biológicos en lagunas anaerobias, con eficiencias de remoción mayores al 50% para el tratamiento de las aguas mieles; el 5% tienen tratamiento biológico en lagunas aireadas, que involucran altos costos energéticos.

Características de las aguas residuales del café

El café colombiano lleva implícita una característica de calidad asociada al proceso de beneficio húmedo de los frutos -donde se requiere el empleo de agua-, que lo enmarca dentro de una categoría conocida como "café suave lavado"; es por ello que el uso de la misma debe asumirse con responsabilidad ambiental, la cual se logra adoptando tecnologías que enmarquen el producto dentro de un sistema productivo amigable con la naturaleza.

El despulpado y transporte de la pulpa sin agua hasta fosas techadas se constituye en la acción ambiental preventiva más importante, ya que esta práctica evita que el 74% de la contaminación potencial de los subproductos del beneficio húmedo del café llegue a las fuentes hídricas a través de la pulpa, perdiéndose la posibilidad de transformarla y darle valor agregado (Zambrano e Isaza, 1998).

El 26% restante de la contaminación se previene mediante la disposición del mucílago en mezcla con la pulpa de café, la cual actúa como filtro biológico, lo que aunado a los procesos de compostaje o lombricompostaje de la mezcla, permite obtener abono orgánico. Otras disposiciones son su uso en la alimentación animal o su tratamiento en sistemas biológicos (Zambrano *et al.*, 2010).

Las aguas residuales que se producen durante el proceso de beneficio húmedo del fruto del café son biodegradables, pero poseen características fisicoquímicas particularmente agresivas con el medio ambiente: pH bajo, acidez alta y concentraciones de materia orgánica altas, que corresponden a poderes contaminantes entre 60 y 240 veces superiores a las aguas residuales domésticas (Zambrano *et al.*, 2010).



Tratamientos de aguas residuales del café evaluados en Cenicafé

En Cenicafé se han investigado y evaluado diferentes tecnologías que atenúan el impacto ambiental de las aguas residuales del café.

Sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA)

Es un sistema porque consta de un conjunto de unidades dispuestas en serie, en las cuales el flujo del agua residual se realiza por gravedad. En las diversas unidades se realiza un tratamiento preliminar (trampa de pulpa), un tratamiento primario (reactor hidrolítico-acidogénico), un tratamiento secundario (reactor metanogénico), quedando el agua para ser postratada en un humedal artificial (diseñado de igual forma que para el tratamiento de las aguas residuales domésticas) y ser llevada a un campo de infiltración (diseñado de igual forma que para el tratamiento de las aguas residuales domésticas).

Es modular, por tener la posibilidad de aumentar la capacidad del sistema de tratamiento, aumentando el número de unidades si se presenta un incremento en el área productiva o en la producción de café en la finca, que resulta en un incremento en la carga orgánica residual.

Es un tratamiento anaeróbico, dado que es un sistema biológico que opera en condiciones de ausencia de oxígeno y al cual se adicionan bacterias metanogénicas que realizan la transformación de la contaminación orgánica presente en forma disuelta en el agua residual, en biogás (constituido básicamente por CO_2 y CH_4).

Las unidades están constituidas por tanques de polietileno negro con el fin de absorber energía solar que permita incrementar la temperatura al interior de las unidades, favoreciendo con ello la actividad biológica.

El sistema consta de cuatro elementos a saber: una trampa de pulpa, un reactor hidrolítico-acidogénico, una recámara dosificadora y un reactor metanogénico (Figura 41).



Sistema modular de tratamiento anaerobio
El tamaño depende de la producción de la finca y cantidad de agua utilizada en el proceso

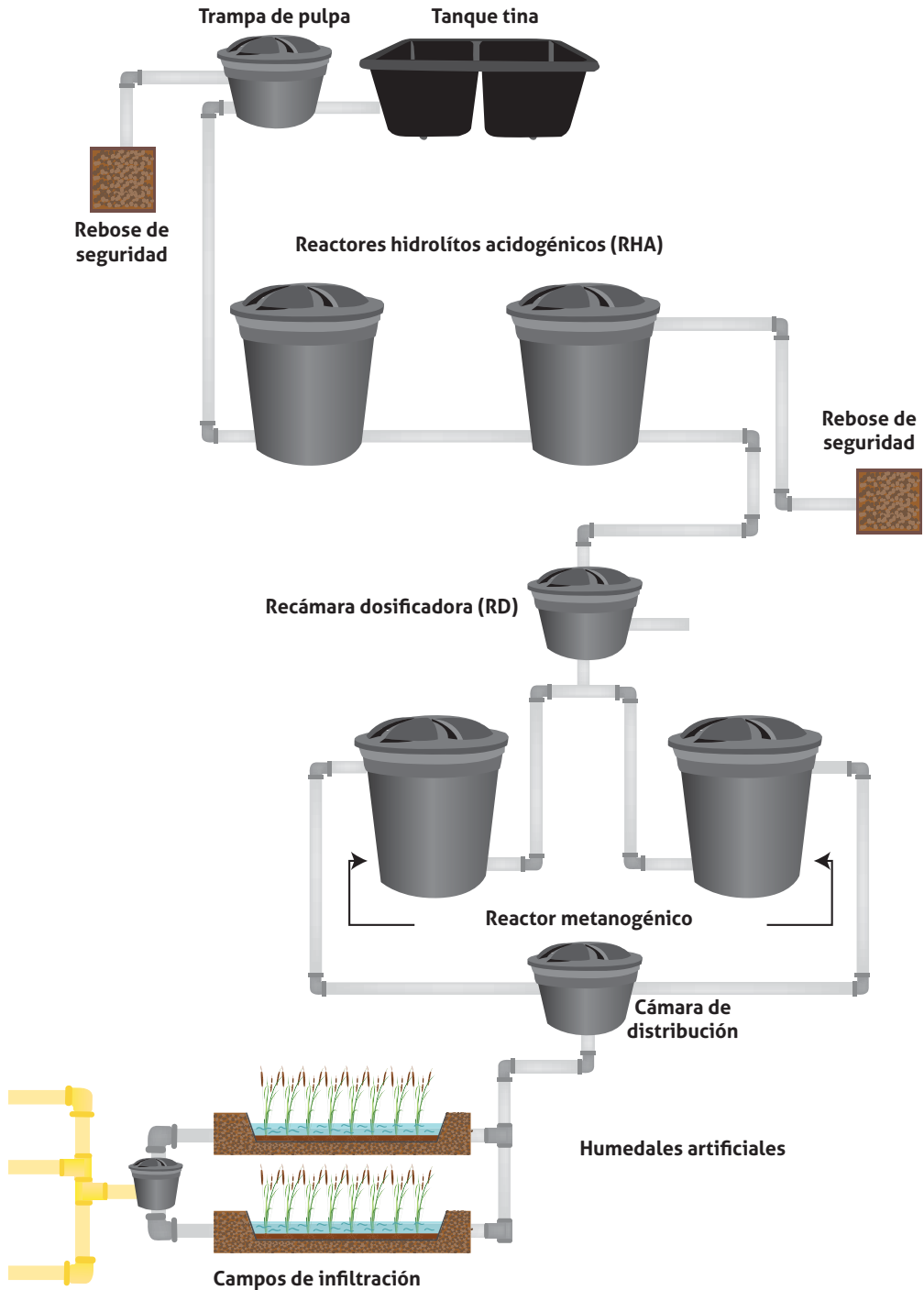


Figura 41. Esquema de un Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio.

El paso previo a la instalación de un SMTA es disponer de un tanque de fermentación con capacidad para procesar el grano generado en el día de máxima producción, y realizar su lavado utilizando la metodología de los cuatro enjuagues (Zambrano, 1993), en la cual se consumen entre 4 y 5 L de agua por kilogramo de café pergaminos seco.

Trampa de pulpa

El agua residual generada en la etapa de lavado debe conducirse a una trampa de pulpa. En la Figura 42 se presenta la configuración de esta unidad.

La trampa de pulpa tiene como objetivo retener granos, cáscaras y pulpa que pueden estar presentes en el agua residual de lavado y que por tener una tasa de degradación lenta pueden ocasionar taponamiento de la tubería e ineficiencia en el sistema de tratamiento. Se construye en un tanque de polietileno negro de 150 L.



Figura 42. Esquema de la trampa de pulpa.

A la trampa de pulpa se conducen, además de las aguas de lavado del grano, los drenados generados en la fosa de pulpa por la descomposición de la misma. La trampa de pulpa está provista de un rebose de seguridad, en caso de presentarse una sobrecarga hidráulica, que conduce a una excavación empacada con tallos de café de 1 m³ de volumen.

Reactor hidrolítico – acidogénico⁴

Consiste en un tanque de polietileno, en el cual se realizan las reacciones de hidrólisis y acidificación de las aguas residuales, además de procesos de flotación y sedimentación de sólidos. Se diseña para retener el agua residual durante 3 días.

Para el cálculo del volumen de esta unidad se requiere de la siguiente información:

1. *Producción anual*: arrobas de café pergamino seco al año (@/año de cps).
2. *Día pico*: porcentaje de la producción anual.
3. *Semana pico*: porcentaje de la producción anual.
4. *Consumo de agua*: L/kg de cps.

El volumen se determina mediante la **Ecuación 10**:

$$VRHA = 60 \times (0,9/1.000) \times 1,25 \times 3 \times (1/100) \times (1/5) \times Sp \times Pa$$

$$VRHA = 0,000405 \times Sp \times Pa$$

Donde:

- 60 = gc, factor de conversión de @ de cps a kg de cc (4,8 x 12,5).
- 0,9 = litros de agua consumidos en el lavado por 1 kg de café en cereza.
- 1.000 = gc, factor de conversión de L a m³.
- 1,25 = factor de seguridad.
- 3 = dos volúmenes para bioquímica y un volumen para almacenamiento.
- 1/100 = para corregir en %.
- Sp = semana pico en %.
- Pa = producción anual en arrobas de cps.

Elementos del reactor hidrolítico-acidogénico

Para favorecer la separación líquido-sólido que se presenta en esta unidad, el reactor consta de un dispositivo circular construido en manguera de polietileno de 1 ½", con agujeros de ½" dispuestos en cruz y separados cada 6 cm. La manguera se cubre con trozos de botellas no retornables y se ubica en la parte inferior, a la entrada del reactor hidrolítico. Con este dispositivo se evita la resuspensión del material sedimentado (que puede llegar a la recámara dosificadora) dado que el agua a presión, que sale de los agujeros de la manguera (proveniente de la trampa de pulpa), choca contra las paredes de los trozos de las botellas plásticas, perdiendo su turbulencia y su capacidad de mezclar los sedimentos (Figura 43).

También consta de un cuello de ganso que tiene una altura equivalente a las 2/3 de la altura del tanque, que realiza la toma del agua residual del tercio medio del reactor hidrolítico -en donde se encuentra la menor concentración de sólidos suspendidos- y la conduce hacia la recámara dosificadora, disminuyendo los riesgos de taponamiento de la misma.

⁴ RODRÍGUEZ V., N.; CASTAÑEDA, S.A.; OSORIO O., A.F.; QUINTERO Y., L.V. Nuevos dispositivos para el óptimo funcionamiento de los SMTA. Manizales: Cenicafé, 2017. 12 p.

Finalmente, al lado de la T de entrada del agua residual se ubica una tubería para la purga de los lodos al final de la cosecha de café, para realizar el mantenimiento a la unidad.

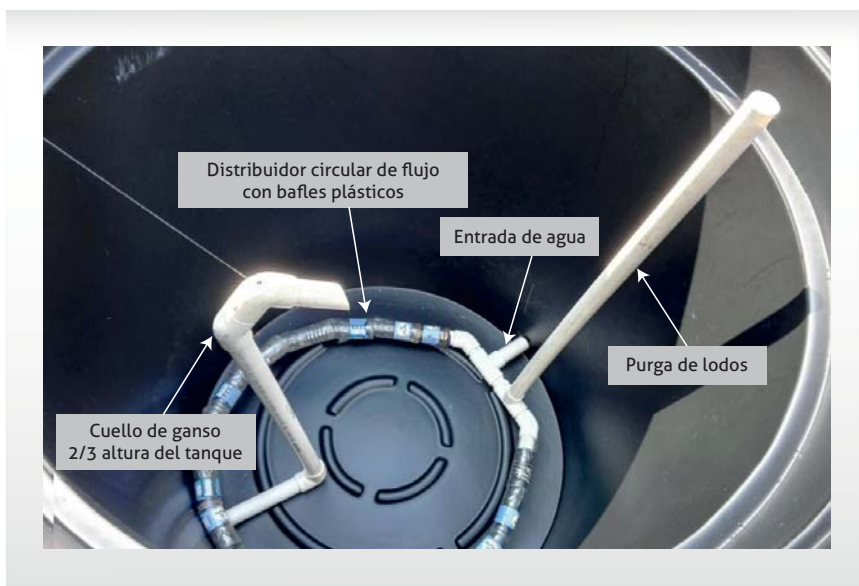


Figura 43. Esquema del reactor hidrolítico-acidogénico.

