

**EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE LAS ÁREAS RURALES
COLOMBIANAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE FILTROS VERDES COMO
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL**

JESSICA ESTEPHANY TORRES FORERO

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2018**

**EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE LAS ÁREAS RURALES
COLOMBIANAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE FILTROS VERDES COMO
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL**

JESSICA ESTEPHANY TORRES FORERO

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

ASESOR DEL TRABAJO: MAURICIO GONZALES

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2018**



Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Compartir bajo la Misma Licencia — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

AGRADECIMIENTOS

A la vida que me puso aquí, con dificultades, felicidades y errores para que hiciera de este documento uno de muchos logros que quiero alcanzar, para luego mirar atrás y continuar construyendo lo que conocemos como destino, como futuro.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. GENERALIDADES.....	11
1.1 Planteamiento del problema	13
1.2 Objetivos.....	14
1.3 Justificación	14
1.4 Delimitación	15
1.5 Marco referencial.....	16
1.6 Metodología.....	20
1.7 Diseño metodológico	20
FUNCIONAMIENTO DE FILTRO VERDE: PROCESO FISICO, QUÍMICO Y BIOLÓGICO.....	22
CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO	24
1. OPERACIÓN.....	24
1.1. Pretratamiento y riego	24
1.2. Selección del cultivo	28
1.2.1. Capacidad de absorción y concentración de nitrógeno	32
2. DEL ENTORNO	33
2.1. Características del terreno.....	33
2.2. Climatológicos	34
ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES COLOMBIANAS PARA LA IMPLEMENTACION DE FILTRO VERDE EN ZONAS RURALES.....	37
1. INDICE DE RURALIDAD EN COLOMBIA	37
2. POBLACIÓN RURAL FRENTE A LA URBANA EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL.....	39
3. CALIDAD DEL AGUA	41
4. FUENTE QUE RECIBE LA DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES (Unicef et al. 2006).....	48
5. ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL FILTRO VERDE EN EL ENTORNO COLOMBIANO.....	49
5.1. Precipitación	49
5.2. Temperatura	51
5.3. Evapotranspiración.....	52
POSIBLE IMPACTO DE LA IMPLEMENTACION DE FILTROS VERDES COMO TRATAMIENTO SOSTENIBLE DE AGUA RESIDUAL EN ZONAS RURALES.....	54
1. MANEJO DE VERTIMIENTOS (Londoño Pérez y Parra Martínez 2007)	55
2. FILTRO VERDE COMO MANEJO DE VERTIMIENTOS PARA LAS ZONAS RURALES.....	60
CONCLUSIONES	64
BIBLIOGRAFIA	66

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Intercambio iónico y absorción de nutrientes.....	22
Figura 2 Ciclo del nitrógeno	23
Figura 3 Riego por aspersores.....	25
Figura 4 Riego por goteo	26
Figura 5 Riego superficial. a) Riego por surcos b) Riego por inundación.	27
Figura 6 Árbol y corteza del sauce (<i>Salix humboldtiana</i>)	29
Figura 7 <i>Eucalyptus globulus</i> , Eucalipto.	30
Figura 8 Esquematización de la Evapotranspiración	35
Figura 9 Mapa áreas Hidrográficas de Colombia.....	41
Figura 10 Carga contaminante de DBO por municipio.....	46
Figura 11 Índice de Estacionalidad de la Precipitación.....	50
Figura 12 Temperatura media anual (°C) Promedio multianual	51
Figura 13 Evapotranspiración total anual (mm)	53
Figura 14 IACAL año medio.....	59

LISTA DE GRAFICOS

	Pág.
Grafico 1 Análisis de las dosis óptimas de aplicación de nitrógeno: Agronómica (1), económica (2) y ambiental (3). Curvas: A, Coste del N aplicado; B, coste ambiental del N aplicado; C, beneficio agrícola ambiental; D, beneficio agrícola y E, producción bruta.....	32
Grafico 2 Índice de Ruralidad.....	38
Grafico 3 Municipios que formulan programas y proyectos sobre la planta de agua residual	39
Grafico 4 Municipios con reporte de STAR por departamento.....	40
Grafico 5 Cargas contaminantes áreas hidrográfica del Caribe.....	42
Grafico 6 Cargas contaminantes áreas hidrográfica del Magdalena - Cauca	42
Grafico 7 Cargas contaminantes áreas hidrográfica del Orinoco.....	43
Grafico 8 Cargas contaminantes áreas hidrográfica del Pacífico.....	43
Grafico 9 Cargas contaminantes áreas hidrográfica del Amazonas	44
Grafico 10 Carga contaminante Total	45
Grafico 11 Municipios que reseñan la fuente de descarga de aguas residuales ...	48
Grafico 12 Municipios que hacen descargas en una o más fuentes de agua	49
Grafico 13 Vertimientos puntuales y no puntuales.....	57

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Factores que favorecen la elección del método de riego	28
Tabla 2 Características comparativas de chopos y eucaliptos	31
Tabla 3 Características que debe reunir el terreno en el que se implante un sistema de baja carga	34
Tabla 4 Carga de contaminación removida en sistemas de tratamiento de aguas residuales	47
Tabla 5 Sistemas naturales vs. Sistemas convencionales.....	55
Tabla 6 Política y normatividad relacionada con el manejo	56
Tabla 7 Proyecciones de uso de agua total en los sectores económicos y uso doméstico millones de m ³	62

RESUMEN

El tratamiento de agua residual, se ha convertido en un ejercicio de suma importancia por las consecuencias negativas que trae los vertimientos de estas aguas sobre las diferentes fuentes receptoras del país. Los filtros verdes, son mecanismos sostenibles que se adaptan al medio al cual se incorporan generando diferentes beneficios. La adopción de este mecanismo debe diseñarse en búsqueda de los mejores rendimientos, por tal motivo, se hace necesario evaluar las condiciones de su funcionamiento para una posible implementación en las zonas rurales del territorio colombiano, en búsqueda de las características generales que pueden determinar los lugares de menor o mayor rendimiento, sin dejar a un lado aquellas características propias del terreno. La normativa actual establece el acceso de agua potable como prioridad para todo el país y en segunda instancia el tratamiento de agua residual lo que convierte a los filtros verdes en una excelente alternativa para la depuración del agua en las zonas rurales por sus altos rendimientos depurativos, bajos costos de mantenimiento y la facilidad de control e implementación de esta tecnología blandas. Teniendo en cuenta el poco desarrollo de los sectores rurales frente al urbano, este mecanismo alternativo podría llegar a dar solución a la problemática actual de la carencia del tratamiento de agua residual.

Palabras clave: Filtro verde, agua residual, sostenible, depuración, rural.

INTRODUCCIÓN

1. GENERALIDADES

Colombia es un país que de acuerdo al DANE(DANE 2017) cuenta con una población aproximada de 49.291.609 personas para el 2017, convirtiéndose en un lugar que tiene mucho por hacer en los diferentes campos para el desarrollo. Una problemática de gran preocupación es la falta de tratamiento de agua residual, ya que sólo el 9% de las aguas de alcantarillado son tratadas en el país como menciona un artículo web del periódico El Espectador(Redacción Negocios 2008).

Los contaminados caudales de agua que llegan a los diferentes afluentes del país dan lugar a pésimas condiciones de salubridad para las comunidades que se benefician de ellas en actividades económicas como la agricultura, la ganadería o para el propio consumo humano, afectando en muchos casos, los productos de la agricultura u ocasionan daños irreversibles para el medio ambiente afectando la interacción de los ecosistemas. Estas aguas no logran realizar de manera correcta la depuración de forma natural por la alteración que se le da al sistema al llenarse de materia orgánica e inorgánica o diferentes sustancias químicas contaminantes para el agua. Sumándose a esto, el calentamiento global presenta aumento de temperatura y disminución de la precipitación modificando la tendencia de los cambios de las características agroclimáticas para el desarrollo de los cultivos agrícolas (Meladze y Meladze 2017) actividad de gran importancia en la economía del país.

Por otro lado, el tratamiento de agua residual requiere de un proceso físico, químico y biológico que permite reducir los contaminantes presentes, beneficiando el medio ambiente y la población.

Las áreas rurales, son lugares que obtendrían un beneficio de las tecnologías sostenibles para la depuración del agua residual ya que son mecanismos que necesitan de grandes extensiones de terrenos para ser implementados y bajos caudales que no permiten las áreas urbanas. Dentro de las tecnologías sostenibles encontramos diferentes mecanismos para la depuración de agua residual, uno de ellos es denominado “filtro verde”, es compuesto por una superficie de terreno sobre la que se establecen una o varias especies vegetales y a la que se aplica periódicamente el agua residual a tratar mediante algún método de riego.

Estos mecanismos necesitan de escenarios específicos para desarrollarse, por tal razón, se da una investigación de los factores influyentes y las condiciones rurales del territorio Colombiano para ser implementados, ya que dentro de la variedad climática, pluvial y geografía del país, se encuentran limitaciones para desarrollarse siendo esta la temática a tratar en el documento: Departamentos donde pueden implementarse estos mecanismos sostenibles y obtener buenos resultados de rendimiento al tratar el agua residual mediante filtros verdes.

Las aguas residuales no siempre son atendidas de la forma adecuada, ni obtienen recursos necesarios para ser tratadas generando diferentes problemáticas ambientales y de salubridad ya que al alcanzar las fuentes receptoras de agua generan problemas para los que se benefician de este fluido al convertirse en aguas no potables para el consumo humano por su contenido de microbios, parásitos o sustancias tóxicas causantes de diversas enfermedades graves como el cólera, que se propaga rápidamente y puede causar la muerte (Conant y Fadem 2008). Las tecnologías no convencionales son una alternativa viable para el tratamiento de estas aguas en comunidades rurales por sus características para ser implementadas, la adaptabilidad e integración al entorno.

Se identifican diferentes métodos de tecnologías sostenibles, dentro de ellas existen manuales que hacen una descripción detallada de cada proceso no convencional que se ha desarrollado para el tratamiento de aguas residuales, que están sometidas a una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, aportan información sobre los fundamentos, parámetros de diseño, características constructivas, labores de explotación y mantenimiento sobre los rendimientos que alcanzan las distintas tecnologías sostenibles existentes para el tratamiento de las aguas residuales. Se han investigado los diferentes mecanismos y encontramos micro algas, siendo de gran interés su funcionamiento ya que estas pueden utilizarse para remediar las aguas residuales y de forma simultánea producir biomasa (Yu et al. 2017).

Las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) son mecanismos convencionales de elevado costo de construcción y operación mientras que los mecanismos no convencionales, son alternativas sostenibles, de bajo costo de operación, mínimo consumo energético, no requiere personal técnico y tienen una buena integración en el medio ambiente (Morató et al. 2006).

Los humedales artificiales son uno de los más investigados e implementados para la depuración de estas aguas. El agua residual fluye dentro o debajo de la capa superficial de masas de tierra en el humedal presentando muy buenos índices en la eliminación de contaminantes como nitrógeno, fosforo, DBO5, DQO y SST (Lu, Pei y Bai 2014). Los humedales artificiales son una alternativa que busca reproducir los procesos de un humedal natural, esta propuesta ha sido fuente de inspiración para el desarrollo de proyectos de grado para la Universidad Militar titulada Humedales artificiales de flujo vertical para mejorar la calidad del agua del río Bogotá (Rodríguez Chaparro y Ospina 2005) que busca evaluar la capacidad de reducción de compuestos orgánicos e inorgánicos en un humedal de flujo vertical a escala laboratorio alimentado con agua del río Bogotá; por otra parte La Universidad católica de Colombia investigo de los beneficios de tratar el agua residual mediante la implementación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales del barrio Fontanar de Suba (Forero Ruiz y Urrego Rojas 2016).

Se implementan otras alternativas de saneamiento en búsqueda de tratar las aguas residuales de forma natural constituido por una superficie de terreno sobre la que se establecen una o varias especies vegetales(Álvarez 2002) llamados filtros verdes o las construcciones de lagunajo que buscan asemejar los procesos ocurridos en los ríos o lagos(Alianza por el agua 2008).

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 Descripción del problema

Las áreas rurales colombianas son poblaciones que no son atendidas y supervisadas de la mejor forma por el Estado viéndose aisladas del desarrollo económico y social en comparación a la ciudad. La falta de recursos económicos, servicios básicos y la poca infraestructura de acueducto y alcantarillado dan origen a problemas de sanidad y contaminación.