Recámara dosificadora⁵

Esta unidad tiene como propósito regular el caudal de agua que ingresa al reactor metanogénico, con el fin de asegurar el tiempo de detención hidráulica que permita que se realice el tratamiento biológico del agua residual y pueda cumplirse con los valores de los parámetros exigidos por la normativa.

En la Figura 44 se muestran los detalles de las diferentes conexiones y elementos de la recámara dosificadora. El agua proveniente del reactor hidrolítico-acidogénico ingresa a través de una válvula de bola de 1" (A), que permite suspender el flujo de agua residual; en caso que deba atenderse alguna eventualidad durante la operación del sistema o para el mantenimiento de la recámara, a esta válvula se le ensambla una válvula flotador (B) que mantiene el nivel de agua residual en la recámara, buscando mantener una cabeza de presión constante, la cual se instala 6 cm por debajo del borde superior del tanque.

La recámara también cuenta con una salida para descargar lodos cuando sea necesario hacer mantenimiento. La salida está ubicada a 7 cm del fondo del tanque y consta de un tubo PVC de 1½" y 1 m de longitud, en cuyo extremo se acopla un adaptador macho y un tapón roscado PVC (C), y de un dispositivo de regulación del caudal de salida (D), ubicado a 10 cm del fondo, consistente en un tubo PVC-P de ½" de 8 a 10 cm de longitud, provisto de un tapón copa al cual se le hace una perforación cuyo diámetro depende del volumen del reactor metanogénico. La recámara se llena con grava (que actúa como medio filtrante) y se ubica una malla mosquitera, la cual se asienta sobre la grava y se fija mediante un aro fabricado en manguera de polietileno reciclado, de baja densidad de ½", para aumentar la eficiencia del sistema de filtración.

⁵ RODRÍGUEZ V., N.; CASTAÑEDA, S.A.; OSORIO O., A.F.; QUINTERO Y., L.V. Nuevos dispositivos para el óptimo funcionamiento de los SMTA. Manizales: Cenicafé, 2017. 12 p.



Figura 44. Conexiones de la recámara dosificadora.

Para favorecer el funcionamiento de la recámara dosificadora se recomienda instalar una trampa de sólidos a la salida de la recámara dosificadora. Esta trampa está constituida por un filtro de 10 cm de diámetro, elaborado en malla mosquitera, que permite retener los sólidos que puedan ocasionar taponamientos en el flujo de salida de la recámara dosificadora, y limitar o evitar el flujo hacia el reactor metanogénico (Figura 45).

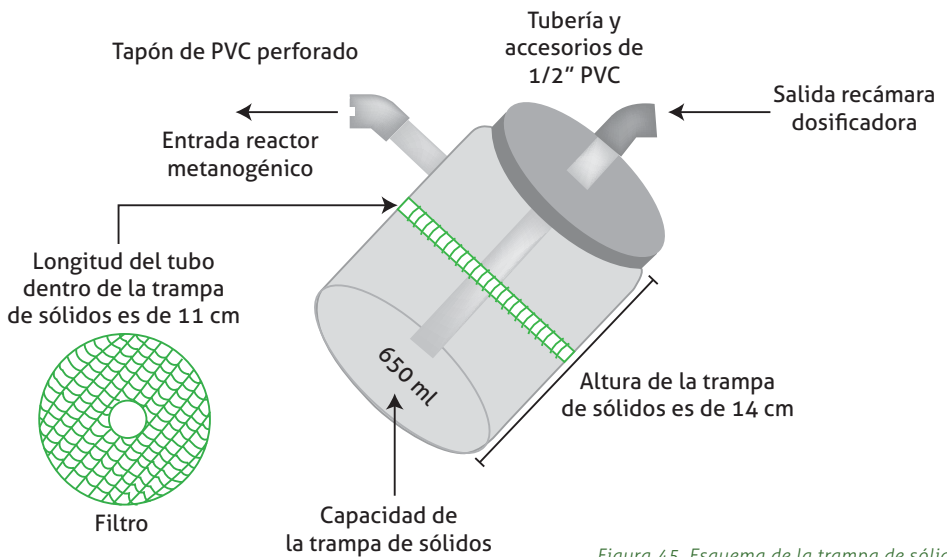


Figura 45. Esquema de la trampa de sólidos.

En la Figura 46 se presenta su ubicación en la recámara dosificadora.

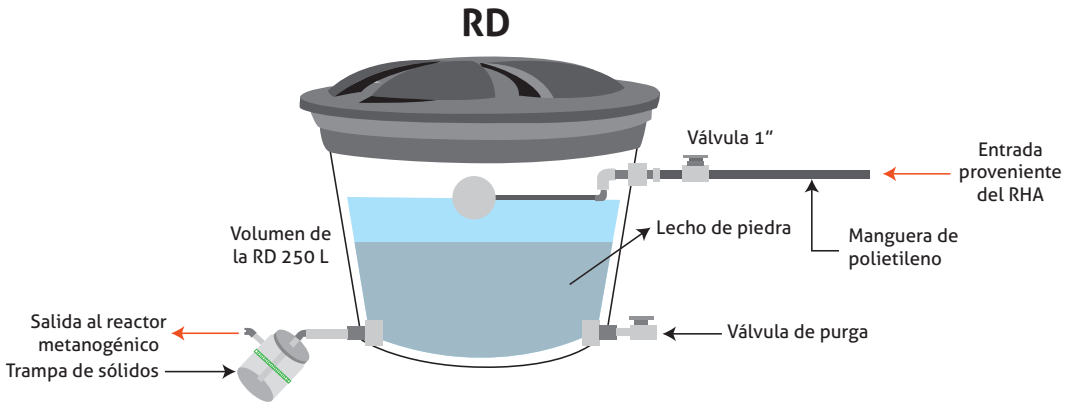


Figura 46. Ubicación de la trampa de sólidos en la recámara dosificadora.

Reactor metanogénico

Consiste en tanques de polietileno en los cuales se realizan las reacciones de metanogénesis de las aguas residuales del café. Se diseña para retener el agua residual durante 3 días.

Para el cálculo del volumen de esta unidad se requiere de la siguiente información:

1. *Producción anual*: arrobas de café pergamino seco al año (@/año de cps).
2. *Día pico*: porcentaje de la producción anual.
3. *Semana pico*: porcentaje de la producción anual.
4. *Consumo de agua*: L/kg de cps.

El volumen se determina mediante la Ecuación 11:

$$VRM = 60 \times (0,9/1.000) \times (1/100) \times 27,4 \times (1/8,75) \times (1/5) \times Sp \times Pa \quad 11$$

$$VRM = 0,000338 \times Sp \times Pa$$

Donde:

60 = gc, factor de conversión de @ de cps a kg de cc (4,8 x 12,5).

0,9 = litros de agua consumidos en el lavado por 1 kg de café en cereza.

1.000 = gc, factor de conversión de L a m³.

27,4 = Concentración del agua residual en kg de DQO/m³.

8,75 = DQO aplicado en kg/m³.

Sp = Semana pico en %.

Pa = Producción anual en arrobas de cps.

Para favorecer las reacciones de metanogénesis y la actividad de los microorganismos, el reactor es inoculado con estiércol de ganado vacuno o porcino, disuelto en agua (en relación 1:1), acompañado de una agitación fuerte y constante que permita homogeneizar la mezcla, asegurando una tasa de inoculación entre el 1% y el 2%. Adicionalmente, el reactor se empaca con algunos de los siguientes medios de soporte: trozos de guadua, trozos de botellas no retornables, trozos de llantas o tusas de maíz (Figura 47).



Figura 47. Medios de soporte utilizados en reactores metanogénicos.

Para favorecer el crecimiento de los microorganismos metanogénicos, solamente durante la instalación del SMTA, se recomienda adicionar una fuente de carbono que permita tener entre 4 y 5 kg de DQO soluble por metro cúbico de reactor, una fuente de nitrógeno para equilibrar la relación C/N y un neutralizante que permita tener un pH final de la mezcla cercano a 7.

Humedal artificial

Se diseña de la misma forma que se realiza el diseño para las aguas residuales domésticas.

Para este debe tenerse la precaución de utilizar como valor de la constante de reacción, el encontrado para las aguas residuales del café.

$$K_T = K_{20}(1,06)^{(T-20)}, T \text{ en } ^\circ\text{C} \text{ (Reed et al., 1995, citado por Rodríguez, 2009).}$$

$$K_{20} = 0,149 \text{ d}^{-1}, \text{ según Rodríguez (2009), para aguas residuales del café.}$$

Fosas de reúso

Tienen como objetivo utilizar las aguas residuales del beneficio del café como materia prima para la elaboración de abono orgánico a partir de la pulpa de café y de otros materiales orgánicos que se generen en la finca cafetera, para evitar vertimientos producidos en el proceso de beneficio del café al suelo o a cuerpos de aguas superficiales o subterráneos.



El reúso de las aguas residuales del café en la producción de abono orgánico permite acelerar los procesos de descomposición de los materiales orgánicos y la generación de un abono orgánico enriquecido con los nutrimentos de las aguas residuales, para ser aprovechado en la producción agrícola de la finca. Adicionalmente, se evitarían los costos ambientales relacionados con el tratamiento de aguas residuales como son:

1. El permiso de vertimientos (cuyo costo es cercano a los \$80.000 cada 5 años).
2. Las caracterizaciones anuales de los vertimientos (costo cercano a los \$ 200.000).
3. El pago de la visita anual de funcionarios de la corporación autónoma regional (costo cercano a los \$ 200.000).
4. El pago de la tasa retributiva.

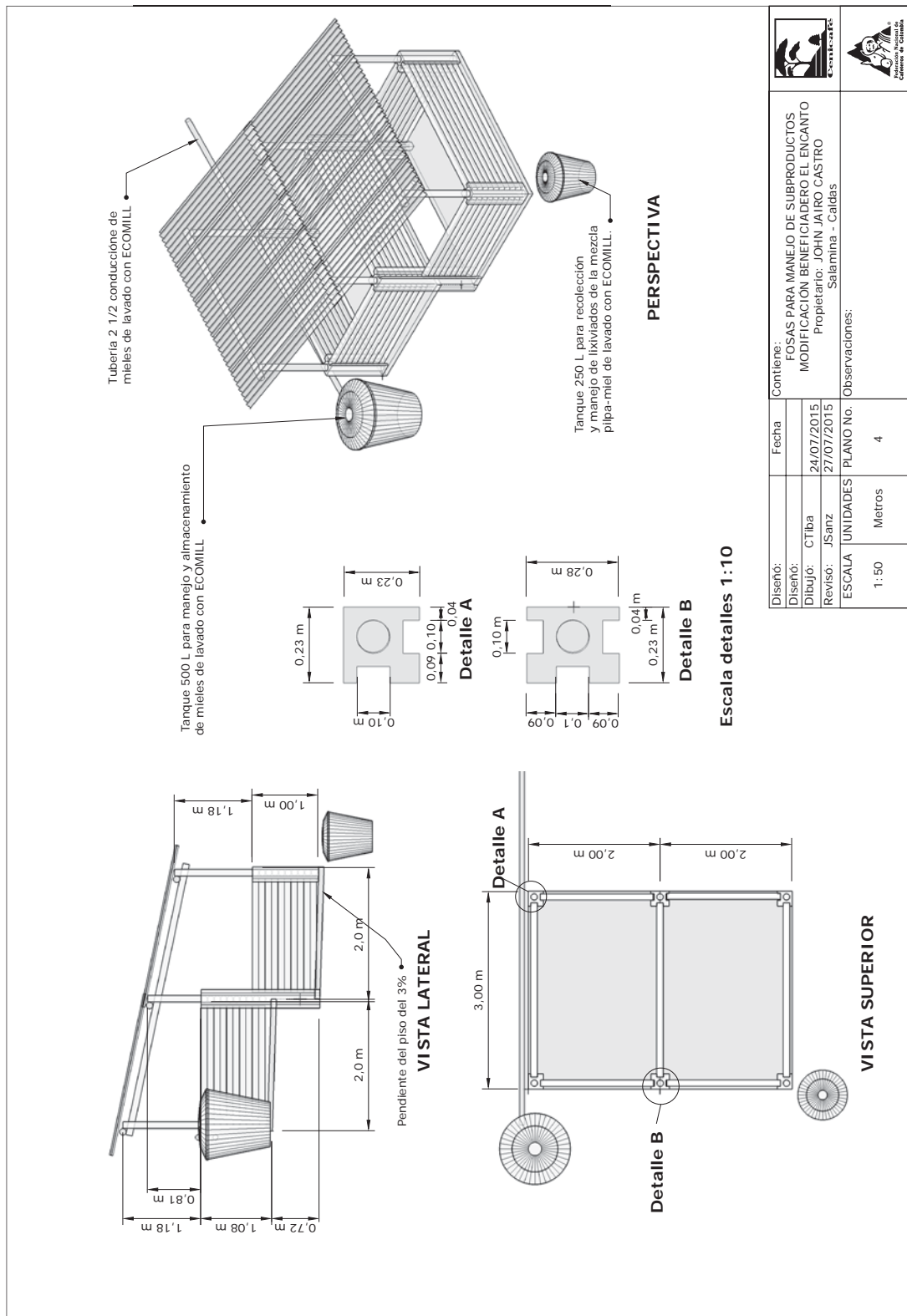
Para diseñar una fosa de reúso para pulpa de café, tipo invernadero, se requiere conocer:

- La producción anual de café de la finca (en arrobas de café pergamino seco al año).
- El porcentaje de café beneficiado en la semana pico de cosecha.

La cantidad de agua utilizada en el beneficio del café debe ser menor a 1 L/kg café cereza o menor a 5 L/kg de cps.

La fosa tipo invernadero es una construcción especial fabricada en guadua y esterilla, aislada del suelo, techada y con paredes cubiertas en plástico, donde se almacena, deshidrata-hidrata-deshidrata y se descompone la pulpa de café y otros materiales orgánicos de la finca (acondicionados a un tamaño de partícula similar al de la pulpa de café), en abono orgánico para su posterior utilización.

Es importante que la fosa tenga unas columnas en concreto para mayor durabilidad en el tiempo (Figura 48). La pulpa debe provenir de un despulpado sin agua y debe trasportarse a la fosa sin utilización de agua y distribuirla de manera homogénea utilizando toda el área disponible en el primero de los compartimientos de la fosa.



Diseño:	Fecha	Contiene:
	Dibujó: CÍlba	
Revisó: JSanz	27/07/2015	Propietario: JOHN JAIRO CASTRO
ESCALA UNIDADES	PLANO No.	Observaciones:
1:50	4	Salamina - Caldas



Figura 48. Aspectos y dimensiones de una fosa de pulpa para una finca con una producción de 180 @/año de cps y una semana pico del 15%. (Fuente: Tibaduiza y Ramirez, 2015).

La fosa debe constar de cuatro compartimientos, todos del mismo tamaño, para facilitar la labor de compostaje. Para la determinación del área del primer compartimiento de la fosa se utiliza la **Ecuación 12**:

$$A_{\text{Compartimiento1}} = 0,001 \times P \times \%SP \quad 12$$

Donde:

$A_{\text{Compartimiento1}}$ = área interior del primer compartimiento de la fosa (m²).

0,001 = constante.

P = producción anual de café (@ de cps).

% SP = producción de café en la semana pico (%).

Los compartimientos deben tener 1 m de altura efectiva (paredes en guadua) para el almacenamiento de la pulpa.

El piso puede establecerse directamente sobre el suelo, nivelando el terreno y suministrando una pendiente del 2% hacia el centro y el frente de la fosa, y debe cubrirse con plástico calibre 6 para evitar infiltraciones. También puede construirse el piso en cemento, pero dado que los lixiviados de la pulpa corroen el cemento, sería necesario forrar el piso en mayólica o plástico.

La pendiente establecida permite canalizar los líquidos lixiviados hacia un drenaje construido con tubería PVC-sanitaria, que los conduce hacia la parte externa para su recolección y a la vez permite el acceso de aire frío y seco del ambiente, que contribuye a la deshidratación y descomposición del material orgánico presente en la fosa.

Sobre el plástico se colocan ladrillos sueltos, ubicados a una distancia de 25 cm entre hileras y de 10 cm entre ladrillos intercalados. Finalmente, sobre los ladrillos se colocan dos tendidos de esterilla superpuestos y dispuestos perpendicularmente (Zambrano y Cárdenas, 2000).

Las paredes de la fosa de pulpa se cubren con plástico transparente calibre 6, sostenido por columnas de guadua. En la pared frontal y hacia la parte superior del techo se deja un espacio de 30 cm que permita la salida, por convección natural, del aire caliente y saturado de vapores de agua y de ácidos grasos volátiles producidos durante la descomposición de la materia orgánica. En uno de los lados debe construirse una puerta que permita el acceso a la fosa.

El techo de la fosa puede construirse en guadua con plástico, teja de zinc, teja de Eternit o teja plástica.

Al lado del primer compartimiento de la fosa se ubica un tanque de polietileno para almacenar las aguas de lavado y junto al último compartimiento se dispone un tanque del mismo material para recoger y almacenar los lixiviados generados.

Para calcular el tamaño del tanque donde se almacenan las aguas de lavado, se usa la **Ecuación 13**:

$$\text{Volumen TAL} = \frac{2 \times P \times \%SP \times 60}{500} \quad 13$$

Para calcular el tamaño del tanque en donde se recogen los lixiviados se utiliza la Ecuación 14:

$$\text{Volumen TL} = \frac{P \times \%SP \times 60}{500} \quad 14$$

Donde:

Volumen TAL = volumen del tanque para aguas de lavado, L.

Volumen TL = volumen del tanque para lixiviados, L.

P = producción anual de café (@ de cps).

% SP = producción de café en la semana pico (%).

Una vez construida y acondicionada la fosa tipo invernadero para pulpa, en el primer compartimiento se distribuye la pulpa generada en el beneficio, utilizando para ello un rastrillo o pala, de forma que ocupe toda el área del compartimiento y procurando que quede nivelada.

Las aguas residuales de los tres primeros enjuagues del lavado del café se almacenan en el tanque ubicado al lado del primer compartimiento (la del cuarto enjuague puede utilizarse directamente en riego de almácigos, lombricultivos o cafetales), y se adicionan totalmente, al día siguiente de su generación, mediante el uso de una regadera o de un dispositivo que permita la distribución del agua residual, teniendo cuidado de hacer una distribución homogénea sobre toda el área ocupada por la pulpa. Este paso se repite diariamente, adicionando pulpa fresca sobre la ya existente en el primer compartimiento, nivelándola sobre toda el área disponible y adicionando el agua residual.

Transcurridos 15 días a partir del momento en que se adicionó la pulpa en el primer compartimiento, o antes si este ya se ha llenado, se traslada toda la pulpa del primer compartimiento hacia el segundo y se distribuye de forma que ocupe toda el área, y se nivela. El material depositado en este segundo compartimiento se riega con los lixiviados recolectados.

Como el primer compartimiento queda libre, se le sigue depositando la pulpa fresca que se genere y se humedece con las nuevas aguas residuales.

Una vez transcurridos otros 15 días, o antes si el primer compartimiento se llena, se traslada el material del segundo al tercer compartimiento y del primero al segundo, y se sigue distribuyendo y humedeciendo la pulpa.

Una vez transcurridos otros 15 días, o antes si el primer compartimiento se llena, se traslada el material del tercero al cuarto compartimiento, del segundo al tercero compartimiento y del primero al segundo compartimiento, y se sigue distribuyendo la pulpa y humedeciendo como se ha indicado.

Transcurridos 15 días más, o antes si el primer compartimiento se llena, se retira el material del cuarto compartimiento a un lugar de almacenamiento para abono orgánico y se traslada el material del tercero al cuarto compartimiento, del segundo al tercero y del primero al segundo.

Filtros verdes

Los filtros verdes son un sistema de tratamiento de agua residual que trata de maximizar el potencial del suelo para eliminar los contaminantes presentes en un efluente. Su funcionamiento se basa en la aplicación de aguas residuales a una superficie con vegetación, ya sea de tipo forestal o herbáceo, para aprovechar la capacidad del sistema suelo-planta-microorganismos para degradar los contaminantes. El efluente, una vez entra en contacto con el suelo, se ve sometido a múltiples procesos, entre los que destacan procesos de evapotranspiración, filtración, biodegradación, adsorción y captación de nutrientes por parte de la vegetación. Si el sistema ha sido bien diseñado, el agua debe alcanzar el acuífero con una calidad aceptable, según la normativa de vertido.

Esta tecnología ha sido utilizada para el tratamiento de múltiples efluentes, desde efluentes domésticos (De Miguel *et al.*, 2014), industriales (De Bustamante, 1990) hasta lixiviados de vertederos (Zupanc y Justin, 2010). Hasta el momento no se ha encontrado algún ejemplo de su aplicación a efluentes del proceso húmedo del café (aguas mieles). Este tipo de sistemas han sido frecuentemente utilizados con otros efluentes relativamente similares como los procedentes de la industria del aceite de oliva (Azbar *et al.*, 2010) y de otras industrias alimentarias (Aryal y Reinhold, 2015), todos ellos caracterizados por una carga orgánica elevada y, en muchos casos, un bajo pH.

Por lo general, el vertido de los efluentes procedentes del beneficio del café se realiza de forma directa sobre una quebrada o cuerpo receptor, siendo posible determinar los efectos sobre la calidad del agua. En otras ocasiones dicho vertido se realiza a través del suelo, sea mediante la infiltración del efluente en alguna zona con elevada permeabilidad, o mediante la aplicación del mismo al terreno o a una zona boscosa (por ejemplo, gradual). Es bien sabido que el suelo puede actuar como un reactor, degradando parte de los contaminantes orgánicos presentes en las aguas residuales y atenuando en parte el impacto del vertido.

Es por ello que el uso de los filtros verdes para el tratamiento de las aguas mieles del café tiene un gran potencial, al ser una tecnología robusta, de bajo costo de implementación, con bajos requerimientos de operación y mantenimiento, y que puede ser fácilmente adaptable al paisaje cafetero.

Pero para su posible adopción por parte de los caficultores colombianos se hace imprescindible desarrollar trabajos que certifiquen que dicha tecnología es viable y sostenible a largo plazo. Es por ello que el Proyecto GIA ha desarrollado una serie de trabajos preliminares con diversos objetivos:

1. Evaluar la capacidad de los filtros verdes para la eliminación de contaminantes presentes en las aguas mieles del café.
2. Determinar la carga hidráulica y orgánica óptima que permita un diseño adecuado de los mismos.
3. Evaluar el efecto de la vegetación sobre la capacidad de eliminación de contaminantes, así como la tasa potencial de producción de biomasa.

Para ello se diseñó un experimento con seis parcelas, en las que se aplicaron tres volúmenes de agua residual del café (agua miel) sobre dos tipos de vegetación (Tabla 24, Figura 49).

Tabla 24. Descripción de las parcelas evaluadas

Parcela	Carga hidráulica	Carga DQO*	Tipo de vegetación
P5 PN	5 mm/día	200 g/día de DQO	Vegetación natural (PN)
P5 PV	5 mm/día	200 g/día de DQO	Pasto vetiver (PV)
P10 PN	10 mm/día	400 g/día de DQO	Vegetación natural (PN)
P10 PV	10 mm/día	400 g/día de DQO	Pasto vetiver (PV)
P20 PN	20 mm/día	800 g/día de DQO	Vegetación natural (PN)
P20 PV	20 mm/día	800 g/día de DQO	Pasto vetiver (PV)

*La carga aplicada se ha calculado en función de la concentración del efluente pretratado.

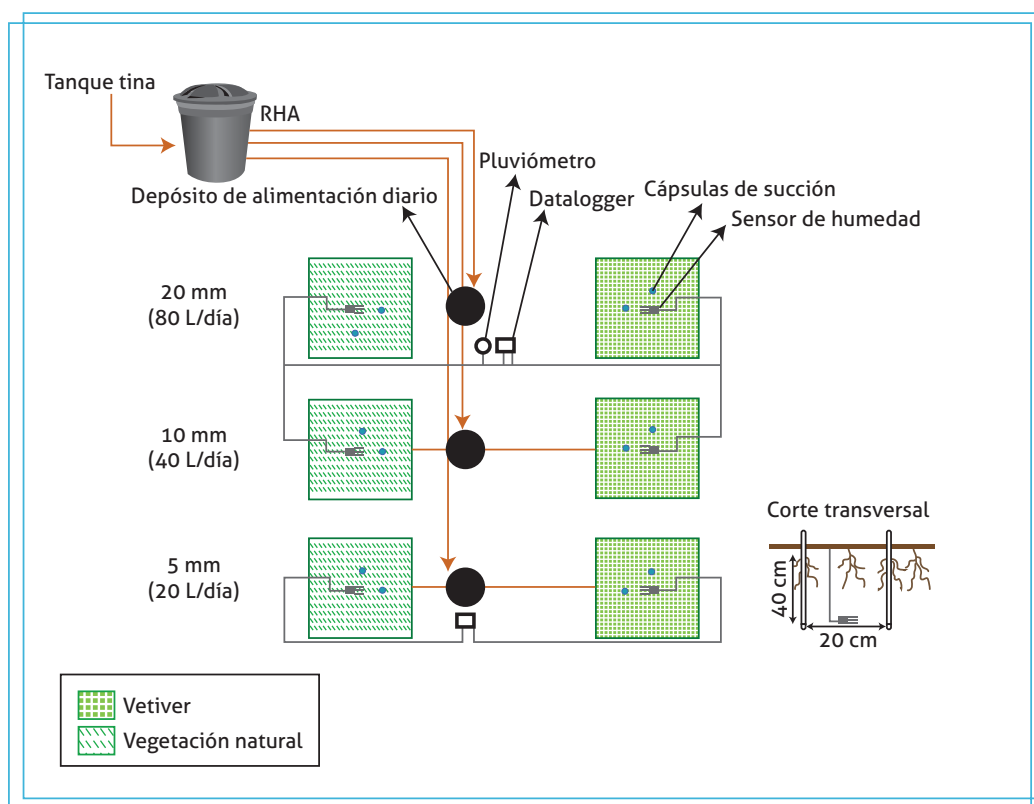


Figura 49. Esquema de las parcelas de experimentación sobre filtros verdes.