Las áreas rurales colombianas, son poblaciones que no son atendidas y supervisadas de la mejor forma por el Estado, viéndose aisladas del desarrollo económico y social en comparación a la ciudad. La falta de recursos económicos, servicios básicos y la poca infraestructura de acueducto y alcantarillado, dan origen a problemas de sanidad y contaminación.

La poca inversión para el tratamiento de agua residual que presentan estas comunidades no da la opción de la construcción una Planta de Tratamiento de agua residual (PTAR) convencional ya que estas presentan un elevado costo de construcción, operación y mantenimiento. El no tratamiento de estas aguas desmejora la calidad de la fuente receptora, deteriorando, contaminando y afectando la comunidad existente frente a problemas de salubridad y a las especies que interactúan dentro y fuera del recurso hídrico.

Como medida sostenible para el tratamiento de agua residual en áreas rurales, los filtros verdes son un medio factible en el territorio colombiano para la depuración de contaminantes, evaluando las condiciones necesarias ya que no todas las regiones del país presentan las características idóneas para ser implementados los filtros verdes por su variabilidad de pisos térmicos, geología, humedad, pluviosidad, climatología, entre otros factores determinantes para el diseño e implementación de este mecanismo.

1.1.2 Formulación del Problema

Al evidenciarse poco o nulo tratamiento de agua residual en las zonas rurales ¿Cuáles son las condiciones que permiten la implementación de filtros verdes como tratamiento de estas aguas?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar la posible implementación de filtros verdes para las condiciones rurales colombianas para el tratamiento de agua residual.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar el funcionamiento, características e impactos que desarrollan los filtros verdes en el proceso de depuración de agua residual.
- Identificar las condiciones donde es viable la implementación de filtros verdes en áreas rurales colombianas.
- Evaluar el posible impacto de los filtros verdes al ser implementados en el tratamiento de agua residual en el territorio rural colombiano.

1.3 Justificación

En la actualidad enfrentamos problemas de acueducto y alcantarillado siendo una problemática de salud que se ve marcado especialmente en los sectores más vulnerables. Colombia es un territorio en el cual se identifica la brecha de los intereses de los sectores urbanos y sectores rurales, siendo estas últimas zonas de poco interés por el estado, aislándolos de un desarrollo hacia el acceso de agua potable y el tratamiento de aguas residuales.

Debido a las acciones que modifican el ciclo natural del agua, y en búsqueda de herramientas que nos permitan convivir de forma amigable con el planeta y el desarrollo económico, industrial, social y todos aquellos factores que perturban el medio ambiente entramos a analizar la problemática que tienen las zonas rurales en Colombia del tratamiento de agua residual y en búsqueda de disminuir el impacto ambiental, se implementan sistemas no convencionales de tratamiento.

Dentro de las diferentes opciones que se encuentran en los sistemas naturales para la depuración de agua, se opta por la implementación del sistema de filtros verdes bajo las diferentes condiciones climatológicas, geológicas, ambientales, entre otros factores que influyen en su operación.

1.4 Delimitación

1.4.1 Espacio

Este documento se ubica espacialmente en el territorio colombiano, en los sectores rurales donde las condiciones permitan una posible implementación de filtros verdes.

1.4.2 Tiempo

El periodo de investigación, análisis, y resultados se desarrolla desde el segundo semestre académico del 2017 hasta el primer semestre académico del 2018.

1.4.3 Contenido

El documento presenta una evaluación sobre las condiciones necesarias para la implementación de filtros verdes en zonas rurales del territorio colombiano teniendo en cuenta diferentes características que afectan el proceso de la depuración del agua y las condiciones que nos ofrece el territorio para tal fin, teniendo en cuenta la situación actual del tratamiento de agua residual y los beneficios que aportaría la implementación de filtros verdes.

Estas condiciones se desarrollan en primera instancia desde conocimientos teóricos del funcionamiento de un filtro verde y todas las acciones pertinentes del proceso y del entorno en el que se desarrolla este, a partir de esto se evalúan las condiciones que nos ofrece la zona rural donde se permita la implementación para finalmente identificar los beneficios.

1.4.4 Alcance

El alcance del proyecto se desarrolla para todo el territorio Colombiano, específicamente las zonas rurales donde no existan mecanismos para el tratamiento del agua residual realizando una investigación de las condiciones climatológicas, geológicas, topográficas y ambientales entre otras que se deban tener en cuenta para que se desarrolle la depuración del agua mediante un filtro verde dando la posibilidad de ser implementado en estas áreas problemáticas mitigando los impactos negativos que generan el no tratamiento de las aguas residuales.

Para tal fin se tomarán recursos bibliográficos como lo son manuales, artículos científicos, libros, base de datos, tesis, con base a las nuevas tecnologías sostenibles para la depuración del agua, también se tendrán en cuenta la información de las estaciones climatológicas, datos de la evaluación de la condición socio económica de los territorios rurales del país.

1.5 Marco referencial

1.5.1 Marco Teórico

1.5.1.1 Sistemas de tratamiento mediante la aplicación del suelo por Filtro Verde:

Los sistemas de tratamiento a través de la aplicación del suelo para la depuración de las aguas residuales, se basan en el empleo del suelo como elemento depurador a través de infiltraciones, el agua residual percola vertical y lateralmente a través del suelo, que puede recuperar sus condiciones aerobias gracias a los procedimientos cíclicos de aplicación. La cubierta vegetal juega un importante papel en el proceso de tratamiento (Alianza por el agua 2008).

Como se menciona en el Manual de Depuración de Agua Residual, un filtro verde consiste en una superficie de terreno donde se instaura una plantación forestal, a la que se aplican, de forma sistemática y programada, aguas residuales. La depuración de estas se logra por la combinación de procesos físicos, químicos y biológicos. Una parte de estas aguas se evapora y el resto es absorbido por las raíces de los árboles o filtrado a través del suelo.

La depuración se realiza mediante la acción conjunta del suelo, los microorganismos y las plantas por medio de una triple acción: física (filtración), química (intercambio iónico, precipitación y fenómenos de óxido-reducción) y biológica (degradación de la materia orgánica) (Merino et al. 2003).

Se presenta eliminación de sólidos de suspensión, orgánicos e inorgánicos, por el proceso de filtración a través del suelo, y en menor medida, por filtración a través de formas vegetales vivas y de los propios desechos vegetales. También sucede un proceso de eliminación de materia orgánica mediante la actividad bacteriana anaeróbica que se hallan en el suelo formando una ligera capa que envuelve las partículas teniendo un proceso de oxidación bioquímica que mineraliza la materia orgánica. Para los sistemas de tratamiento debe diseñarse de forma que la demanda de oxígeno para la depuración de la materia orgánica sea menor a la velocidad de transferencia de oxígeno al suelo.

Debido a la descomposición de la materia orgánica realizada por las bacterias anaeróbicas se da una eliminación de nutrientes dando origen a que el nitrógeno pase de formas de amoniacales a nitritos y nitratos. El fósforo se oxida y da con las bases, fosfatos que por una parte se inmovilizan y son retenidos por la vegetación y por otra parte percola. Este fósforo en presencia de cal queda inmovilizado (Sainz Sastre 2005). El procedimiento de eliminación de organismos patógenos como bacterias, virus, protozoos, helmintos debe pasar por una serie de etapas de sedimentación, retención, depredación, radiación, desecación y adsorción.

1.5.1.2 Teoría del diseño de filtros verde (Merino et al. 2003)

- Carga hidráulica de diseño (C_h).

Se determina la carga hidráulica evaluando dos condiciones: el comportamiento de la permeabilidad del suelo y la concentración de nitrógeno en el agua percolada, escogiendo la condición más restrictiva de las dos.

- Carga hidráulica basada en la permeabilidad del suelo

Para el cálculo se toma como base la ecuación del equilibrio hídrico en el suelo, que para un periodo mensual viene dado por la expresión:

$$C_{hpm} = ETP_m - P_{rm} + T_{im}$$

(Ecuación 1)

C_{hpm} : Carga hidráulica mensual basada en la permeabilidad del suelo (mm/mes).

ETP_m : Evapotranspiración potencial (mm/mes).

P_{rm} : Precipitación mensual. Se determina a partir de los valores medidos durante un periodo de retorno de 10 años (mm/mes).

T_{im} : Tasa de infiltración mensual (mm/mes). Para el cálculo de T_{im} se procederá a determinar in situ la permeabilidad más baja del terreno sobre el que se va a asentar el filtro verde. A partir de este dato se establece la tasa de infiltración de diseño, que no deberá exceder del 4-10% de la permeabilidad mínima.

$$T_{i \text{ diaria}} = \text{Permeabilidad (mm/h)} \times 24(h/d) \times (0,004 \text{ a } 0,1)$$

(Ecuación 2)

La tasa de infiltración mensual se determina mediante la expresión:

$$T_{i \text{ mensual}} = T_{i \text{ diaria}} \times \text{número de días de riego al mes}$$

(Ecuación 3)

La carga hidráulica anual basada en la permeabilidad del terreno (C_{hpa} , mm/año), se obtiene como suma de las cargas hidráulicas obtenidas para cada mes.

- Carga hidráulica basada en el balance de nitrógeno

Para su cálculo se debe realizar un balance entre el aporte de nitrógeno al terreno, consecuencia de la aplicación del agua residual y la eliminación de ese nutriente

que tiene lugar por las distintas vías: fenómenos de nitrificación des nitrificación, volatilización del amoniacó, captación por el cultivo, etc.

$$C_{hNa} = \frac{N_i(P_r - ETP) + 10C}{(1-f)N_a - N_i}$$

(Ecuación 4)

C_{hNa} : Carga hidráulica anual basada en las limitaciones de aplicación de nitrógeno (mm/año).

P_r : Precipitación anual (mm/año).

ETP : Evapotranspiración potencial anual (mm/año).

C : Consumo anual de nitrógeno por el cultivo.

f : Fracción eliminada por desnitrificación y volatilización del nitrógeno (15-25%)

N_a : Concentración media de nitrógeno en el agua residual (mg/L)

N_i : Concentración de nitrógeno en el agua percolada (mg/L)

Una vez determinado el valor de C_{hNa} se compara con el valor de C_{hpa} :

1. Si $C_{hpa} < C_{hNa}$.se toma C_{hpa} como carga hidráulica de diseño.
2. Si $C_{hpa} > C_{hNa}$, se deben obtener los valores mensuales de C_{hNa} , aplicando los correspondientes valores de P_{rm} y ETP_m . Los valores mensuales del termino C , pueden estimarse suponiendo un reparto proporcional a los de la ETP .

Efectuados estos cálculos, se tomara como valor de C_h de diseño la suma de las cargas mensuales que resulten menores, bien por permeabilidad o por nitrógeno.

- Cálculo de la superficie necesaria

Establecido el valor de la carga hidráulica de diseño (C_h), se procede a calcular la superficie necesaria de filtro verde mediante la expresión:

$$S = \frac{365 \times Q}{10 \times C_h}$$

(Ecuación 5)

S : Superficie necesaria (ha).

Q : Caudal medio diario de aguas residuales a tratar (m^3/s).

C_h : Carga hidráulica de diseño (mm/año).

1.5.2 Marco Conceptual

De acuerdo con el RAS(Ministerio de desarrollo economico 2000) (Reglamento Técnico Del Sector De Agua) el agua residual es aquella que contiene material disuelto y en suspensión, luego de ser usada por una comunidad o industria, generalmente conducidas por sistemas de alcantarillado y tratadas en una planta de tratamiento de aguas para su depuración antes de su vertido (PTAR) como medio para evitar un problema de salud pública, del medio ambiente o de bienestar social.

Un inconveniente que encontramos con las PTAR, sistemas convencionales, son mecanismos que requieren de numerosos equipos y sistemas electromecánicos que producen costos de explotación y mantenimiento elevados(ALFA TECSPAR 2014) por tal razón y por sus grandes beneficios las tecnologías sostenibles para el tratamiento del agua son procedimientos naturales de depuración que no emplean aditivos químicos y eliminan las sustancias contaminantes, usando vegetación acuática, el suelo y microorganismos(Morató et al. 2006)

Existen diferentes mecanismos sostenibles para el tratamiento de agua residual que se caracterizan por su bajo costo de construcción e implementación, desarrollando unos procesos muy similares de depuración los unos con los otros, dentro de ellos encontramos los siguientes(Álvarez 2002):

- Humedales artificiales: Construcciones hechas por el hombre que buscan simular un humedal natural que permanece parcial o permanentemente inundado.
- Lagunaje: Son un medio artificial en el que el agua residual a tratar pasa por un conjunto de balsas dispuestas en serie bajo condiciones anaerobias y aerobias
- Filtro verde: Sistema natural de tratamiento de aguas residuales por aplicación al suelo, constituido por una superficie de terreno sobre la que se establecen una o varias especies vegetales y a la que se aplica periódicamente el agua.