Las cargas diarias aplicadas fueron de 5, 10 y 20 mm ($1 \text{ mm} = 1 \text{ L/m}^2$) con el fin de determinar la máxima carga asimilable por el suelo. En tres de las parcelas la vegetación creció de forma espontánea, compuesta principalmente por pasto horqueta (*Paspalum conjugatum*) y arrozillo (*Panicum maximum*). En las otras tres parcelas se sembró pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en alta densidad (tallos cada 10 cm). Este último fue seleccionado por su capacidad para resistir suelos con elevada humedad, su gran desarrollo radicular y su capacidad para la absorción de contaminantes.

La vegetación se controló con cortes regulares a 35 cm de altura, para maximizar su capacidad de crecimiento y, por lo tanto, su capacidad de captación de nutrientes. El experimento fue realizado en las instalaciones del Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), en Manizales, Caldas, sobre un suelo de pendiente muy baja (menor al 1%), una textura franco-arenosa-arcillosa y con un contenido en materia orgánica del 3,9%.

Para simular las condiciones de producción de aguas mieles en una finca cafetera, la aplicación del agua residual se realizó durante un total de 10 semanas (período de cosecha), aunque el monitoreo de la calidad del efluente se prolongó otras 10 semanas más (20 semanas en total), con el objetivo de evaluar el posible lavado de contaminantes por la lluvia. Cada parcela tenía una superficie total de 4 m² (2 x 2 m). El agua miel aplicada procedía de un sistema de beneficio ecológico, con una elevada carga orgánica, y era posteriormente pretratada por un reactor hidrolítico acidogénico (RHA), que permitió una reducción de la carga orgánica casi del 50%. Dicho pretratamiento se hace indispensable para eliminar parte de los sólidos en suspensión, reducir la carga orgánica y evitar problemas de colmatación en el sistema de riego. El agua fue posteriormente aplicada a las parcelas experimentales mediante un sistema de tubería con goteo, nivelada, para garantizar una distribución homogénea (Figura 50). Gracias al uso de un dispositivo de regulación de caudal diseñado por Cenicafé, se tuvo un caudal constante de 0,39 L/min (Figura 50).





Agua residual proveniente del tanque tina, presente en el RHA.



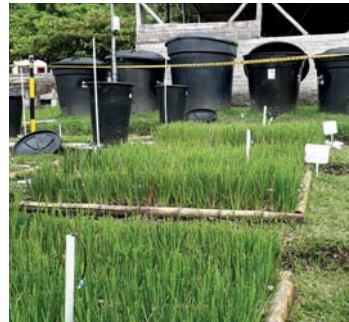
Agua residual después del tratamiento primario.



Aspecto de las parcelas testigo.



Panorámica de los tanques de alimentación al terreno. Uno por parcela.



Aspecto de las parcelas con el pasto vetiver.

Figura 50. Alimentación de las parcelas con agua residual del café.

A diferencia de la mayor parte de sistemas de tratamiento, un filtro verde no tiene una salida puntual de agua tratada, por lo que su monitoreo debe realizarse mediante la recolección del agua drenada (percolada) a cierta profundidad. Para ello, cada parcela experimental fue dotada de dos cápsulas de succión, que permitieron extraer el agua percolada en el suelo para su posterior caracterización en laboratorio. Dichas cápsulas fueron colocadas a 40 cm de profundidad. También se ubicó una sonda de humedad en el suelo en cada parcela, a una profundidad de 40 cm, con el objetivo de monitorear en continuo el contenido de agua en el suelo y un pluviómetro que registró la precipitación (Figura 51).



Figura 51. a) Estado de las parcelas antes del experimento. b) Cápsula de succión horizontal. c) Recipiente de recolección de muestras. d) Nivelación de la tubería de riego. e) Estado de las parcelas al finalizar el experimento. f) Sistema de distribución de flujo.

Principales resultados

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

Eliminación de contaminantes en el agua

El agua miel proveniente del beneficio de café se caracterizó por una elevada carga orgánica, con una DQO en torno a 20.000 mg/L, un pH ácido (3,20) y un elevado contenido en sólidos en suspensión (5.800 mg/L) (Tabla 25).

Tabla 25. Caracterización del agua residual aplicada a los filtros verdes y drenados recogidos en las distintas parcelas.

Parámetro/ tipo de muestra	pH*	DQO* (mg/L)	Remoción DQO** (%)	Remoción DQO*** (%)	Conductividad* (µS/cm)	P-PO4* (mg/L)	Remoción P-PO4** (%)	NT* (mg/L)	Remoción NT** (%)
Agua miel	3,2	20261	-	-	2916	12,2		597,8	-
Salida RHA	4,3	10163	49,8		1550	11,9	2,5	228,1	61,8
Salida P20 PN	6,6	117	98,9	99,4	99	0,4	96,6	174,2	23,6
Salida P20 PV	5,8	1425	85,9	92,8	1520	0,6	95,0	440,2	-
Salida P10 PN	6,3	147	98,5	99,3	111	0,2	98,3	255,6	-
Salida P10 PV	6,6	159	98,4	99,2	432	0,2	98,3	147,8	35,2
Salida P5 PN	5,7	108	98,9	99,5	57	0,3	97,5	159,8	29,9
Salida P5 PV	6,3	73	99,3	99,6	37	0,3	97,5	146,1	37,2

*Valor medio del agua residual y de los drenados recogidos durante el período comprendido entre la semana 4 y la semana 10 de experimentación.

** % de eliminación calculado con respecto al agua miel que ingresó al suelo.

*** % de eliminación calculado con respecto al agua miel que ingresó al RHA.

Gracias al sistema de pretratamiento instalado (RHA), la carga orgánica se redujo en casi el 50% antes de su aplicación al terreno (hasta valores inferiores a 10.200 mg/L de DQO), debido a procesos de flotación, sedimentación y filtración que ocurren en el RHA con el dispositivo implementado para regular el caudal de salida, lo cual también se reflejó en la reducción de los sólidos suspendidos, alcanzando una eliminación de los mismos del 79% (hasta los 1.200 mg/L) y un ligero incremento de los valores de pH (4,3).

Es importante remarcar que el agua miel contiene una elevada concentración de compuestos nitrogenados, la mayor parte de ellos en forma orgánica, con un NT de casi 600 mg/L, de los que el RHA es capaz de eliminar casi el 60%.

Durante las 20 semanas de experimentación se logró constatar que el suelo tiene una elevada capacidad de eliminación de contaminantes, principalmente en lo referente a la carga orgánica procedente de las aguas mieles. La concentración media de DQO encontrada en los percolados es baja, con valores por debajo de los 1.500 mg/L en todas las parcelas evaluadas (Figura 52).

De esta forma, la capacidad de eliminación de DQO por parte del suelo varió entre el 86% para el caso de la parcela P20 PV, hasta valores de más del 98% para el resto de parcelas si se compara con el efluente obtenido del RHA (Tabla 25). Los valores de remoción de DQO son mucho mayores si se evalúa el sistema completo, siendo superior al 92% en todos los casos.



Aspecto del agua de ingreso a la parcela (balde).



Toma de muestra de la cápsula de succión.



Aspecto del agua percolada.
Parcelas con pasto vetiver.

Figura 52. Muestreo y aspecto del agua de ingreso y salida del suelo.

Los valores medios de pH encontrados en el agua drenada oscilaron entre 5,7 y 6,6, es decir, ligeramente ácido, lo que supone un incremento considerable del pH con respecto al agua aplicada. De igual forma la conductividad tuvo un importante decrecimiento en la mayor parte de las parcelas, a excepción de la parcela P20 PV. En el caso de la concentración de fosfatos ($P-PO_4$), la eliminación fue muy elevada, con valores de remoción superiores al 95% y concentraciones que no superaron los 0,7 mg/L.

Debido a problemas en la caracterización de los compuestos nitrogenados, no fue posible realizar una evaluación completa de la capacidad del sistema para eliminar el nitrógeno total (N_T). A pesar de ello, los rendimientos encontrados en aquellas parcelas donde pudo evaluarse variaron entre el 24% y el 37%. Es importante mencionar que más del 90% del N_T se encontró en forma orgánica.

En el caso de los sólidos en suspensión, parámetro a tener en cuenta según la legislación de vertidos, debido a las características del propio sistema de muestreo, no fue posible su cuantificación. Aun así, es de sobra conocido que el suelo tiene una elevada capacidad de filtración física, siendo capaz de eliminar la mayor parte de los sólidos en suspensión presentes en el agua aplicada. Dicho efecto ha sido comprobado en el laboratorio, haciendo pasar una muestra de agua miel sobre una columna de suelo no disturbado procedente del área de experimentación, observando porcentajes de remoción de sólidos en suspensión superiores al 95%, con concentraciones inferiores a 100 mg/L en el drenado.

Si se comparan los resultados obtenidos en las distintas parcelas de experimentación con los valores permitidos de descarga de agua miel a cuerpos de agua superficial por parte de la legislación de Colombia, establecidos por la Resolución 631 del 2015, puede observarse que los filtros verdes hacen un tratamiento adecuado del agua residual, cumpliendo para todas las cargas probadas (5, 10 y 20 mm) los requisitos de vertido, tanto para el pH, DQO como para los sólidos en suspensión. De igual manera, en promedio todos los tratamientos permitieron cumplir con la norma de descarga al suelo (Decreto 1594 de 1984), que establece un porcentaje de remoción de carga orgánica mayor al 80%.

Evolución de las propiedades del suelo

En un Filtro Verde, el suelo actúa como biorreactor, por lo que controlar la evolución de sus propiedades es esencial para asegurar un correcto funcionamiento a largo plazo. Es por ello que, se tomaron muestras de suelo antes y después de la aplicación del agua miel para su caracterización en el laboratorio.

Los principales cambios observados (Tabla 26) han sido: un incremento en la concentración de materia orgánica del suelo, pasando de valores del 3,9% a valores superiores al 4,0% en la mayor parte de las parcelas; un incremento del pH en el suelo, así como un incremento de los valores del nitrógeno y del potasio, en la mayor parte de las parcelas. En el caso del fósforo, son las parcelas con pasto vetiver (P20 PV, P10 PV y P5 PV) las que presentan un valor más elevado, independientemente de la carga aplicada, al compararlas con las parcelas testigo.

Tabla 26. Principales propiedades del suelo antes y después de la aplicación del agua miel.

Parámetro	Antes de la aplicación (Muestra compuesta)	Después de la aplicación de agua miel					
		P20 PN	P20 PV	P10 PN	P10 PV	P5 PN	P5 PV
pH	3,80	5,60	5,60	5,90	5,00	5,50	4,90
MO (%)	3,90	2,40	5,80	4,10	5,80	4,20	5,10
N (%)	0,18	0,12	0,26	0,19	0,26	0,20	0,23
P (mg/kg)	710	456	512	169	670	371	960
K (cmol/kg)	0,25	0,58	0,82	1,11	0,52	0,47	0,30

Para el resto de variables analizadas (Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Zn, Cu, B, S -no mostradas en la Tabla-), no se observaron cambios significativos, a excepción de los valores de hierro y manganeso, que pasaron de 528 mg/kg y 25 mg/kg antes de la aplicación del agua miel, a valores cercanos a los 600 mg/kg y los 70 mg/kg, respectivamente. En el caso del Mn, se observó una estrecha relación entre la carga aplicada y la concentración encontrada en el suelo, con valores más elevados en las parcelas con mayor carga. El boro también presentó un aumento en el suelo después de la aplicación de las aguas mieles, pasando de 0,18 mg/kg a valores que oscilaron entre 0,36 y 0,54 mg/kg.

A pesar de los cambios producidos en el suelo, todas las variables analizadas se encuentran en valores aceptables desde el punto de vista agrícola, por lo que la aplicación del agua miel no ha generado por el momento un cambio considerable en las propiedades del suelo.

Producción de biomasa

Por último, se ha cuantificado la producción de biomasa durante las 20 semanas de experimentación. Como puede observarse en la Figura 53, las parcelas con pasto vetiver tienen una producción de biomasa comparable con las parcelas con vegetación espontánea, siendo la parcela de los tratamientos con vetiver, con la aplicación de una menor carga de agua miel (P5 PV), la que presentó un mayor crecimiento, con valores que alcanzaron los 23.000 kg/ha de materia fresca. En el caso de las parcelas con vegetación espontánea, fue la parcela con la aplicación de la mayor carga de agua miel (P20 PN) la que presentó un mayor crecimiento, con valores que alcanzaron los 24.000 kg/ha de materia fresca. Durante el experimento no se observó que la aplicación de agua miel hubiera producido algún tipo de efecto negativo sobre el estado o el crecimiento de las plantas.

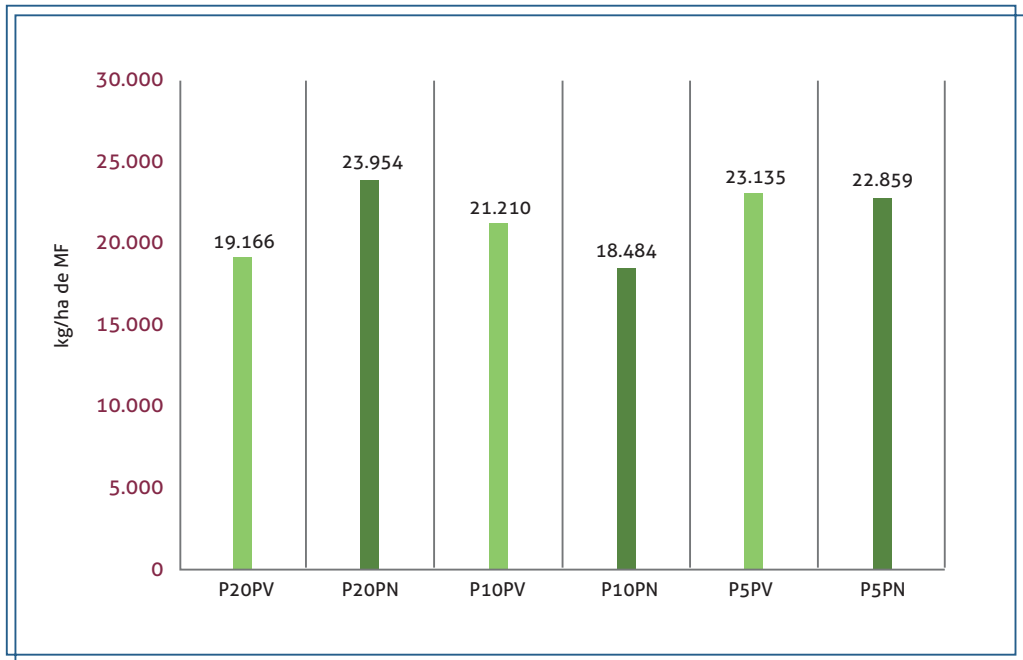


Figura 53. Producción de biomasa en los filtros verdes (kg/ha de materia fresca).







Tratamiento de aguas en fincas cafeteras

**IMPLEMENTACIONES DE SISTEMAS
DE TRATAMIENTO DE AGUAS
REALIZADOS EN EL PROYECTO GIA**

6

Criterios de selección

Los criterios de selección de las intervenciones estuvieron en concordancia con el objetivo del proyecto y alineados con los planes de trabajo en beneficio ecológico y de sostenibilidad de las inversiones, contando con el apoyo del Servicio de Extensión y considerando la afectación del recurso hídrico en 25 microcuencas cafeteras. Se tuvo en cuenta la cercanía de los vertimientos al cuerpo de agua, priorizando aquellos que estaban a menos de 200 m del mismo. De igual manera, se escogieron las fincas con mayor afectación sobre el recurso hídrico, con el objetivo de lograr el mayor impacto posible de las implementaciones realizadas en pro de la recuperación de la calidad del agua superficial.

Se realizó un reconocimiento de los predios antes de instalar las soluciones en tratamiento de agua, con el fin de determinar las necesidades más relevantes que se presentaban en las fincas cafeteras seleccionadas, con respecto a la instalación de los sistemas de tratamiento y al consumo de agua, con el fin de instalar los dispositivos apropiados para el ahorro del recurso.

Disminución de la contaminación en las microcuencas GIA por implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales

La reducción de la carga contaminante en las microcuencas GIA se determinó con base en las 3.346 implementaciones en tratamiento de aguas residuales instaladas, en las 25 microcuencas GIA, considerando intervenciones en aguas residuales del café (ARC) y en aguas residuales domésticas (ARD). La Tabla 27 resume las reducciones de la carga de contaminación, expresada en toneladas de DQO al año.

Tabla 27. Reducción de la carga de contaminación en función de las intervenciones GIA.

Municipio	Contaminación de la cuenca por ARC (t de DQO al año)	Contaminación de la cuenca por ARD (t de DQO al año)	Reducción de la carga con sistemas para ARC (t de DQO al año)	No. de intervenciones en sistemas de tratamiento para ARC	Reducción de la carga con sistemas para ARD (t de DQO al año)	No. de intervenciones en sistemas de tratamiento ARD
Antioquia	1.868	41	784	373	23	376
Caldas	2.175	69	377	316	26	436
Cauca	828	84	147	443	17	276
Valle del Cauca	2.201	41	806	275	27	420
Nariño	825	51	222	231	13	200
Total	7.896	287	2.336	1.638	107	1.708

De acuerdo con la información de la Tabla 27, se presentó una reducción total de 2.336 t de DQO al año en las aguas residuales de café, con una reducción de 467 t de DQO al año en promedio por departamento, y una reducción total de la carga contaminante de 107 t de DQO al año en las aguas residuales domésticas y de 21 t de DQO al año en promedio por departamento.

En la Figura 54 se presentan los resultados de la contaminación evitada por departamento, gracias a las implementaciones del Proyecto GIA, en los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas.

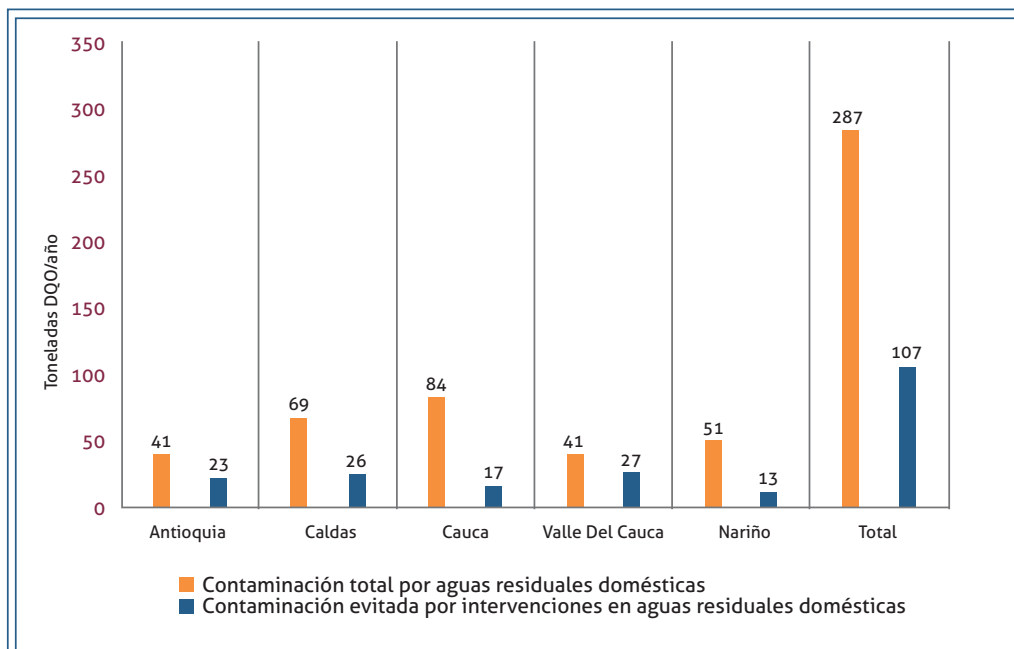


Figura 54. Reducción potencial de la carga orgánica contaminante a nivel domiciliario, debido a las implementaciones GIA en sistemas de tratamiento de aguas residuales.

En las microcuencas del departamento de Antioquia la contaminación evitada por la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas representó el 56,10% de la contaminación total; en las microcuencas del departamento de Caldas el valor fue del 37,68%; en las microcuencas del departamento del Cauca el valor fue del 20,24%; en las microcuencas del departamento de Nariño el valor fue del 25,49%; y en las microcuencas del departamento del Valle de Cauca el valor fue del 65,85%.

Con los sistemas de tratamiento para las aguas residuales de la vivienda logró evitarse el 37% de la contaminación generada por los vertimientos domésticos del 50% de las fincas ubicadas a menos de 200 m de los cuerpos de agua.

En la Figura 55 se presentan los resultados de la contaminación evitada por departamento, gracias a las implementaciones del Proyecto GIA en los sistemas de tratamiento de aguas residuales del café.

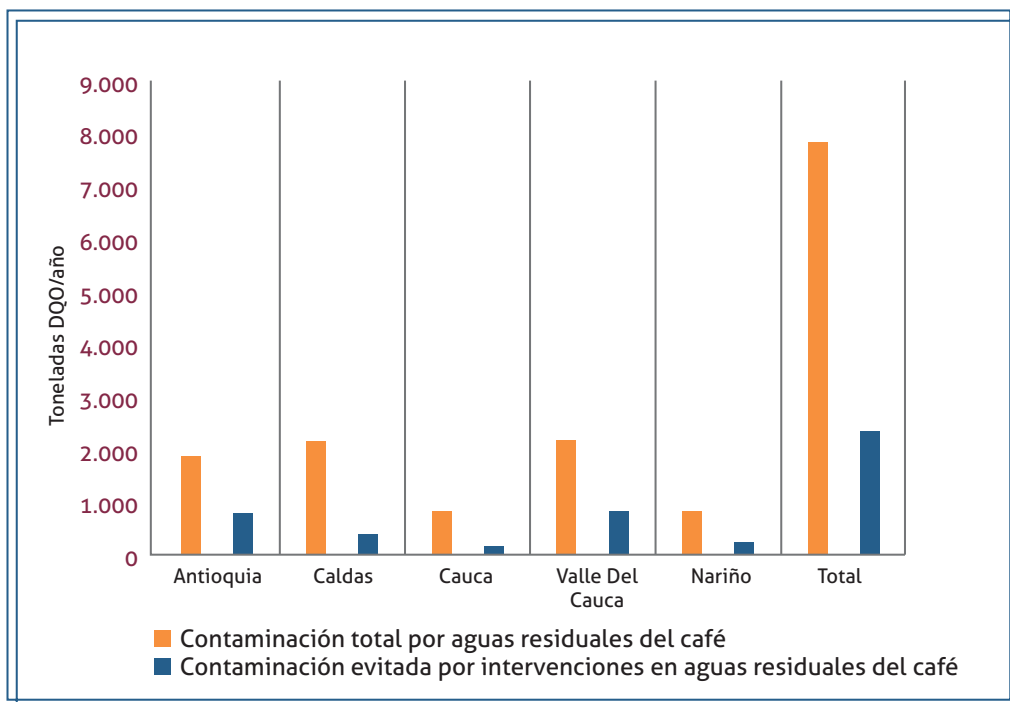


Figura 55. Reducción potencial de la carga orgánica contaminante debido a las implementaciones GIA, en sistemas de tratamiento para aguas residuales del café.

En las microcuencas del departamento de Antioquia la contaminación evitada por la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales del café representó el 41,90% de la contaminación total; en las microcuencas de Caldas el valor fue del 17,30%; en las microcuencas del Cauca el valor fue del 17,75%; en las microcuencas de Nariño el valor fue del 26,90%; y para las microcuencas del Valle de Cauca el valor fue del 36,61%.

Con los sistemas de tratamiento, para las aguas residuales del café, logró evitarse el 29,5% de la contaminación generada por los vertimientos del café, del 50% de las fincas ubicadas a menos de 200 m de los cuerpos de agua.

En la Figura 56 se presenta el potencial contaminante del 50% de los caficultores ubicados a menos de 200 m del cuerpo de agua, por vertimientos de sus aguas residuales (tanto domésticas como del café) y la contaminación evitada por las implementaciones realizadas en el Proyecto GIA.