Las áreas rurales se caracterizan por la disposición dispersa de viviendas realización de actividades del campo (agricultura, ganadería, porcicultura, etc.) que no dispone, por lo general, de servicios públicos y otro tipo de facilidades propias de las áreas urbanas(Departamento Nacional de Planeacion 2016). Estos sectores son zonas idóneas para la implementación de tecnologías no convencionales de depuración de agua residual ya que poseen una amplia superficie donde pueden ser implementados estos mecanismos y su bajo costo beneficia la comunidad por la poca inversión que requiere. La amplia zona donde se verterá el agua residual

está condicionada por la carga hidráulica siendo una medida específica de la presión del líquido por encima de un datum evaluando la permeabilidad del suelo y la concentración de nitrógeno.

En general la depuración del agua ocurre mediante la percolación que es el proceso por el cual el agua vertida es filtrada por alguna capa porosa reteniendo los sólidos en suspensión no degradables, sólidos que no se deshacen en la presencia de bacteria u hongos, generando una oxidación bioquímica que es la transferencia de hidrógenos mediante el suelo o alguna vegetación. Las tecnologías sostenibles actúan en conjunto con organismos como las bacterias anaerobias encargadas de la eliminación de materia orgánica, nutrientes y patógenos causantes de la contaminación

1.6 Metodología

1.6.1 Tipo de Estudio

El documento basa su estudio en la investigación documental del funcionamiento del filtro verde, las necesidades del territorio colombiano en las zonas rurales para tratar el agua residual, el análisis de las condiciones de mejor rendimiento para una posible implementación de la tecnología sostenible, filtro verde.

1.6.2 Fuentes de Información

Revisión bibliográfica de manuales, artículos científicos, libros, tesis, entre otros; también se investigará información sobre las características de las regiones rurales de Colombia mediante base de datos como el IDEAM, DANE, SIGOT y demás.

1.7 Diseño metodológico

De acuerdo a Billy Vaughn Koen el método de la ingeniería como el arte es el de inventar o diseñar. A partir de esto el ingeniero debe entender, planear, ejecutar y examinar. Se debe entender la necesidad del mundo y generar soluciones innovadoras, oportunas y eficientes que eleven la calidad de vida de los seres humanos y aseguren el desarrollo sostenible de un país.

La necesidad de Colombia de tratar el agua residual se basa en la importancia de hacer llegar a la fuente receptora el agua en las mejores condiciones, teniendo en cuenta el incremento de la población. Muchas veces esta depuración no se puede realizar de forma natural Al reconocer la situación problema se demanda su intervención para transformar el objeto o realidad donde se permita prever y proveer la mejor solución.

El tratamiento de agua residual se ha venido realizando mediante mecanismos convencionales como las plantas de tratamiento de agua residual otorgando una

solución al vertimiento de estas aguas que en muchas ocasiones por sus costos de mantenimiento de construcción y operación no son viables para zonas rurales. El método del ingeniero será, entonces, el mejor camino entre el problema y la solución con los recursos disponibles por lo que se procede a identificar e interpretar la necesidad de esta zona en específico. Analizar las diferentes alternativas de solución y sus restricciones para decidir y seleccionar mediante la modelación y la simulación del objeto, fenómeno o proceso en su situación futura la más viable y apropiada.

Los filtros verdes se convierten en una buena alternativa para implementar en las zonas rurales en las que se necesite y permita, de acuerdo a sus características, una posible implementación. Diseñar la mejor solución, para el tratamiento de agua residual que facilite su adaptación durante el proceso de ejecución teniendo en cuenta el costo económico es el resultado de las características del entorno y propias del lugar que garantices los mejores rendimientos.

Teniendo en cuenta esto se procede a realizar tres fases que permitan identificar el filtro verde como posible solución del tratamiento de agua residual en zonas rurales.

- Fase de consulta: Periodo en el cual se realiza la debida consulta de información que permita entender el procedimiento y funcionamiento de los filtros verdes como alternativa sostenible para la depuración de agua residual
- Fase de evaluación: Fase en la cual se evalúan las condiciones de desarrollo de los filtros verdes, analizando y comparando las características de las áreas rurales en Colombia que dentro de su variabilidad permitan la implementación y uso correcto de filtro verde para la depuración de agua residual.
- Fase de proyección: Finalmente se desarrollará un documento detallado de los procesos, funcionamiento, diseño y recomendaciones climáticas, pluviales, geológicas y de la variabilidad de plantas necesarias que se ajusten a las condiciones que ofrece el territorio rural colombiano para el tratamiento de agua residual como mecanismo sostenible.

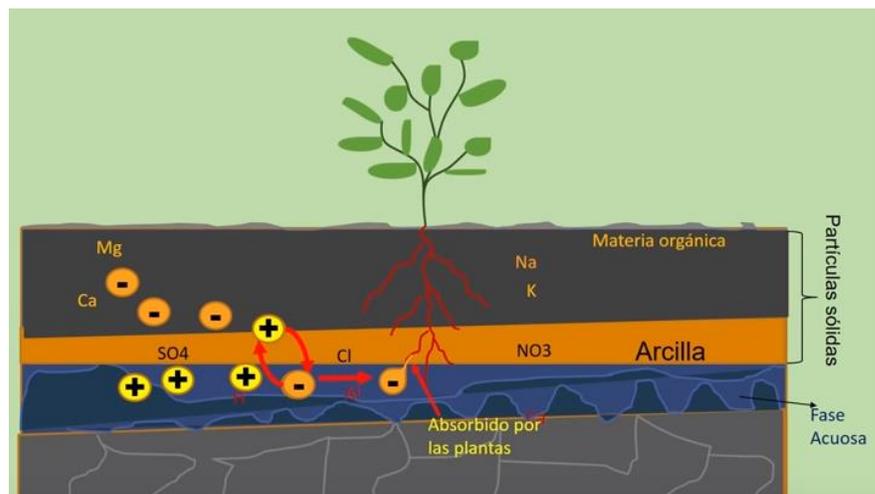
FUNCIONAMIENTO DE FILTRO VERDE: PROCESO FÍSICO, QUÍMICO Y BIOLÓGICO

El filtro verde es un mecanismo natural a la que se aplica periódicamente el agua residual a tratar mediante algún método de riego, este realiza la depuración del agua mediante la interacción conjunta del suelo, plantas y microorganismos por medio de tres procesos: físico, químico y biológico(Merino et al. 2003), eliminando en su mayor totalidad los contaminantes presentes en el agua residual como: solidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes como fosforo y nitrógeno, metales y microorganismos patógenos. Al ser un proceso natural no necesita de la adición de agentes químicos para la depuración del agua residual(CONAGUA 2015) .

El proceso físico (filtración) tiene como función la captación de solidos suspendidos, reteniéndolos en la primera capa del terreno que depende de una granulometría especifica que permita la filtración del agua residual. Por lo general los mecanismos de filtración se realizan en un pretratamiento(Alianza por el agua 2008).

Solo una pequeña parte de los nutrientes está disponible para ser absorbida por la planta, mientras que el resto aparece en forma que deba realizarse un proceso químico que permita la absorción de estos nutrientes. El proceso químico se permite por la capacidad que tiene el suelo de contener sustancias en forma de iones o moléculas como agua, nutrientes y/o metales pesados. La absorción de los nutrientes ocurre en pelos radicales que poseen las raíces jóvenes de la planta(Roca Fernández 2010). Al presentarse el contacto con el agua residual y el suelo se forma un ambiente acuoso permitiendo el intercambio iónico en la que se absorben y liberan iones de manera equivalente buscando una estabilización eléctrica del suelo.

Figura 1 Intercambio iónico y absorción de nutrientes.



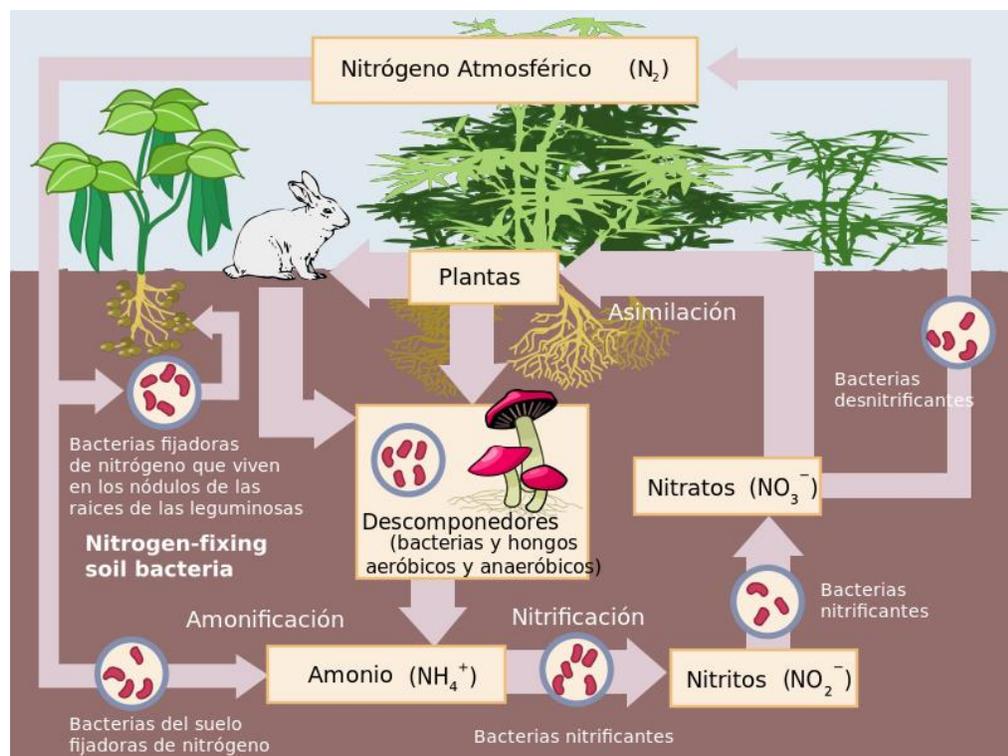
Fuente: (Albarracin 2016)

Este intercambio genera una absorción de iones que serán los nutrientes de las plantas (Figura 1). Este cambio iónico genera una alteración de acidez que se ve reflejado en el pH del suelo conformado por cationes como los de hidrogeno (H^+), aluminio (Al^+), manganeso (Mn^+) y bases cambiabile calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na) (edafologia.net 2005).

El filtro verde realiza un proceso biológicos que se divide en dos secciones, una realizada por la variedad de microorganismos presentes en el agua residual: virus, bacterias, hongos, protozoos y nematodos(Knobelsdorf Miranda 2005), y otra relacionada con las actividades radiculares entendido como el conjunto de raíces de las plantas.

El suelo no sólo actúa como un filtro físico, la actuación biológica con los microorganismos procede en la degradación de la materia orgánica mientras consumen una cantidad determinada de oxígeno(Andreo 2003), logrando una alta tasa de eliminación de organismos patógenos y reciclaje de nutrientes. Las raíces de las plantas actúan a modo de bombas aspirantes, extrayendo del suelo el agua, nutrientes y sales minerales procedentes del agua residual(Aianza por el agua 2008).

Figura 2 Ciclo del nitrógeno



Fuente: (Alpuente 2015)

CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO

El filtro verde es un tratamiento natural que recrea los procesos que ocurren en el ambiente, en un espacio controlado, este implica una relación y acción conjunta de vegetación, suelo y microorganismos(CONAGUA 2015) en un área determinada bajo condiciones ambientales específicas que constituyendo un ecosistema(Cabrera y Willink 1973). Esta interacción permite a su vez la depuración del agua residual por los procesos físicos, químicos y biológicos mencionados anteriormente.

El espacio controlado del filtro verde bajo características determinadas permite su funcionamiento y a su vez determinan el rendimiento depurativo del agua residual. De acuerdo a las características del agua y del tipo del terreno sobre el que se realiza el filtro verde, caudal específico, condiciones ambientales(Sainz Sastre 2005), entre otros se procede a realizar el diseño para una implementación de esta tecnología sostenible.

El conocimiento de las condiciones del funcionamiento del filtro verde es fundamental para generar un proceso óptimo, por cual las catalogamos en condiciones de operación y de entorno siendo estas dos una interacción constante y conjunta del proceso depurativo. Las condiciones de operación son aquellas características propias del filtro verde en la que se involucran las condiciones de funcionamiento de la interacción suelo, planta y agua, mientras las condiciones del entorno son esas características externas involucradas indirectamente en esta interacción.

1. OPERACIÓN

1.1. Pretratamiento y riego

La cantidad de aguas residuales que se genera en una población rural o urbana es directamente proporcional al consumo de agua de abastecimiento, este consumo viene relacionado con el grado de desarrollo económico y social de las actividades humanas(Alianza por el agua 2008). Las aguas residuales varían en su composición de acuerdo a su origen por lo que en la zona rural encontramos principalmente aguas que constituyen una mezcla de agua domesticas de la población, junto con las de riego de las tierras y el manejo del ganado que en muchas ocasiones puede contener fertilizantes y/o pesticidas(Espigares G, M.; Pérez López 1985).

Antes de pasar al riego en el filtro verde, el agua residual deben someterse a un pretratamiento con el fin de eliminar, en todo lo posible, las materias en suspensión, grasas (Sainz Sastre 2005) o aquellos elementos solidos que no son asimilados por el suelo. El cribado impide la entrada de materiales grandes al sistema, con una rejilla de acero, que podrían generar taponamiento de las tuberías. Es indispensable hacerlo no solo por los materiales solidos sino también como un mecanismo que

disminuya la velocidad del flujo que llega del alcantarillado. Esta rejilla necesitara de un mantenimiento periódico con el fin de evitar la obstrucción del paso del agua.

Luego de realizarse un proceso de pretratamiento del agua residual esta debe ser distribuida en la vegetación por algún sistema de riego como aspersores, riego superficial o por goteo que dependerá de las necesidades del cultivo(Álvarez 2002). El consumo de agua de las plantas es directamente proporcional a la permeabilidad y absorción de nutrientes de esta, estableciendo un terreno en condiciones predominantes aerobias. El agua residual en el que se aplica en ciclos intermitentes, generalmente variables, de entre 4 y 10 días(Instituto Geológico y Minero de España. 2003).

El riego por aspersión (Figura 3) es un método en el que se genera una dispersión de agua en forma de llovizna intensa más o menos uniforme sobre el terreno permitiendo que se infiltre en el mismo punto donde cae. Este mecanismo de aspersión junto con el de goteo, utiliza un dispositivo de descarga en el que la presión disponible en el ramal induce un caudal de salida.

Figura 3 Riego por aspersores



Fuente: (Delgadillo 2005)

La diferencia con el método por goteo está basado en la magnitud de la presión y en la geometría del emisor(Delgadillo 2005). El sistema de riego por aspersión es un sistema de tuberías que recibe el agua por un tubo soterrado o una motobomba

en el que es distribuida por un ramal de tuberías que transporta el agua hacia el aspersor(EcuRed. 2013).

El proceso de aplicación de agua de un aspersor puede generar algunos inconvenientes si no se prevén algunas situaciones. Es de suma importancia el conocimiento de la pluviometría del lugar ya que si el sistema supera la capacidad de infiltración del terreno se producirá escorrentía lo que podría causar daños en aguas subterráneas o acuíferos. Se puede provocar posible deterioro de la superficie del terreno por el impacto de las gotas y la influencia del viento afectara la uniformidad de distribución.(Delgadillo 2005)

El riego por goteo (Figura 4) es un mecanismo en el que el riego se realiza de forma localizada dirigido hacia las raíces de la planta. Exige una red tuberías principales y ramales de distribución normalmente enterrados de los que se pronuncia un mecanismo de emisión denominados goteros que aplica lentamente el agua en la superficie del suelo(Santos Pereira et al. 2010). El mecanismo permite un gran ahorro de agua en circunstancias de escasez y el costo asociado al riego, especialmente a los de mano de obra ya que no la necesita para su funcionamiento. Su regulación y control se realiza normalmente mediante mecanismos automáticos de temporización.

Figura 4 Riego por goteo



Fuente: (CONAGUA 2015)

El riego por superficie (Figura 5) se caracteriza por la aplicación del agua directamente en la superficie del suelo y se distribuye en el campo por gravedad, el

caudal de riego disminuye por la infiltración del terreno. Este mecanismo tiene una variedad de tipos de riego con esta característica común en lo que encontramos(González y Playan 2000):

1. Riego por inundación: Método que consiste en vaciar el agua residual en un terreno sin ninguna pendiente, rodeado completamente por un dique generando una lámina de agua que disminuirá con la infiltración en el suelo.
2. Riego por surcos: Este tipo de riego se caracteriza por el escurrimiento de agua sobre un terreno ondulado que genera pequeños canales por el que circula el agua generándose una inundación parcial.

Figura 5 Riego superficial. a) Riego por surcos b) Riego por inundación.



Fuente: a) (Manejo de aguas 2015) b) (Habitissimo 2016)

Cualquier tipo de riego debe tener en cuenta las características de permeabilidad del terreno y capacidad de absorción del cultivo, el suelo permanece saturado y esto puede causar daños en las raíces de la planta ocasionando que esta se marchite o disminuya el crecimiento debido a que en un suelo saturado no se encuentran vacíos que permitan a la planta respirar.

Como se pudo observar, un sistema de riego está constituido por diferentes obras y artefactos cuyo funcionamiento, permite suplir las necesidades de agua de los cultivos, aportando una cantidad extra a la que cae con la lluvia. La elección de los métodos de riego está impuesta por un gran número de factores que se sintetizaran en la tabla 1, esta permite observar una visión global de cada mecanismo mencionado anteriormente y así determinar los factores más óptimos para que estos sean seleccionados.

La elección de cualquiera de los métodos dependerá de un estudio de la viabilidad técnica, económica, ambiental y social para una elección sostenible.

Tabla 1 Factores que favorecen la elección del método de riego

Factores	Riego de superficie	Aspersión	Riego localizado
Precio del agua	Bajo	Medio	Alto
Suministro del agua	Irregular	Regular	Continuo
Disponibilidad del agua	Abundante	Media	Limitada
Pureza del agua	No limitante	Sin solidos	Elevada
Capacidad de infiltración del suelo	Baja a media	Media a alta	Cualquiera
Capacidad de almacenamiento del suelo	Alta	Media a baja	No limitante
Topografía	Plana y uniforme	Relieve suave	Irregular
Sensibilidad al déficit hídrico	Baja	Moderada	Alta
Valor de la producción	Bajo	Medio	Alto
Coste de la mano de obra	Bajo	Medio	Alto
Coste de la energía	Alto	Bajo	Moderado
Disponibilidad de capital	Baja	Media a alta	Alta
Exigencia en tecnología	Limitada	Media a alta	Elevada

Fuente: (Santos Pereira et al. 2010)

1.2. Selección del cultivo

La selección del tipo de cultivo es fundamental en los procesos de riego en búsqueda de la máxima rentabilidad y fundamental para eliminar los nutrientes, reducir la erosión del suelo y aumentar o mantener la permeabilidad. En los procesos de selección del cultivo se debe tener en cuenta (Hernández Muños, Hernandez Lehmann y Galan Martinez 2004):

- Capacidad de asimilación de nutrientes.
- Tolerancia del cultivo a las condiciones de humedad en el suelo.
- Consumo de agua.
- Calidad del agua residual necesaria y posible toxicidad.

El cultivo a implantar lo podemos caracterizar en dos grupo (Alianza por el agua 2008), Tipo I y Tipo II a los que se les atribuyen diferentes características.

Tipo I que presentan una elevada capacidad de asimilación de nutrientes, alto consumo de agua. Elevada tolerancia a los suelos húmedos, baja sensibilidad a los constituyentes del agua a tratar y mínimas necesidades de control. Dentro de este tipo de cultivo encontramos diferentes tipos de céspedes o cultivos forrajeros que

son los utilizados para alimentar el ganado y a ciertos cultivos arbóreos o forestales en los que encontramos chopos, eucaliptos, olmos, sauces, etc.

Los sistemas de Tipo II no permiten la aplicación de agua en exceso por lo que tenemos una gama más amplia de cultivo en el que encontramos alfalfa, trébol, algodón, soja, etc.

Con la colonización de casi todos los espacios sobre la tierra, el hombre ha sido el dispersor más eficiente de las plantas, esto se evidencia con la diversidad de especies con distintos orígenes encontrados en las zonas pobladas de todo el mundo(Infante Betancour et al. 2008).

Hasta el momento, el mecanismo de filtro verde es poco conocido en Colombia por lo que muchas de las plantas mencionadas tienen orígenes extranjeros y han sido analizadas para el caso concreto de depuración de agua residual, sin embargo las encontramos dentro del territorio colombiano como es el caso de los chopos, originarios del norte de África, Europa y centro-este de Asia sirven para secar terrenos húmedos (Infante Betancour et al. 2008) por su alto consumo de agua.

El chopo pertenece a la familia de árboles de las salicáceas que tiene dos géneros: salix (sauces) y la populus (chopo o álamo) y su hábitat natural son las zonas húmedas y templadas, ya que necesita mucha cantidad de agua y luz para poder crecer rápidamente, llegando a alcanzar los 30 metros de altura(Canales. 2015).

Figura 6 Árbol y corteza del sauce (*Salix humboldtiana*)



Fuente: (Artesanías de Colombia S. A. 2015)

Dentro del territorio Colombiana encontramos el *Salix humboldtiana* Willd que se desarrolla en regiones subhúmedas y semiáridas de templadas a subtropicales (templado-frías o frías en el hemisferio norte); sus suelos se caracterizan por ser húmedos, arenosos y con buen drenaje, presenta un crecimiento rápido en buenas condiciones de habitad alcanzando un óptimo desarrollo en 5 años (Artesanías de Colombia S. A. 2015). *Salix humboldtiana* conocido también como el sauce llorón.

Figura 7 *Eucalyptus globulus*, Eucalipto.



Fuente: (Infante Betancour et al. 2008)

El *populus nigra* más conocido como álamo negro es un árbol de hasta 20 m de altura, originario del norte de África, Europa y centro-este de Asia (Infante Betancour et al. 2008), su crecimiento es muy rápido, no siendo infrecuente alcanzar los 40 m³ ha⁻¹ año⁻¹ de producción y en casos excepcionales, los 60 m³ ha⁻¹ año⁻¹ (Alianza por el agua 2008). Requiere humedad en el suelo por lo que es otro buen proponente para el filtro verde. Con relación a los eucaliptos, dos son las especies que presentan perspectivas más prometedoras para su empleo en filtros verdes: *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus Camaldulensis* no siendo oriundos del país son un cultivo que encontramos en muchas regiones.

La tabla 2 muestra una comparación generalizada del comportamiento de estos como cultivo forestal en el filtro verde. Se debe tener en cuenta que chopos y eucaliptos, como se mencionó anteriormente, es el nombre genérico de una amplia familia de árboles. Según diferentes biografías estos dos tipos de árboles son lo que mayor rendimiento genera siendo los chopos los que sobresalen. Utilizar el agua residual como regadío para el cultivo forestal promueve la sostenibilidad ambiental no solo por la depuración del agua si no como un mecanismo que promueve el ecosistema.