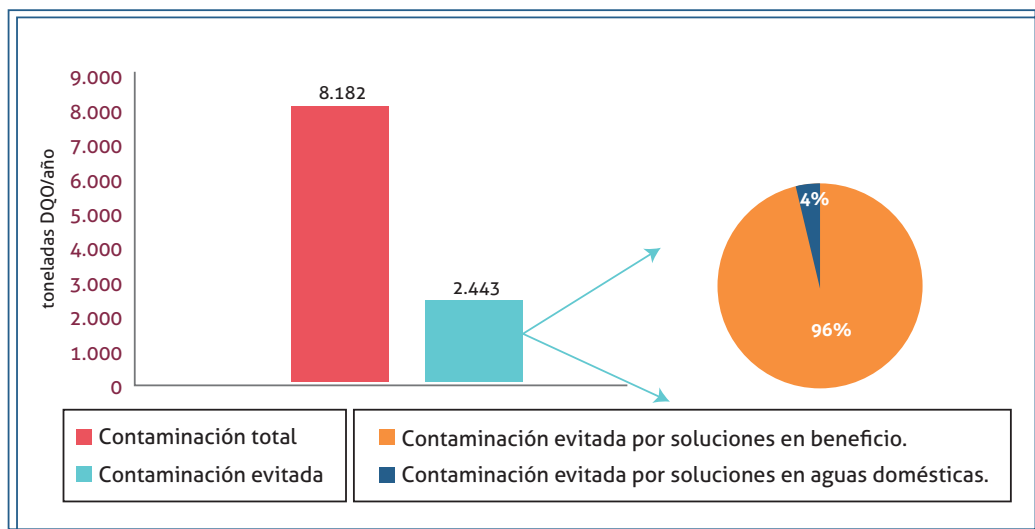


Figura 56. Contaminación total estimada y evitada por aguas residuales generadas en el 50% de las fincas ubicadas a menos de 200 metros de los cuerpos de agua.

De la contaminación total evitada, el 96% correspondió a las soluciones en tratamiento de aguas residuales del café y el 4% correspondió a las soluciones en tratamiento de las aguas residuales domésticas.

Tipos de implementaciones realizadas para el tratamiento de aguas residuales domésticas y su contribución en la contaminación evitada en la microcuenca

Dentro del Proyecto GIA se instalaron, en las 25 microcuencas, 686 trampas de grasas y 1.022 sistemas sépticos, en predios de caficultores ubicados a menos de 200 m de los cuerpos de agua.

En la Figura 57 se presenta la contaminación total, expresada como DQO, del 50% de los caficultores ubicados a menos de 200 m de los cuerpos de agua y que se constituyeron en la población objetivo para implementar los sistemas de tratamiento de sus aguas residuales domésticas y la contaminación evitada por tipo de solución de tratamiento incorporado.

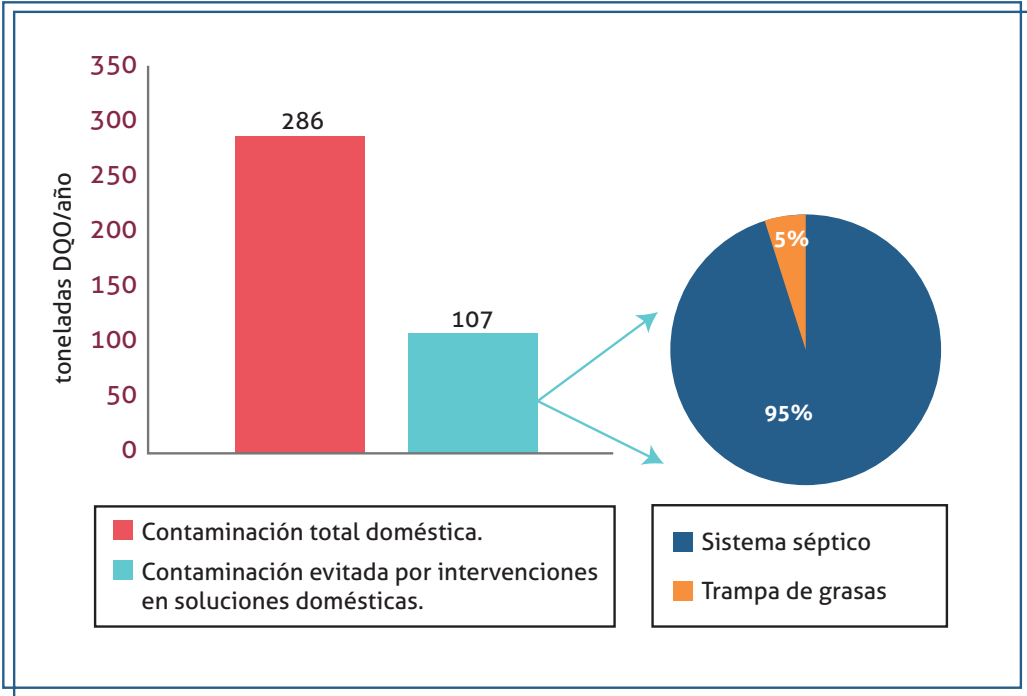


Figura 57. Contaminación total estimada y evitada por aguas residuales domésticas generadas en el 50% de las fincas ubicadas a menos de 200 m de los cuerpos de agua.

De las soluciones implementadas para el tratamiento de las aguas residuales de la vivienda, las trampas de grasas han contribuido a controlar el 5% de la contaminación y los sistemas sépticos el 95% restante.

Tipos de implementaciones realizadas para el tratamiento de aguas residuales del café y su contribución en la contaminación evitada en la microcuenca

Dentro del Proyecto GIA se instalaron, en las 25 microcuencas, 575 SMTA completos, 585 fosas para pulpa, 165 SMTA parciales y 313 humedales artificiales.

En la Figura 58 se presenta la contaminación total por aguas residuales del café, expresada como DQO, del 50% de los caficultores ubicados a menos de 200 m de los cuerpos de agua y que se constituyeron en la población objetivo para implementar los sistemas de tratamiento y la contaminación evitada por tipo de solución de tratamiento incorporada.

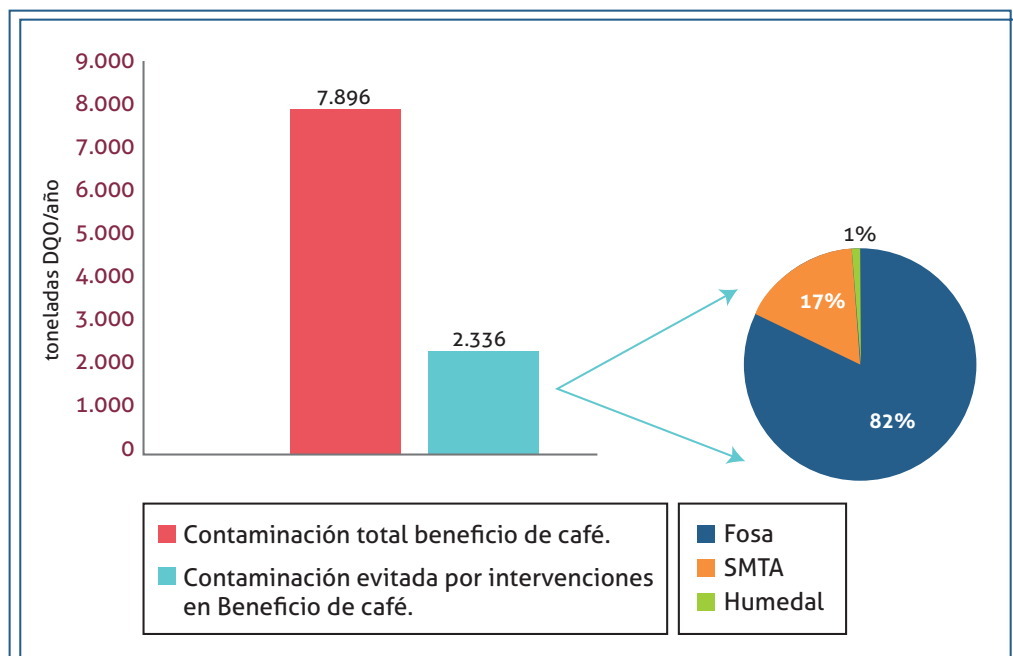


Figura 58. Contaminación total estimada y evitada por aguas residuales del café generadas en el 50% de las fincas ubicadas a menos de 200 m de los cuerpos de agua.

De las soluciones implementadas para el tratamiento de las aguas residuales del café, las fosas para pulpa han contribuido a controlar el 82% de la contaminación, los SMTA el 17% y los humedales el 1%.

Relación entre la contaminación evitada en las microcuencas por implementaciones para el tratamiento de aguas residuales y el mejoramiento en la calidad del agua superficial

En la Figura 59 se presenta la relación entre la reducción de la contaminación en 11 microcuencas que fueron evaluadas durante siete campañas de monitoreo de calidad del agua superficial, por efecto de las implementaciones en tratamiento de aguas residuales, y el incremento del indicador global de calidad del agua superficial de la microcuenca, comparando las condiciones iniciales y condiciones al final del Proyecto GIA.

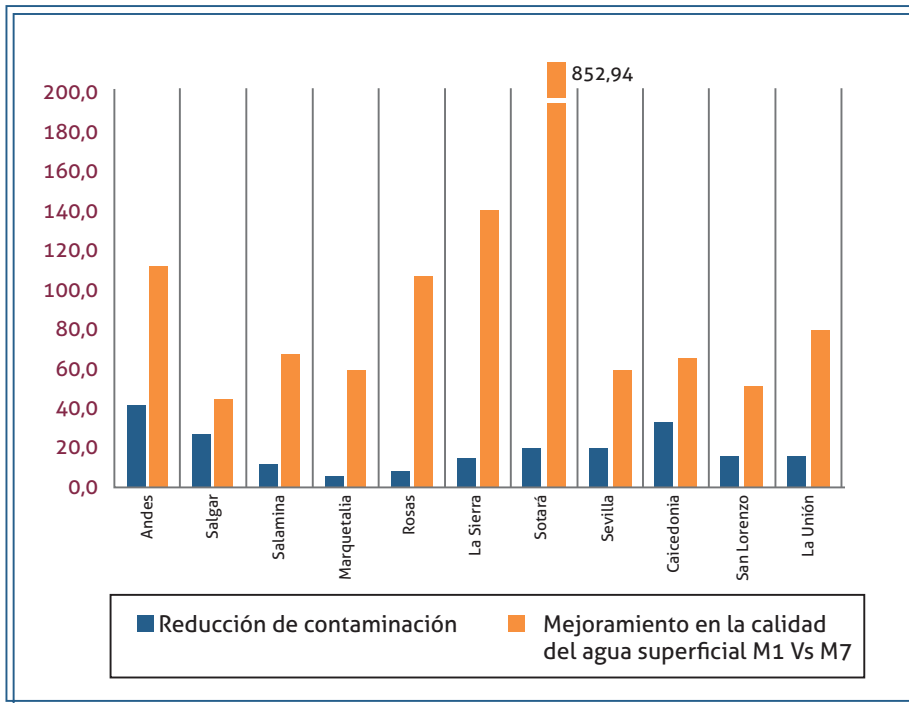


Figura 59. Relación entre la reducción de la contaminación por implementación de sistemas de tratamiento y el indicador global de calidad en las microcuencas GIA, comparando condiciones iniciales y condiciones finales.

Los resultados de la Figura 59 muestran, para todas las microcuencas, que los porcentajes de reducción de la contaminación hídrica por las implementaciones realizadas se potenciaron en valores superiores en el mejoramiento de la calidad del agua superficial.

Estas potencialidades, si bien fueron positivas en todas las microcuencas, no fueron de la misma magnitud, dado que en algunas microcuencas, o los puntos generadores del vertimiento, estuvieron más cerca del cuerpo del agua que en otras o la magnitud del vertimiento era mayor.

En la microcuenca en la cual se encontró el mayor efecto en la calidad del agua superficial, por efecto de las intervenciones en tratamiento de aguas, fue en la microcuenca Quilcacé (Sotará, Cauca) que para una contaminación evitada del 20%, el mejoramiento del agua superficial fue del 853%, para un factor de potencialización en beneficio del mejoramiento del agua del 42,4 (Tabla 28).

En la microcuenca en la cual se encontró el menor efecto en la calidad del agua superficial, por las intervenciones realizadas en tratamiento de aguas residuales, fue en la microcuenca de La Gulunga en Salgar, Antioquia, para una contaminación evitada del 27%, con un mejoramiento del agua superficial del 45%, para un factor de potencialización en beneficio del mejoramiento del agua del 1,66.

En promedio, la contaminación evitada en las 11 microcuencas que continuaron en la evaluación hasta la séptima campaña de monitoreo de calidad del agua, fue del 19,36%, por efecto de las implementaciones en sistemas de tratamiento de agua. El mejoramiento promedio encontrado en la calidad del agua superficial en las microcuencas fue del 149,12%, para un factor de potencialización promedio en beneficio del mejoramiento del agua de 9.

Tabla 28. Relación entre el mejoramiento encontrado en la calidad del agua superficial y la contaminación evitada en las microcuencas.