Tabla 2 Características comparativas de chopos y eucaliptos

	Chopos	Eucaliptos
Higrófila	Alto	Medio
Resistencia a inundación	Alto	Medio
Resistencia a la sequia	Bajo	Medio
Estacionalidad	Bajo	Alto
Producción de biomasa	Medio	Alto
Formación de sotobosques	Alto	Bajo
Acción sobre el suelo	Alto	Medio
Aprovechamiento de la madera	Medio	Alto
Resistencia a parásitos	Bajo	Alto

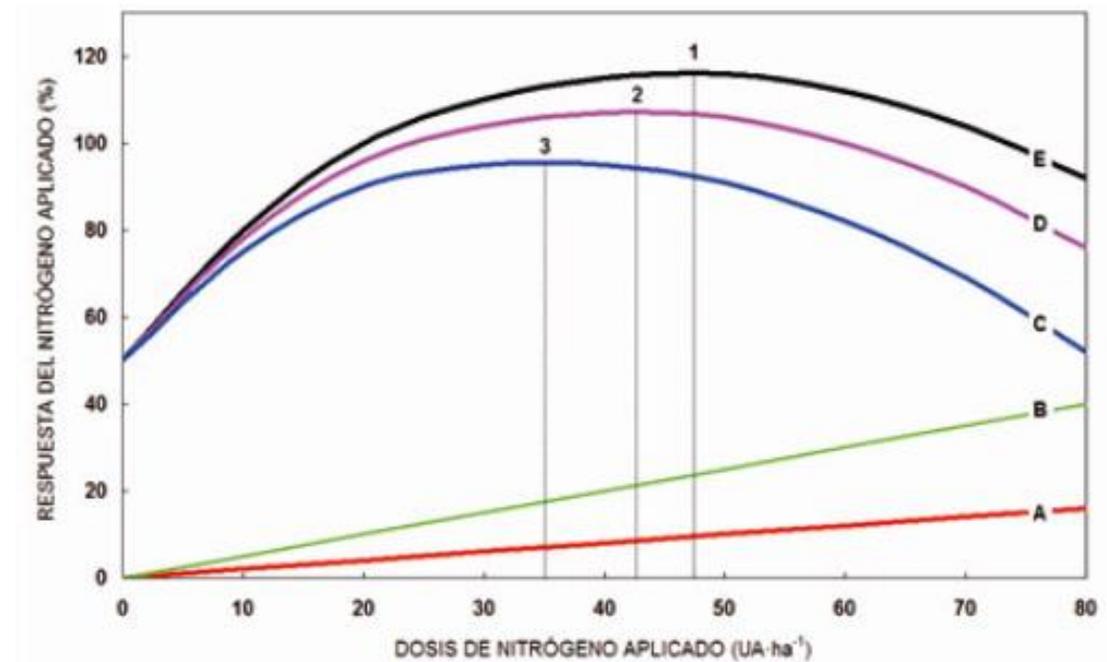
Fuente: (Alianza por el agua 2008)

Colombia ocupa el segundo lugar en biodiversidad y está entre las 12 naciones más diversas del planeta. Privilegiado por sus riquezas naturales, su variedad, belleza geográfica y por la diversidad de sus ecosistemas (Colciencias 2016) por tal razón una investigación más a fondo de las plantas que puedan ser utilizadas como filtro verde llevaría al descubrimiento de lo magnífica que es esta tecnología sostenible para el tratamiento de agua residual. Al ser esta un mecanismo conocido e investigado en el extranjero, especialmente en países como España, es corta la información que se encuentra del rendimiento que podría obtenerse con nuestra vegetación nativa, pero sin lugar a duda hay gran biodiversidad de la que podríamos escoger.

1.2.1. Capacidad de absorción y concentración de nitrógeno

El nitrógeno (N) es un elemento esencial para los vegetales y junto con el fósforo (P) y el potasio (K) constituyen los tres macronutrientes (NPK) más importantes en la nutrición vegetal (Durán, Retamal y Moratíel 2010). La tasa de nitrógeno presente en el suelo puede generar modificaciones bioquímicas de los organismos y reducir los porcentajes de crecimiento. El nitrógeno está presente en el agua residual en forma de urea y proteínas, pero estos compuestos son fácilmente degradables por las bacterias, que los transforman en amonio, y a partir de él producen nitritos y nitratos. Al ser el amoníaco el primer producto de la degradación de la urea y del material proteico, se puede considerar como el mejor indicador químico indirecto de contaminación fecal reciente (Espigares G, M.; Pérez López 1985), por tal motivo el agua residual se convierte en una fuente de nutrientes.

Gráfico 1 Análisis de las dosis óptimas de aplicación de nitrógeno: Agronómica (1), económica (2) y ambiental (3). Curvas: A, Coste del N aplicado; B, coste ambiental del N aplicado; C, beneficio agrícola ambiental; D, beneficio agrícola y E, producción bruta.



Fuente: (Durán, Retamal y Moratíel 2010)

En la producción agrícola los fertilizantes buscan aportar la dosis óptima de nitrógeno que depende de tres factores (Durán, Retamal y Moratíel 2010): a) El cultivo; b) La "fertilidad" de la parcela en el momento de realizar la aplicación; y c)

El objetivo que deseamos alcanzar. El gráfico 1 mostrado a continuación, como menciona José M. Durán, Norma Retamal y Rubén Moratiel en su artículo:

“Las recomendaciones agronómicas sobre fertilización están basadas en trabajos experimentales y son válidas para cultivos y zonas concretas. Cuando comparamos el aumento de producción que experimenta un cultivo en función de la cantidad de nitrógeno aplicada por hectárea (UA, unidades arbitrarias), nos encontramos que la producción bruta (E) deja de crecer a partir de un determinado punto (1); se trata del óptimo agronómico. Si observamos la función de producción (D) que se obtiene cuando restamos el coste del N aplicado (A) a la producción bruta (E), obtenemos otro óptimo; se trata del óptimo económico (2) y finalmente, si fuéramos capaces de estimar el coste ambiental que representa la aplicación de N (B), restándolo de la producción bruta (E) obtendríamos otro óptimo; en este caso, se trataría del óptimo ambiental (3). De lo anteriormente expuesto se desprenden dos conclusiones: a) Que la aplicación óptima de N depende claramente del objetivo que deseamos alcanzar (agronómico, económico o ambiental); y b) que los tres óptimos están íntimamente relacionados entre sí ($N_{\text{ambiental}} < N_{\text{económico}} < N_{\text{agronómico}}$)”.

En conclusión la cantidad de nitrógeno puede afectar el crecimiento del cultivo o la masa forestal y ya que la finalidad del riego de agua residual es aportar todo el contenido de macronutrientes presentes en esta sin la necesidad de aplicación de fertilizantes como se comparó en la gráfica se hace necesario conocer con precisión la concentración de nitrógeno (N) o nitrato (NO_3^-) presente en el suelo y en el agua mediante procesos de laboratorio que nos arrojen estos datos y así obtener un acercamiento del rendimiento que va a tener el cultivo respecto a la absorción de nutrientes.

2. DEL ENTORNO

2.1. Características del terreno

Cuando hablamos de las características del terreno hacemos referencia a aquellas características topográficas y propias del suelo que permiten un buen funcionamiento del filtro verde en la depuración del agua residual. Dentro de las biografías que se encuentran para dicha caracterización ya se establecen valores definidos como los que se muestran a continuación:

Tabla 3 Características que debe reunir el terreno en el que se implante un sistema de baja carga

	OPTIMO	CONVENIENTE	POBRE
Permeabilidad (mm/h)	5-50	1,5-5; 50-150	<1,5;>150
Profundidad hasta el freático (m)	>1,5	0,6-1,5	<0,6
Pendiente (%)	0-2	2-15	>15
pH	5,5-8,4	5,2-5,5	<5,2; >8,4
Conductividad (mmhos/cm)	<4	4-8	>8
Porcentaje de intercambio de sodio, ESP (%)	<5	5-10	>10

Fuente: (Alianza por el agua 2008)

Se conoce como sistema de baja carga al mecanismo de filtro verde ya que el agua aplicada puede consumirse por evapotranspiración, percola vertical y horizontalmente en el terreno; gracias a las características del suelo se permite tanto el tratamiento del agua residual como el crecimiento de la vegetación existente. El valor relativamente bajo de las cargas aplicadas, junto con la presencia de vegetación y al ecosistema activo del suelo contribuye a que el sistema de baja carga tenga mayor potencial como sistema natural de tratamiento(METCALF & EDDY INC. 1995).

2.2. Climatológicos

2.2.1. Precipitación

La precipitación hace referencia a todas las formas de humedad emanadas de la atmosfera y depositadas en la superficie terrestre presentadas en forma de lluvia, granizo, rocío, neblina, nieve o helada(Monsalve Saenz 1999).

La mayor parte del agua usada para los cultivos se extrae de la humedad de los suelos por el efecto de la lluvia. La irrigación aporta únicamente el 10% del agua agrícola, pero tiene la función de complementar el agua de lluvia cuando la humedad del suelo es insuficiente para satisfacer la necesidad del cultivo(ALFA TECSPAR 2014).

El conocimiento de la pluviosidad del sector donde se planea un filtro verde es de suma importancia ya que este valor afecta no solo la dotación del riego (D) si no la humedad del suelo. En periodos de lluvia se hace necesario generar almacenamiento y una operación estacional (Cento de las nuevas tecnologías del Agua 2008) de las aguas residuales debido a la pluviosidad ya que en estos periodos el agua lluvia será la encargada de irrigar los cultivos. El agua almacenada será distribuida en menor cantidad para estas épocas y beneficiará los periodos de baja precipitación.

El análisis de datos estadísticos de precipitación como la representación mediante un histograma permite la observación de una precipitación anual y/o mensual con lo que se puede llegar a un promedio. A partir de esto se puede evaluar la modalidad o el comportamiento de esta, presentando una conducta monomodal, bimodal o multimodal identificando los periodos de mayor y menor precipitación, análisis a tener en cuenta en el riego del cultivo.

2.2.2. Evapotranspiración

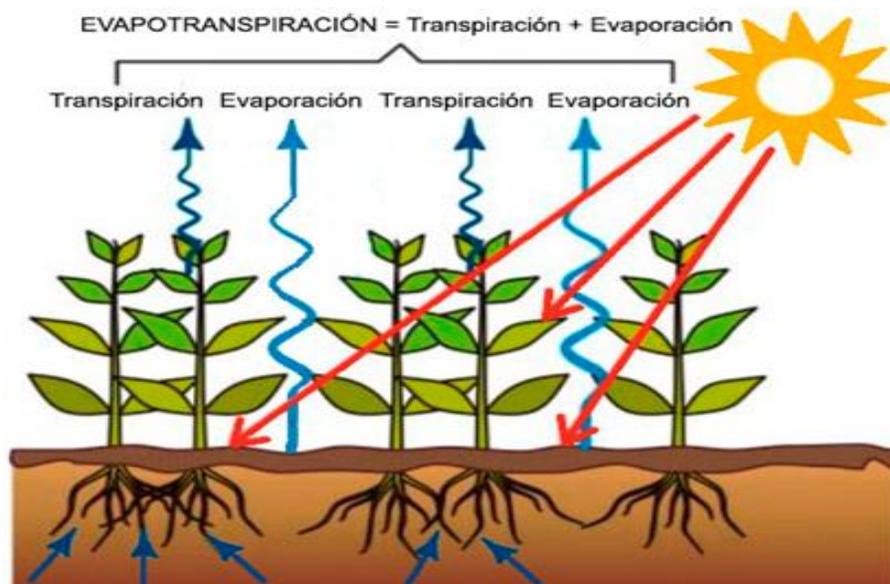
La evapotranspiración es la acción conjunta de dos procesos: La evaporación, fenómeno físico en el que el agua cambia de estado líquido a vapor y la transpiración, fenómeno biológico por el cual las plantas toman agua a través de sus raíces, una parte es para su crecimiento y la otra es traspirada (Sánchez San Román 2010).

El consumo de agua de las plantas, está determinado por la evapotranspiración (ET) y varía con las características físicas, el grado de crecimiento, el tipo de cultivo, el nivel de humedad del suelo y el clima local. Las necesidades de agua para riego, vendrán dadas por (Hernández Muños, Hernandez Lehmann y Galan Martinez 2004)

$$D = (ET) - P$$

Siendo D, la dotación precisa; (ET), La evapotranspiración; P la precipitación del lugar.

Figura 8 Esquematización de la Evapotranspiración



Fuente: (Asociación Galega de empresas de Xardinaria 2016)

2.2.3. Temperatura

La temperatura es un factor que, así como puede mejorar el rendimiento del filtro verde con altas temperaturas este puede verse afectado cuando esta disminuye, las altas temperaturas intensifican la actividad vegetativa y bacteriana. En la mayoría de las reacciones en que intervienen microorganismos, la velocidad de reacción aumenta con la temperatura, hasta aproximadamente 40°C, para descender de forma brusca a continuación, contribuyendo a incrementar la extracción de nutrientes presentes en las agua residuales (Jaime 2016).

El agua residual a diferencia del agua de consumo presenta una temperatura mayor que oscila entre 10°C y 21°C siendo perjudicial sobre las aguas receptoras(Espigares G, M.; Pérez López 1985) pero al ser utilizadas como riego, en periodos de invierno, el terreno debe producir un alargamiento de la actividad vegetativa.

La temperatura ambiente también puede ser una restricción ya que en periodos de climas frio y/o lluviosos se hace necesario el almacenamiento del agua residual en esos periodos en los que disminuye el crecimiento de la cubierta vegetal (Cento de las nuevas tecnologías del Agua 2008). Por tal motivo se recomienda terrenos de clima templado a cálido para obtener mejores rendimientos.

ANALISIS DE LAS CONDICIONES COLOMBIANAS PARA LA IMPLEMENTACION DE FILTRO VERDE EN ZONAS RURALES

El sector rural ha sido históricamente, en Colombia, un gran productor de riqueza para el país y en el manejo y extracción de sus recursos se ha fundamentado su base económica. Aún hoy día y a pesar de la crisis del sector su importancia es muy grande (Pérez Correa y Pérez Martínez 2002). Desde 1994, el sector de agua potable y saneamiento básico ha tenido un gran avance en su gestión. Sin embargo, aún existe el atraso entre las coberturas de alcantarillado frente a las de acueducto mostrando las zonas urbanas con un mayor porcentaje, en contraste, en la zona rural la cobertura de alcantarillado a 2010 es de 15,1% y la de acueducto es de 57,1%.

Lo anterior evidencia el gran reto que tiene el sector en cobertura rural del servicio de alcantarillado. Se ha logrado mantener una inversión en el servicio de alcantarillado orientada a superar el déficit de cobertura y a un mejoramiento en la calidad del agua vertida a las fuentes receptoras sin embargo muchos municipios de los departamentos del país carentes del sistema de alcantarillado disponen directamente sobre las fuentes hídricas o canales de desagüe construidos en muchos casos sin alguna especificación técnica (Superintendencia de Servicios Públicos 2013).

A continuación se plantea el análisis de las condiciones actuales de las macro cuencas del país y como se encuentra la zona rural respecto al tratamiento de agua residual con el fin de promover las tecnologías sostenibles para la depuración de agua residual como una solución viable ante la situación ya mencionada; así mismo se analizan condiciones del entorno señaladas en el capítulo anterior propias de Colombia dentro de su gran extensión, biodiversidad y amplias zonas de acceso al agua, debe preocuparse por mantenerlo en las mejores condiciones. Los recursos no son nuestros, son prestados, de generación en generación y es de nuestra responsabilidad que un país tan rico permanezca siempre bello. La zona rural necesita especial atención porque, así como surge la ciudad debe surgir el campo siendo esto beneficio para todos.

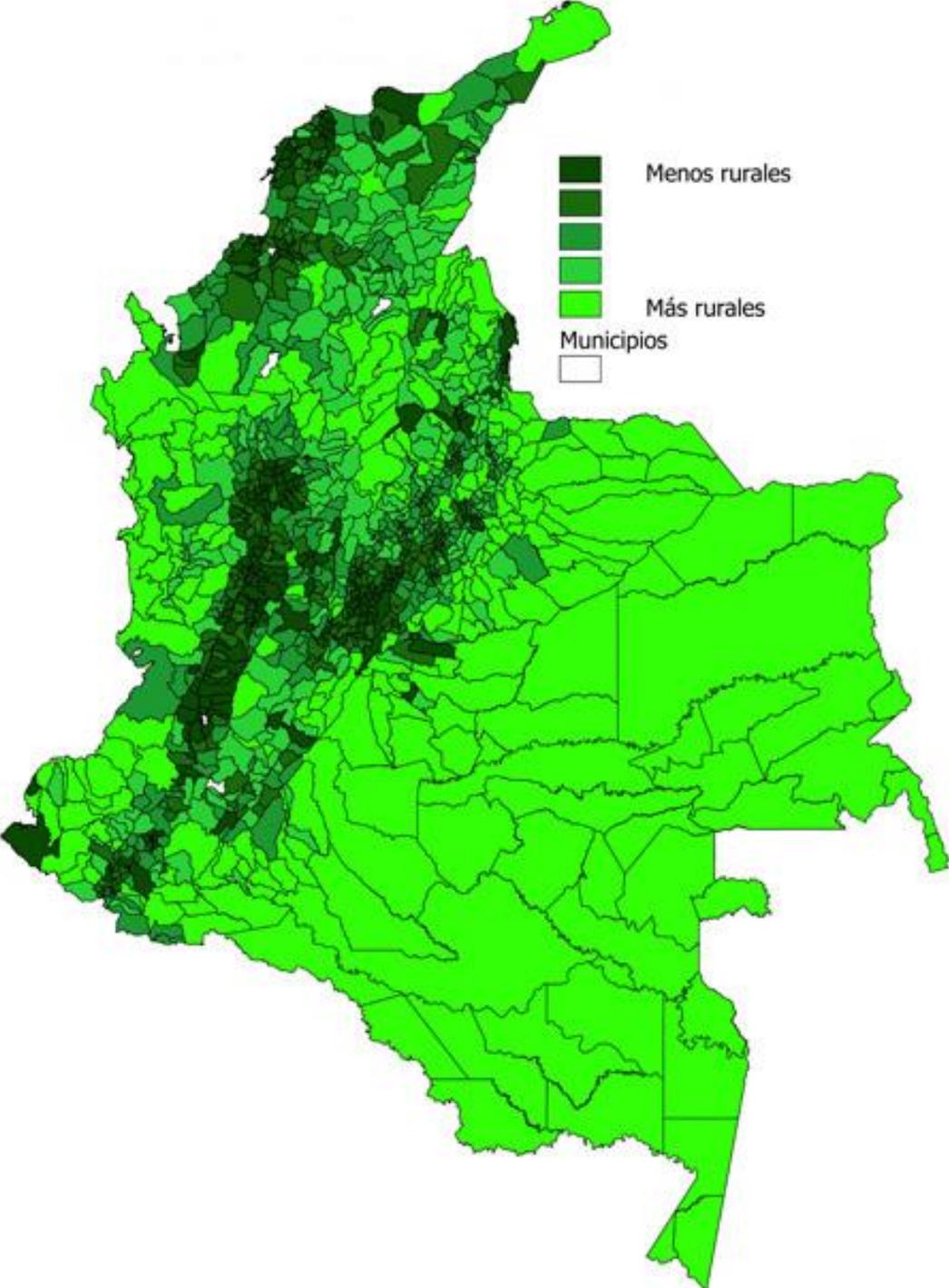
1. INDICE DE RURALIDAD EN COLOMBIA

De acuerdo al artículo publicado por La Silla Vacía en su página web titulado “La desoladora geografía del campo” realiza un análisis del informe presentado por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y llega a la conclusión, textualmente “El modelo de desarrollo rural colombiano es un fracaso” lo que se refleja la marcada brecha entre lo urbano y rural.

El PNUD presenta una distribución de ruralidad según índices de menos y más rural, esto permite identificar aquellos municipios que aunque estén cerca de una ciudad aun dependen del campo social y económicamente lo que los cataloga en un

municipio con índice de ruralidad alto y no urbano, de esta manera se pudo determinar que el 75,5% de los municipios colombianos son rurales; en ellos vive el 31,1% de la población y cubren el 94,4% de la superficie(Osorio 2011).

Grafico 2 Índice de Ruralidad



Fuente:(Osorio 2011)

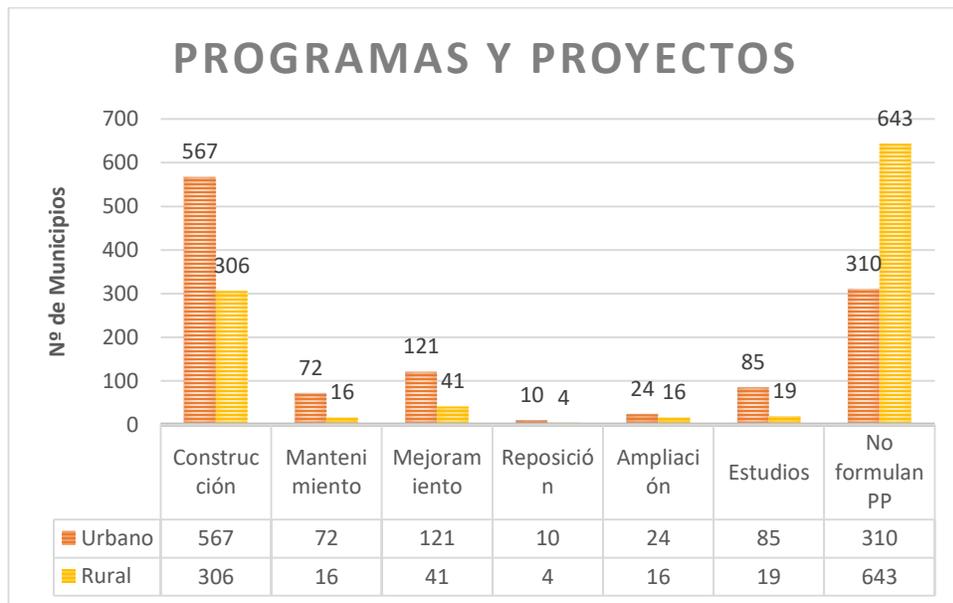
El índice de ruralidad depende de que tan cerca o lejos se encuentre un municipio de las ciudades y, además, cuando su densidad es baja. De acuerdo a los resultados, aunque la población rural sea menor abarcan el 94,4% de la superficie lo que nos deja claro que Colombia debe involucrarse más en el desarrollo rural ya que esta población se encuentra más alejada de centros urbanos, pero no por eso dejan de generar aguas residuales.

2. POBLACIÓN RURAL FRENTE A LA URBANA EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

Del agua residual producida por la población Colombiana, solo se da tratamiento al 10% debido a las malas condiciones de las plantas de tratamiento o a la carencia de alcantarillado generando gran cantidad de vertimientos sobre las fuentes receptoras que de acuerdo a la capacidad de asimilación de agua residual que de forma natural se depura se da paso a la contaminación de está generando un alto impacto ambiental(Procuraduría General de la Nación et al. 2016).

De acuerdo al documento presentado por la UNICEF: La infancia, el agua y el saneamiento básico en los planes de desarrollos departamentales y municipales, se han venido desarrollando estrategias que mitiguen el impacto negativo pero son preocupantes las cifras que se presentan para el 2006 (Procuraduría General de la Nación et al. 2016).

Grafico 3 Municipios que formulan programas y proyectos sobre la planta de agua residual

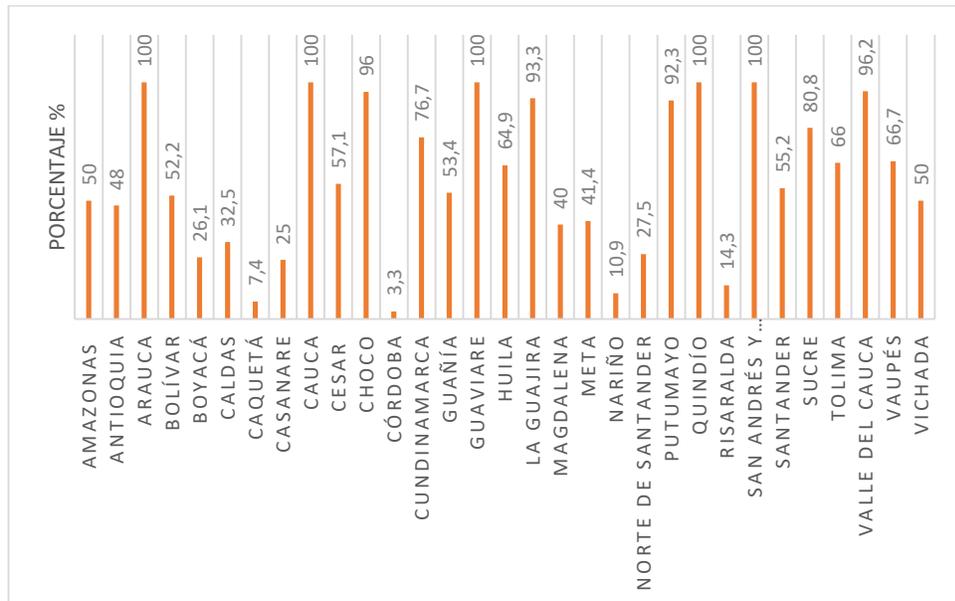


Fuente: (Procuraduría General de la Nación et al. 2016)

Se observa que cualquiera de los factores de programas y proyectos (eje x) el sector rural es el que menor porcentaje tiene, a excepción de los municipios que no formulan ninguna estrategia siendo el sector rural, con un porcentaje del 64%, el más crítico. Solo el 30% de la zona rural formula construir una planta que funcione en alguna de las veredas o corregimientos del área rural. El 12% programa o proyecta el mantenimiento. Cabe destacar que las plantas de tratamiento de agua residual necesitan de un mantenimiento periódico para que se garantice la calidad con la que recibe el agua la fuente receptora y este bajo porcentaje es preocupante porque se hace necesario tener construcciones en óptimas condiciones. El 2% de los municipios rurales presenta estudios para tratar el agua residual, lo ideal sería que pasara a la próxima etapa, a la construcción. El no tratamiento de las aguas residuales perjudica las fuentes receptoras, reducen su calidad, ponen en riesgo la salud de los habitantes, disminuyen la productividad y aumentan los costos de potabilización.