Microcuenca	Municipio	Departamento	Reducción de la contaminación (%)	Mejoramiento de la calidad del agua (%)	Razón Mejoramiento / Reducción
La Chaparrala	Andes	Antioquia	41,77%	112,23%	2,69
La Gulunga	Salgar		27,00%	44,87%	1,66
La Frisolera	Salamina	Caldas	11,86%	67,39%	5,68
Los Sainos	Marquetalia		5,59%	59,68%	10,67
San Marcos	Sevilla	Valle del Cauca	19,54%	58,65%	3,00
Barragán	Caicedonia		32,97%	65,24%	1,98
El Marquez	Rosas	Cauca	8,37%	107,40%	12,84
Esmita	La Sierra		15,08%	140,95%	9,35
Quilcacé	Sotará		20,11%	852,94%	42,41
El Molino	San Lorenzo	Nariño	15,79%	51,64%	3,27
La Fragua	La Unión		14,92%	79,38%	5,32
Promedio			19,36%	149,12%	8,99





Tratamiento de aguas en fincas cafeteras

**CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES**

7

CONCLUSIONES

Sistemas de potabilización de agua

- De acuerdo con la información de la línea base del Proyecto GIA, solo el 31% de los caficultores tienen acceso a agua potable. En el proyecto se evaluaron varias tecnologías para la potabilización de agua en los hogares (incluidos microfiltros, nanofiltros y sistemas de destilación) y se demostró que los nanofiltros son los mejores desde el punto de vista costo-efectivo.
- La durabilidad y efectividad de los filtros purificadores depende tanto de la calidad del agua a tratar como de su mantenimiento adecuado.
- En el Proyecto GIA se instalaron filtros purificadores de agua a 900 familias (aproximadamente 2.800 personas). De igual forma, se instalaron 64 filtros comunitarios (para 3.300 estudiantes). Todos los filtros instalados permiten generar agua que cumple con la normativa colombiana para agua potable.
- Los sistemas de potabilización instalados en los hogares son más rentables que los sistemas de potabilización centralizados. Especialmente en las áreas rurales de producción de café, donde la mayor cantidad del agua usada no requiere los estándares de calidad exigidos para el agua potable.
- La instalación de los filtros comunitarios generó una mayor conciencia en las comunidades locales en la generación de acciones para garantizar la sostenibilidad de las inversiones del proyecto, como el recaudo de dinero por parte de los padres de familia para adquirir nuevos filtros, que permitan continuar con el suministro de agua potable en las escuelas.

Tratamiento de aguas residuales domésticas

- En la línea base del proyecto se encontró que muy pocos caficultores tenían sistemas de tratamiento para el agua residual doméstica, lo cual genera un impacto ambiental negativo en el suelo y el agua. En el monitoreo dinámico realizado a los cuerpos de agua en las microcuencas del proyecto, se demostró que los efluentes domésticos tienen un impacto más alto en la contaminación del agua de lo que se esperaba, por lo tanto, es importante realizar un tratamiento a estos efluentes.
- En el Proyecto GIA se realizaron aproximadamente 1.708 intervenciones en sistemas de tratamiento de agua residual doméstica, que representaron una disminución de la contaminación en un 37%, en términos de carga orgánica.
- Para un buen funcionamiento de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales domésticas, es importante tanto el diseño como la operación y el mantenimiento de los mismos. Para que un sistema de tratamiento esté completo debe incluir los siguientes componentes: trampa de grasa, tanque séptico, filtro anaerobio y disposición final (campos de infiltración, humedales artificiales, entre otros).

- La eliminación del lodo del tanque séptico, paso indispensable en la operación y mantenimiento del sistema, se ha convertido en un obstáculo para la adopción de esta tecnología. Este inconveniente se solucionó mediante la utilización del dispositivo de sifón invertido desarrollado en Cenicafé.

Tratamiento para el agua residual del beneficio de café

- En la línea base se encontró que muy pocas fincas cuentan con tratamiento para las aguas residuales del café. Con el Proyecto GIA se realizó una gran contribución para mejorar el tratamiento de las aguas residuales del café, con varias alternativas: fosas de reúso, sistemas anaeróbicos y filtros verdes.
- En el Proyecto GIA se realizaron alrededor de 1.638 intervenciones en sistemas de tratamiento de aguas residuales del beneficio del café, distribuidas entre tratamiento primario, secundario y humedales artificiales, lo que permitió una reducción de la contaminación en un 29,5%.
- Con el desarrollo del proyecto se generó la capacidad para seleccionar la combinación adecuada de soluciones para una finca específica, la cual depende del tamaño de la finca (pequeña, mediana, grande), las condiciones climáticas y las características del suelo y el paisaje.
- La adopción de las tecnologías disponibles ha mejorado considerablemente gracias a las capacitaciones realizadas por parte del proyecto al Servicio de Extensión y a los caficultores, reduciendo la brecha entre las tecnologías disponibles y la implementación en campo.

Filtros verdes

- En función de los resultados de eliminación de contaminantes puede concluirse que la tecnología de filtros verdes es apta para el tratamiento de las aguas mieles procedentes del beneficio ecológico del café, presentando unos elevados porcentajes de remoción de carga orgánica.
- Las tres cargas aplicadas (5, 10 y 20 mm) han producido un drenado que se encuentra por debajo de los límites de vertido establecidos por la Resolución 631 del 2015, tanto en los parámetros de DQO, pH y sólidos en suspensión.
- No se ha observado una relación directa entre el tipo de vegetación utilizada y los rendimientos de depuración.
- No se ha observado un deterioro de las propiedades del suelo que pueda cuestionar la viabilidad de los filtros verdes a largo plazo.

- Se recomienda incluir en los planes de ordenamiento y manejo de las microcuencas los sistemas de tratamiento en los hogares (agua potable y aguas residuales), dada la gran influencia que tienen en la contaminación de los recursos hídricos y en la salud de las personas.
- El manejo de la pulpa de café a través de los procesadores de pulpa bajo techo, mediante compostaje y vermicompostaje, tiene un impacto considerable en la conservación de los recursos naturales (agua, aire y suelo) y evita el 74% del potencial contaminante hídrico de los subproductos del beneficio húmedo del café.
- Para evitar sobrecargas hidráulicas en los sistemas de tratamiento de agua es importante reducir la cantidad de agua a tratar. Esto implica que debe ahorrarse agua en el proceso de beneficio húmedo de café en las actividades domésticas tanto como sea posible.
- El uso del RHA, como sistema de pretratamiento de las aguas mieles, permite reducir de forma significativa la carga orgánica a aplicar al suelo, así como los sólidos en suspensión, minimizando los problemas relacionados con la colmatación de los sistemas de riego del agua residual.
- Para la rentabilidad de las intervenciones deben tenerse en cuenta las siguientes recomendaciones: 1. Diseños de sistemas de tratamiento con una larga vida útil (en términos de materiales). 2. Priorizar los subproductos más contaminantes (pulpa, mucílago, primeros enjuagues de lavado del grano en tanques). 3. Seleccionar los lugares más críticos en los cuerpos de agua (ubicados a menos de 200 m del cuerpo de agua principal).
- El proceso iniciado en el Proyecto GIA debería continuar, preferiblemente, con las posibilidades de reutilización del agua del beneficio de café, con el objetivo final de cero vertimientos.
- En el Proyecto GIA casi todos los agricultores cofinanciaron (de diversas maneras) la tecnología que recibieron. Para implementaciones futuras se recomienda aplicar el mismo enfoque, con el fin de reducir el riesgo de perder las inversiones y así garantizar la operación y el mantenimiento de los sistemas de tratamiento instalados.
- Los resultados obtenidos en la presente experiencia utilizando filtros verdes para el tratamiento de las aguas mieles del café son muy prometedores. A pesar de ello, se recomienda el escalamiento del experimento a nivel de finca cafetera y durante un tiempo más prolongado, de forma que se garantice el correcto funcionamiento a largo plazo. Dichas experiencias deberán servir para mejorar la implementación de la tecnología en fincas cafeteras, evaluando otros tipos de suelos, vegetación, y adaptando el sistema al paisaje cafetero (pendiente, disponibilidad de terreno, entre otros).



AGRADECIMIENTOS

Oficina Central

Rodrigo Calderón

Andrés Romero

Cenicafé

Walter Osorio

Servicio Extensión Antioquia

Alexis Quiceno

Catalina Guerra

Servicio Extensión Caldas

Jaime Baena

Yesica Morales

Andrés Arango

Servicio Extensión Cauca

Ever Sandoval

Julián Gutiérrez

Carlos Guerrero

Servicio Extensión Valle

Beatriz Rodríguez

Wilson Osorio

Luis Isaza

Servicio Extensión Nariño

Esneyder Rosero

Anderson Pabón

LITERATURA CITADA

- ÁLVAREZ G., J.** Desulpado de café sin agua. Chinchiná, Cenicafé, 1991. 6 p. (Avances Técnicos No. 164)
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA.** Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 1992. 1914 p.
- ARYAL, N.; REINHOLD, D.M.** Reduction of metal leaching by poplars during soil treatment of wastewaters: small-scale proof of concept studies, *Ecological Engineering* 78:53-61. 2015.
- AURAZO de Z., M.** Aspectos biológicos de la calidad del agua. p. 59-102. En: CANEPA DE V., L.; MALDONADO Y., V.; BARRENECHEA M., A. Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría Lima, CEPIS, 2004. 306 p.
- AURAZO DE Z., M.** Manual para análisis básicos de calidad del agua de bebida. Lima: CEPIS, 2004. 139 p.
- ÁVILA DE A., R.M.; RUÍZ R., L.D.** Caracterización y remoción de mucílago de las aguas residuales del beneficio del café. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1989. 217 p. (Tesis: Ingeniero Químico).
- AZBAR, N.; BAYRAM, A.; FILIBELI, A.; MUEZZINOGLU, A.; SENGUL, F.; OZER, A.** A review of waste management options in olive oil production. *Critical reviews in Environmental Science and Technology* 34(3):209-247. 2004.
- BARRENECHEA, M.A.** Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. p. 2-56. En: CANEPA DE V., L.; MALDONADO Y., V.; BARRENECHEA M., A. Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría. Lima: CEPIS, 2004. 306 p.
- BARTON, L.; SCHIPPER, L.A.; BARKLE, G.F.; MCLEOD, M.; SPEIR, T.W.; TAYLOR, M.D.; MCGILL, A.C.; SCHAIK, A.P. VAN; FITZGERALD, N.B.; PANDEY, S.P.** Land application of domestic effluent onto four soil types: plant uptake and nutrient leaching. *Journal of Environmental Quality* 34:635-643. 2005.
- BLANDÓN C., G.; RODRÍGUEZ V., N.; DÁVILA A., M.T.** Caracterización microbiológica y físico-química de los subproductos del beneficio del café en proceso de compostaje. *Cenicafé* 49(3):169-185. 1998.
- BUITRAGO G., G.M.; RAMÍREZ U., A.** Estudio de la floculación y sedimentación en aguas residuales de lavado del beneficio en la industria cafetera. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1991. 117 p. (Trabajo de grado: Ingeniero Químico).
- BUSTAMANTE, I. DE.** Land application: Its effectiveness in purification of urban and industrial wastewaters in La Mancha, Spain. *Environmental Geology* 16:179-185. 1990.
- CALLE V., H.** Subproductos del café. Chinchiná: Cenicafé, 1977. 84 p. (Boletín Técnico No. 6)
- CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. CENICAFÉ.** Construyendo el modelo para la gestión integrada del recurso hídrico en la caficultura colombiana. 2011. 91p (Premio Planeta Azul, 2011 Categoría Empresarial).
- COLOMBIT S.A.** Sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas. Manizales, Colombit, 2008. 22 p.
- DÁVILA A., M. T.; RAMÍREZ G., C.A.** Lombricultura en pulpa de café. Cenicafé, 1996. 11 p. (Avances Técnicos No. 225).
- DAWSON, W.M.; WILSON, F.E.A.** The use of short rotation coppice in the bioremediation of municipal wastewater, p. 399-404. En: BCPC International Congress Crop Science & Technology. Vol. 1. (1; November 10-12, 2003). Glasgow: BCPC, 2003.
- DECRETO No. 1594.** Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Bogotá: junio 6, 1984