Una base de datos consolidada de 651 registros, de los cuales 545 municipios presentan información disponible incluidos 106 que no cuentan con un sistema de tratamiento de aguas residuales (STAR) en sus municipios, sus aguas son tratadas en sistemas construidos en municipios aledaños (Superintendencia de Servicios Públicos 2013). En la Gráfica 3 se puede observar el porcentaje de municipios por departamento para el año 2013, siendo una información más reciente, que cuentan con información relacionada con STAR.

Gráfico 4 Municipios con reporte de STAR por departamento



Fuente: (Superintendencia de Servicios Públicos 2013)

3. CALIDAD DEL AGUA

De acuerdo al Estudio Nacional del Agua para el 2014, evalúa el estado y tendencias de las condiciones de calidad de las aguas superficiales y las presiones por contaminación que se ejercen sobre los sistemas hídricos y cuerpos de agua de país, se define la calidad del agua como: “Condiciones que deben darse en el agua para que este mantenga un ecosistema equilibrado y cumpla unos determinados objetivos de calidad ecológicos” (IDEAM 2014)

Las aguas superficiales, subterráneas y marinas tienen unas condiciones iniciales de calidad que son alteradas por las actividades naturales de un ecosistema o por procesos de contaminación puntual o difusa, causado por vertimiento del alcantarillado directamente sobre el cuerpo de agua, ejerciendo un impacto sobre la calidad del cuerpo hídrico. Al evaluar las aguas superficiales y las cargas puntuales se toman en cuenta las características físicas, químicas y biológicas, según la capacidad de depuración del cuerpo de agua de acuerdo a la geomorfología de la región.

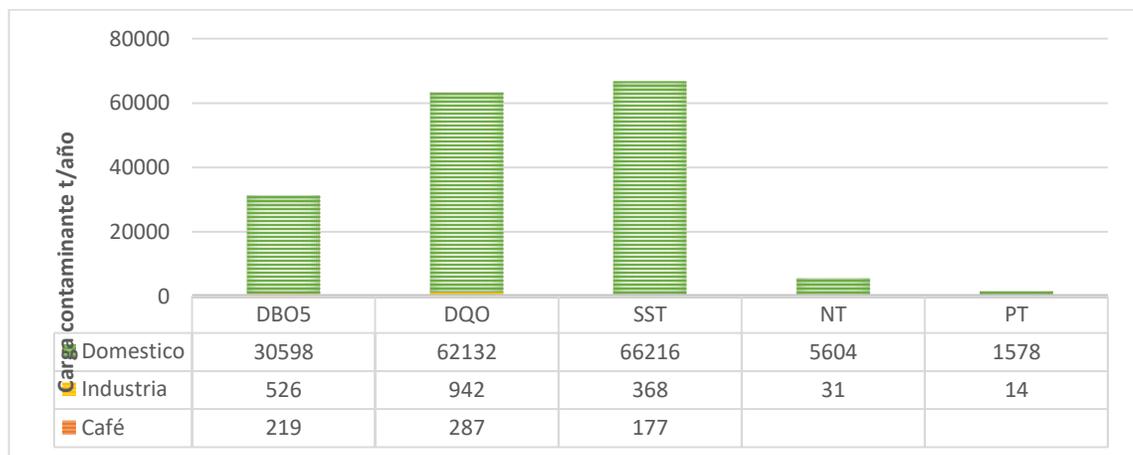
Figura 9 Mapa áreas Hidrográficas de Colombia



Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2016)

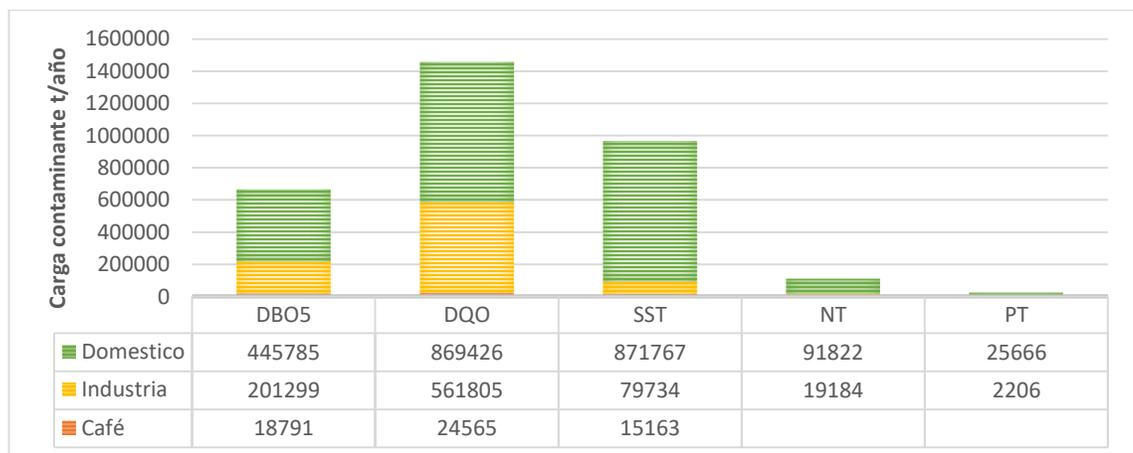
La calidad del agua se evalúa a través de los resultados de presiones por contaminación en cinco zonas hidrográficas (Figura 9): Magdalena- Cauca, Caribe, Orinoco, Pacifico y Amazonas incluyendo cinco variables para su evaluación: Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO), solidos totales en suspensión (SST), carga vertida de Nitrógeno Total (NT) y la carga vertida de Fosforo PT. Estas características son evaluadas por vertimientos puntuales que llegan a los sistemas hídricos del país provenientes de los sectores industria, domestico (incluye sacrificio de animales) y beneficio del café(IDEAM 2014).

Grafico 5 Cargas contaminantes áreas hidrográfica del Caribe



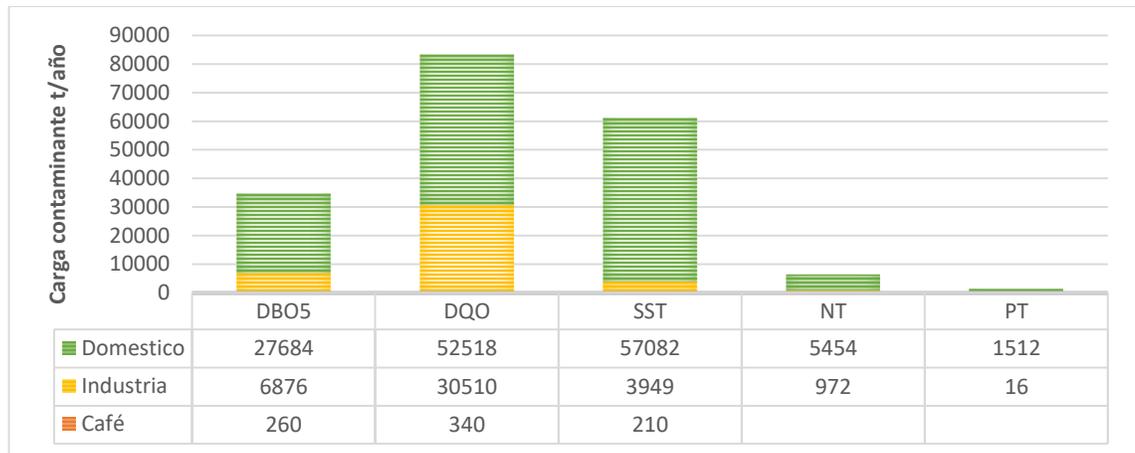
Fuente:(IDEAM 2014)

Grafico 6 Cargas contaminantes áreas hidrográfica del Magdalena - Cauca



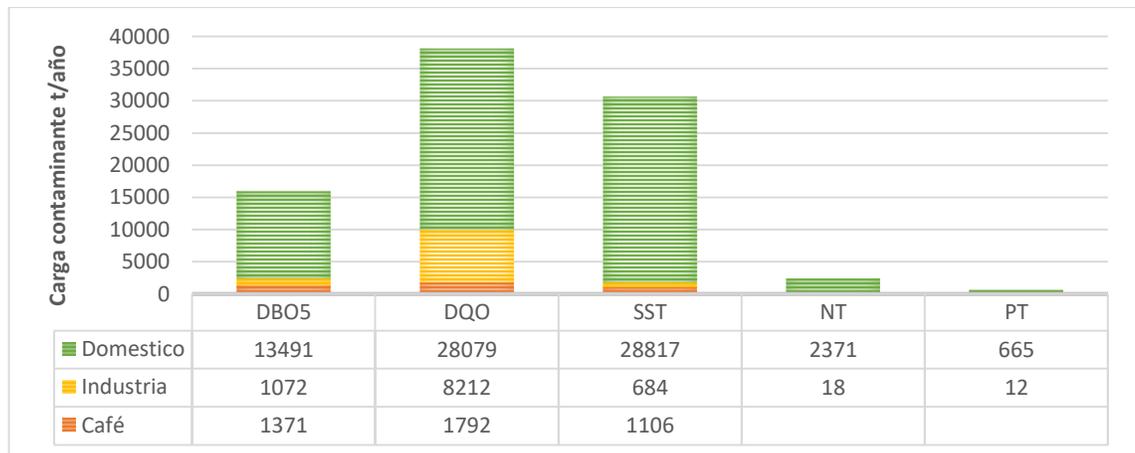
Fuente:(IDEAM 2014)

Grafico 7 Cargas contaminantes áreas hidrográfica del Orinoco



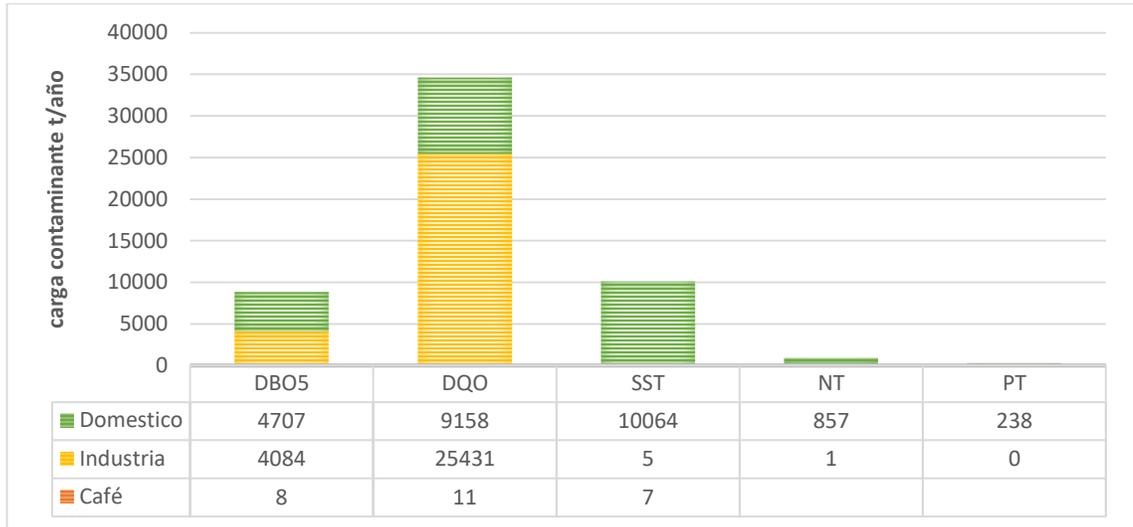
Fuente:(IDEAM 2014)