- DECRETO No. 155.** Por el cual se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas y se adoptan otras disposiciones. Bogotá: enero 22, 2004.
- DECRETO No. 1575.** Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Ministerio de la Protección Social. Bogotá: mayo 7, 2007.
- DECRETO No. 3678.** Por el cual se establecen los criterios para la imposición de las sanciones consagradas en el artículo 40 de la Ley 1333 del 21 de julio de 2009 y se toman otras disposiciones. Bogotá: octubre 4, 2010.
- DECRETO No. 3930.** Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI – Parte III – Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Bogotá: octubre 25, 2010.
- DECRETO No. 1640.** Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones. Bogotá: agosto 2, 2012.
- DECRETO No. 2667.** Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones. Bogotá: diciembre 21, 2012.
- Decreto No. 50.** 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. Bogotá: Enero 16, 2018.
- DIMITRIOU, I.; ARONSSON, P.** Wastewater and sewage sludge application to willows and poplars grown in lysimeters - Plant response and treatment efficiency. *Biomass and Bioenergy* 35:161-170. 2011.
- EKOFIL.** Filtro de arcilla. [En Línea]. Cali: Ekofil, s.f. Disponible en Internet: <http://filtroekofil.com/>.. Consultado en Enero del 2018
- HAMMER, D.A.** Constructed wetlands for wastewater treatment; Municipal, Industrial and Agricultural. Chelsea: Lewis Publishers, 1991. 831 p.
- HERSCHBACH, C.; MULT, S.; KREUZWIESER, J.; KOPRIVA, S.** Influence of anoxia on whole plant sulphur nutrition of flooding-tolerant poplar (*Populus tremula* × *P. alba*). *Plant, Cell & Environment* 28:167-175. 2005.
- HOLM, B.; HEINSOO, K.** Municipal wastewater application to short rotation coppice of willows - Treatment efficiency and clone response in Estonian case study. *Biomass & Bioenergy* 57:126-135. 2013.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM.** Resumen Estudio Nacional del Agua 2006. Bogotá D.C.: IDEAM, 2006. 39 p.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM.** Estudio Nacional del Agua. Relaciones de demanda de agua y oferta hídrica. 2008. Bogotá: IDEAM, 2008. 160 p.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM.** Estudio Nacional del Agua 2010. Bogotá D.C.: IDEAM, 2010. 420 p.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM.** Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá D.C.: IDEAM, 2015. 496 p.
- IWANA GREEN.** Soluciones innovadoras de impacto social y ambiental. Lifestraw family [En Línea]. Disponible en <http://iwanagreen.com/lifestrawcommunity-1.html>. Consultado en enero del 2018
- LARDÉ, G.** Efecto coagulante del hidróxido cálcico en aguas residuales del café. p.v. En: SIMPOSIO sobre Caficultura Latinoamericana. Vol. 1 (17: Octubre 23-27 1995: San Salvador). Tegucigalpa: IICA: PROMECAFE, 1996. 16 p.
- LEY No. 1333.** Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones. Congreso de la República. Bogotá: julio 21, 2009.

LÓPEZ, R.; MARTINEZ-BORDIU, A.; DUPUY DE LOME, E.; CABRERA, F.; MURILLO, J. M. Land treatment of liquid wastes from the olive oil industry (Alp chin). *Frésenos Environmental Bulletin* 1(2):129-134. 1992.

METCALF AND EDDY INC. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. 3. Ed. Madrid: McGraw-Hill, 1995. 2 Volúmenes.

MIGUEL, A, DE; MEFFE, R.; LEAL, M.; GONZÁLEZ N., V.; MARTÍNEZ H., V.; LILLO, J.; MARTÍN, I.; SALAS, J.J.; DE BUSTAMANTE, I. Treating municipal wastewater through a vegetation filter with a short-rotation poplar species. *Ecological Engineering* 73:560-568. 2014.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Modelo de gestión integral del recurso hídrico. Bogotá: El Ministerio, 2005. 335 p.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico. Bogotá: El Ministerio, 2010. 124 p.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL: DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Plan nacional de manejo de aguas residuales municipales en Colombia. Versión Final. Bogotá: MAVDT: DNP, 2003. 59 p.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. El cuidado del agua. Bogotá: El Ministerio, 2013. 25 p.

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. Título E. Tratamiento de aguas residuales. Bogotá: El Ministerio: Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2000. 145 p.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales. Bogotá: El Ministerio, 2002. 64 p.

MOKMA, D.L. Capacity of soils to assimilate wastewaters from food processing facilities. [En Línea]. East Lansing: Michigan State University, 2006. Disponible en: <https://www.egr.msu.edu/~steves/Assimilation%20Capacity%2012-8-2007.pdf>. Consultado en enero del 2018.

NOYOLA R., A. Los procesos anaerobios en el tratamiento de aguas residuales. p. 95-109. En: SEMINARIO internacional sobre biotecnología en la agroindustria cafetalera. (1: Abril 12-15 1989: Xalapa). México: Instituto Mexicano del Café, 1989.

OCHOA, C.R.; RAMÍREZ C., J. M. Reducción de la contaminación producida por los desechos sólidos y líquidos del beneficiado del café; factibilidad técnica de las metodologías y tecnologías propuestas por el ICAFE. Informe Final. San José: Banco Interamericano de Desarrollo: Instituto del Café de Costa Rica, 1993. 208 p.

OLIVEROS T., C. E. El beneficio ecológico del café. p. 54-55. En: SEMINARIO sobre tecnología para la producción y beneficio de café orgánico. Chinchiná: Cenicafé-ICONTEC, 2002.

OLIVEROS T., C.E.; ÁLVAREZ G., J.; ÁLVAREZ M., F.; RAMÍREZ G., C.A.; ÁLVAREZ H., J.R. EL BECOLSUB 100: Beneficio ecológico para pequeños productores. Chinchiná: Cenicafé, 1999. 4 p. (Avances Técnicos No. 261)

OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; RAMÍREZ G., C.A.; ÁLVAREZ G., J.; ÁLVAREZ H., J.R. EL BECOLSUB 300. Chinchiná: Cenicafé, 1998. 8 p. (Avances Técnicos No. 253)

OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; RAMÍREZ G., C.A.; MEJÍA G., C.A. Separador hidráulico de tolva y tornillo sinfín. Manizales: Cenicafé, 2007. 8 p. (Avances Técnicos No. 360)

OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; RAMÍREZ G., C.A.; TIBADUIZA V., C.A. Ecomill. Tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café. Manizales: Cenicafé, 2013. 8 p. (Avances Técnicos No. 432)

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. Perfil sistema de salud en Colombia. Bogotá: OPS, 2009. 65 p.

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD: ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Cantidad mínima de agua necesaria para uso doméstico. Washington: OPS: OMS, 2009. 4 p. (Guías técnicas sobre saneamiento, agua y salud. Guía Técnica No. 9).

- OROZCO R., P. A.** Arranque y puesta en marcha de un reactor metanogénico tipo UAF para el tratamiento de las aguas residuales del lavado del café. Manizales: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2003. 90 p. (Trabajo de grado: Ingeniera Química).
- RAMÍREZ G., C.A.** Disminución del impacto ambiental en la tecnología BECOLSUB, mediante la evaporación de lixiviados. Manizales: Universidad de Manizales. Facultad de Ciencias Contables, Económicas y Administrativas, 2011. 105 p. (Trabajo de grado; Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente)
- REED, S.C.; CRITES, R.W.; MIDDLEBROOKS, E. J.** Natural systems for waste management and treatment. 2. Ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 1995 433 p.
- RENDÓN S., J.R.** Implementación y evaluación de estrategias para el manejo integrado del agua en la Estación Central Naranjal Cenicafé. Manizales: Universidad de Manizales. Facultad de ciencias contables económicas y administrativas, 2014. 167 p. 74 Refs. Esp. (Trabajo de Grado: Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente).
- RESOLUCIÓN No. 2115.** Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Ministerio de la Protección Social. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá: junio 22, 2007.
- RESOLUCIÓN No. 2086.** Por el cual se adopta la metodología para la tasación de multas consagradas en el numeral 1 del artículo 40 de la Ley 1333 del 21 de julio de 2009 y se toman otras determinaciones. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá: octubre 25, 2010.
- RESOLUCIÓN No. 1207.** Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá: agosto 13, 2014
- RESOLUCIÓN No. 631.** Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y al alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá: Marzo 17, 2015.
- ROA, G.; OLIVEROS, C.E.; ÁLVAREZ, J.; RAMÍREZ, C.A.; SANZ, J.R.; DÁVILA, M.T.; ÁLVAREZ, J.R.; ZAMBRANO, D.A.; PUERTA, G.I.; RODRÍGUEZ, N.** Beneficio ecológico del café. Chinchiná: Cenicafé, 1999. 300 p.
- RODRÍGUEZ V., N.** Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio ambiente, 2009. 508 p. (Trabajo de Grado: Doctor)
- RODRÍGUEZ V., N.; JARAMILLO L., C.** Cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus* en residuos agrícolas de la zona cafetera. Chinchiná: Cenicafé, 2005. 56 p. (Boletín Técnico No. 27)
- RODRÍGUEZ V., N.; JARAMILLO L., C.** Cultivo de hongos medicinales sobre residuos agrícolas de la zona cafetera. Chinchiná: Cenicafé, 2005. 72 p. (Boletín Técnico No. 28)
- RODRIGUEZ V., N.; QUINTERO Y., L.V.** Uso eficiente y ahorro del agua y los instrumentos para su planificación y control: Módulo 3. Chinchiná: FMM, 2015.
- RODRIGUEZ V., N.; QUINTERO Y., L.V.** Tratamiento y disposición adecuada de las aguas residuales y los instrumentos para su planificación y control: Módulo 4. Chinchiná: FMM, 2015.
- RODRÍGUEZ V., N.; SANZ U., J.R.; OLIVEROS T., C.E.; RAMÍREZ G., C.A.** 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. Manizales: Cenicafé, 2015. 35 p.
- RODRÍGUEZ V., N.; ZAMBRANO F., D.A.** Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. Chinchiná : Cenicafé, 2010. 8 p. (Avances Técnicos No. 393)
- SIMONETE, M.A.; CHAVES, D.M.; TEIXEIRA, C.F.A.; MORO, L.; NEVES, C.U.** Calcium supply for *Eucalyptus saligna* plants by the application of industrial waste lime sludge. Revista Brasileira de Ciencia do Solo 37(5):1343-1360. 2013.

SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS. Informe Técnico sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. Bogotá: La Superintendencia, 2013. 69 p

TRAPP, S.; CIUCANI, G.; SISILICH, M. Toxicity of tributyltin to willow trees. *Environmental Science and Pollution Research* 11(5):327-330. 2004.

VÁSQUEZ M., R. El manejo de efluentes en el beneficiado del café en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 21(1):69-76. 1997.

WASSER, R.; OROZCO, C.; CANTERO, V.; MESIAS, O. Experiencias sobre el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del café en Matagalpa, Nicaragua. *Boletín de Promecafé* 52-53:6-15. 1991.

ZAMBRANO F., D.A. Fermente y lave su café en el tanque tina. Chinchiná: Cenicafé, 1993. 8 p. (Avances Técnicos No. 197).

ZAMBRANO F., D.A., CARDENAS C., J. Manejo y tratamiento primario de lixiviados producidos en la tecnología BECOLSUB. Chinchiná: Cenicafé, 2000. 4 p. (Avances Técnicos No. 280)

ZAMBRANO F., D.A.; ISAZA H., J. D. Demanda química de Oxígeno y Nitrógeno total, de los subproductos del proceso tradicional de beneficio húmedo del café. *Cenicafé* 49(4):279-289. 1998.

ZAMBRANO F., D.A.; ISAZA H., J. D.; RODRÍGUEZ V., N.; LÓPEZ P., U. Tratamiento de aguas residuales del lavado del café. Chinchiná: Cenicafé, 1999. 26 p. (Boletín Técnico No. 20)

ZAMBRANO F., D.A.; RODRÍGUEZ V., N.; LÓPEZ P., U.; ZAMBRANO G., A.J. Construya y opere su sistema modular de tratamiento anaerobio para las aguas mieles. Chinchiná: Cenicafé, 2010. 35 p.

ZAMBRANO F., D.A.; ZULUAGA V., J. Balance de materia en un proceso de beneficio húmedo del café. *Cenicafé* 44(2):45-55. 1993.

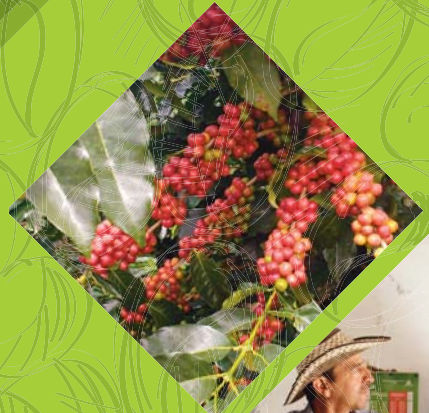
ZULUAGA V., J.; ZAMBRANO F., D.A. Manejo del agua en el proceso de beneficio húmedo del café para el control de la contaminación. Chinchiná: Cenicafé, 1993. 8 p. (Avances Técnicos No. 187)

ZUPANC, V.; JUSTIN, M.Z. Changes in soil characteristics during landfill leachate irrigation of *Populus deltoides*, *Waste Management* 30(11):2130-2136. 2010.

ISBN: 978-958-8490-27-4



9 789588 490274



 /Manos-al-Agua-803495479773162

 /ManosAlAgua

 /manosalagua

 Manos al agua