Grafico 8 Cargas contaminantes áreas hidrográfica del Pacifico



Fuente:(IDEAM 2014)

Grafico 9 Cargas contaminantes áreas hidrográficas del Amazonas



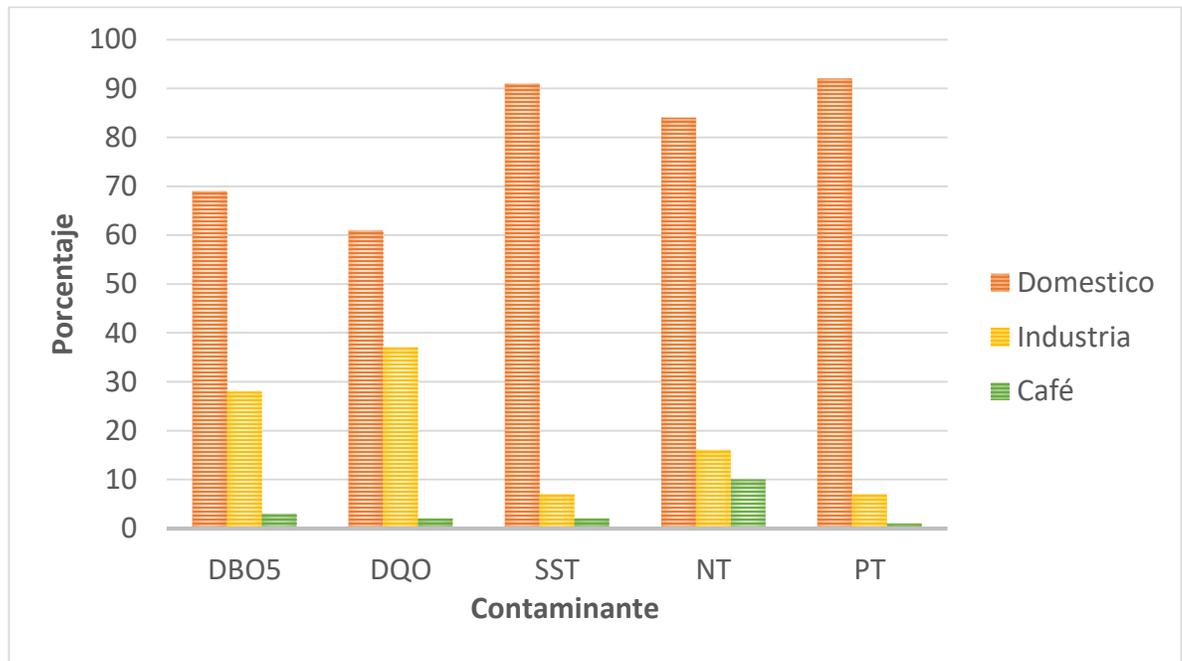
Fuente:(IDEAM 2014)

En total, el país aporta anualmente:

- Carga orgánica biodegradable (DBO₅) después de tratamiento total de 756.945 t/año para el año 2012, la industria aporta el 28%, el sector doméstico el 69% y el sector cafetero 3%. El 80% de esta carga orgánica fue aportada por 55 municipios principales y ciudades grandes del país.
- Demanda química de oxígeno (DQO) de 1.675.616 t/año, 37% de la industria, 61% sector doméstico y 2% eje cafetero. El mayor vertimiento de esta carga se hace en el área hidrográfica del Magdalena – Cauca, seguida del Orinoco, Amazonas, Caribe y Pacífico.
- Sólidos suspendidos totales vierten 1.135.726 t/año. La industrial aporta el 7%, el sector doméstico el 91% y el sector cafetero el 1%.
- Carga vertida de Nitrógeno Total (NT) después de tratamiento, se alcanzó 126.345 t/año. La industria aporta el 16% y el sector doméstico 84 %. Los municipios de Medellín, Bogotá, Barranquilla, Cartagena, Cali, Santa Marta, Bucaramanga, Cúcuta, aportan el 75% del nitrógeno total que llega a las fuentes hídricas del país.
- Carga de fósforo (PT) vertida de 31.915 t/año, la industria aportó el 7% y el sector doméstico el 92%.

Los valores aportados se resumen en el grafico 10 como medida visual de análisis en el que se puede observar el comparativo de cada carga contaminante de acuerdo al sector: Domestico, industria y café.

Grafico 10 Carga contaminante Total



Fuente (IDEAM 2014)

La Figura 9 permite apreciar con mayor facilidad el DBO₅ mediante el mapa del territorio colombiano, en el que se identifica los municipios que generan alguna demanda biológica de oxígeno, componente a evaluar en el agua residual.

Se observa que aquellos lugares con índice de ruralidad más alto presentan menores índices de DBO₅ pero el problema radica en que estos sectores son los que presentan mayores vertimientos difusos dificultando un adecuado conocimiento de las propiedades de estas aguas por su propio origen.

Como se analizó unas páginas arriba, las poblaciones con índices de ruralidad alto abarcan un mayor terreno en el país y de una u otra forma siguen generando agua residual. Las cargas contaminantes perjudican el cuerpo receptor, la materia orgánica se degrada por los microorganismos que consumen oxígeno en los procesos matando a la fauna acuática u ocasionando que se proliferen organismos patógenos y en casos extremos originan la eutrofización del agua, consecuencia directa de la contaminación.

Sectores como Leticia, Mitú, Yopal, Arauca, poblaciones cercanas a montería o Sincelejo presentan un índice de ruralidad medio alto, entre otros que se pueden observar, presentan una carga de DBO significativa, problemática que debe ser atendida. Los departamentos de Antioquia, Valle del Cauca, Bolívar, Atlántico, Santander, Cundinamarca y Cauca aportaron el 66% de carga de materia orgánica biológica del DBO generado en el país. El mayor vertimiento de esta carga se hace en el área hidrográfica del Magdalena – Cauca, seguida del Orinoco, Amazonas, Caribe y Pacífico.

Teniendo en cuenta estos datos se puede obtener información de la carga contaminante removida por los sistemas de tratamiento y la que está siendo vertida a los cuerpos de agua. Puede visualizarse en la siguiente tabla:

Tabla 4 Carga de contaminación removida en sistemas de tratamiento de aguas residuales

Parámetro	Carga generada doméstico e industria (Kg)	Carga vertida doméstico e industria (Kg)	Cantidad removida (Kg)	Porcentaje de remoción
DBO	1.085.127.286	736.296.107	348.831.179	32,1
DQO	2.411.886.881	1.648.621.034	763.265.847	31,6
SST	1.517.405.973	1.119.062.421	398.343.552	26,3
NT	128.890.983	126.345.302	2.545.681	2,0
PT	32.465.812	31.915.345	550.467	1,7

Contaminante	Remoción de carga	
	Industria %	Doméstico %
DBO	54	15
DQO	49	14
SST	59	21
NT	3	2
PT	2	2

Fuente:(IDEAM 2014)

La industria en muchas ocasiones es la que más tóxicos puede verter al agua para sus respectivos procesos, por tal razón es de suma importancia la remoción de carga contaminante que realiza esta. En comparación, el sector doméstico genera un porcentaje menor de remoción de carga contaminante pero como se pudo observar en el gráfico 5, este es el que genera mayores números en las diferentes zonas hidrográficas a excepción del Amazonas generando en total una carga contaminante de 3.662.240.209 kg.

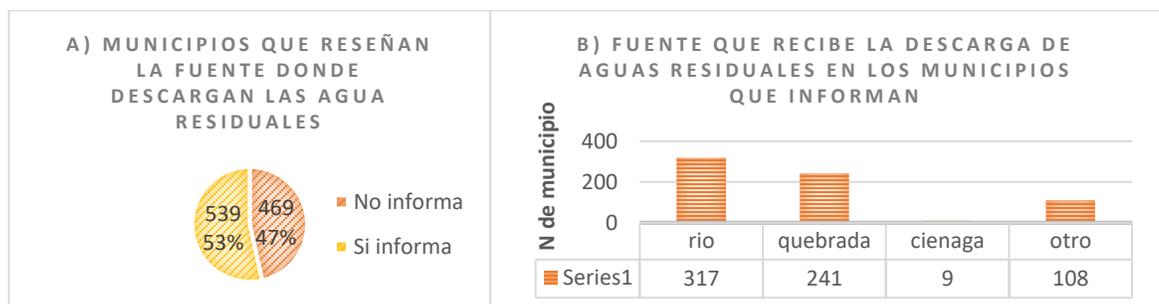
La calidad del agua con la que llega el agua a la fuente receptora permite identificar la necesidad de generar la depuración de esta ya que alto nivel de contaminación deteriora la fuente receptora que en muchos casos es utilizada más adelante por otra población que se nutre del mismo río o quebrada.

4. FUENTE QUE RECIBE LA DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES (Unicef et al. 2006)

Gran cantidad de municipios vierten las aguas residuales a la fuente de agua más cercana sin realizar algún tipo tratamiento y como ya se ha mencionado antes esto representa una amenaza no solo para la población si no para los diferentes ecosistemas que se benefician de esta.

De los 1.008 planes municipales analizados, Grafico 4, 469 (46%) no hacen referencia a la fuente donde realizan la descarga de aguas residuales generadas en la zona urbana lo que resalta la falta de interés por tener conocimiento de donde se está depositando el agua residual que el hombre genera, y el resto de porcentaje (53%) informa la fuente de descarga de las que principalmente es en ríos (59%) y quebradas (45%), otros vertimientos son dispuestos en caños, humedales y calles.

Grafico 11 Municipios que reseñan la fuente de descarga de aguas residuales

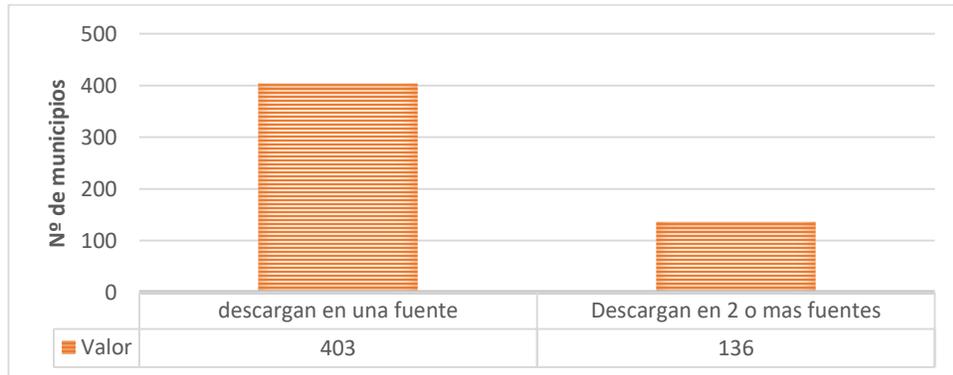


Fuente: (Unicef et al. 2006)

Es de suma preocupación que el impacto ambiental por la descarga de agua residual en muchas ocasiones se hace en más de una fuente generando complicaciones ambientales y de salud. De los municipios que informan donde descargan el agua residual, el 25% lo hace en dos o más fuentes receptoras (Grafico 5).

Este porcentaje debe ser atendido por que se está contaminando varias fuentes al mismo tiempo lo que fomenta la contaminación de fuentes superficiales y cuerpos de agua, así solo se haga vertimiento en una fuente receptora (75%) se debe realizar un sistema de tratamiento de agua residual que garantice la calidad del recurso no renovable que es el agua.

Grafico 12 Municipios que hacen descargas en una o más fuentes de agua



Fuente: (Unicef et al. 2006)

5. ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL FILTRO VERDE EN EL ENTORNO COLOMBIANO.

No se procede a realizar un análisis de las características de operación y de terreno ya que estas deben ser evaluadas in situ, son consideradas características propias de cada lugar de implementación lo que dificulta hacer un análisis general en estos aspectos.

Las características climatológicas, como se mencionaron anteriormente deben evaluarse para el correcto rendimiento del filtro verde. Se evaluará la precipitación, evapotranspiración y temperatura, en términos generales para toda Colombia, como condiciones del entorno para la implementación del filtro verde como mecanismo depurativo de agua residual. Se debe tener en cuenta que la implementación de este mecanismo no puede realizarse en cualquier lugar ya que las condiciones evaluadas permiten identificar si es viable o no el proyecto de acuerdo al rendimiento que este vaya a tener.

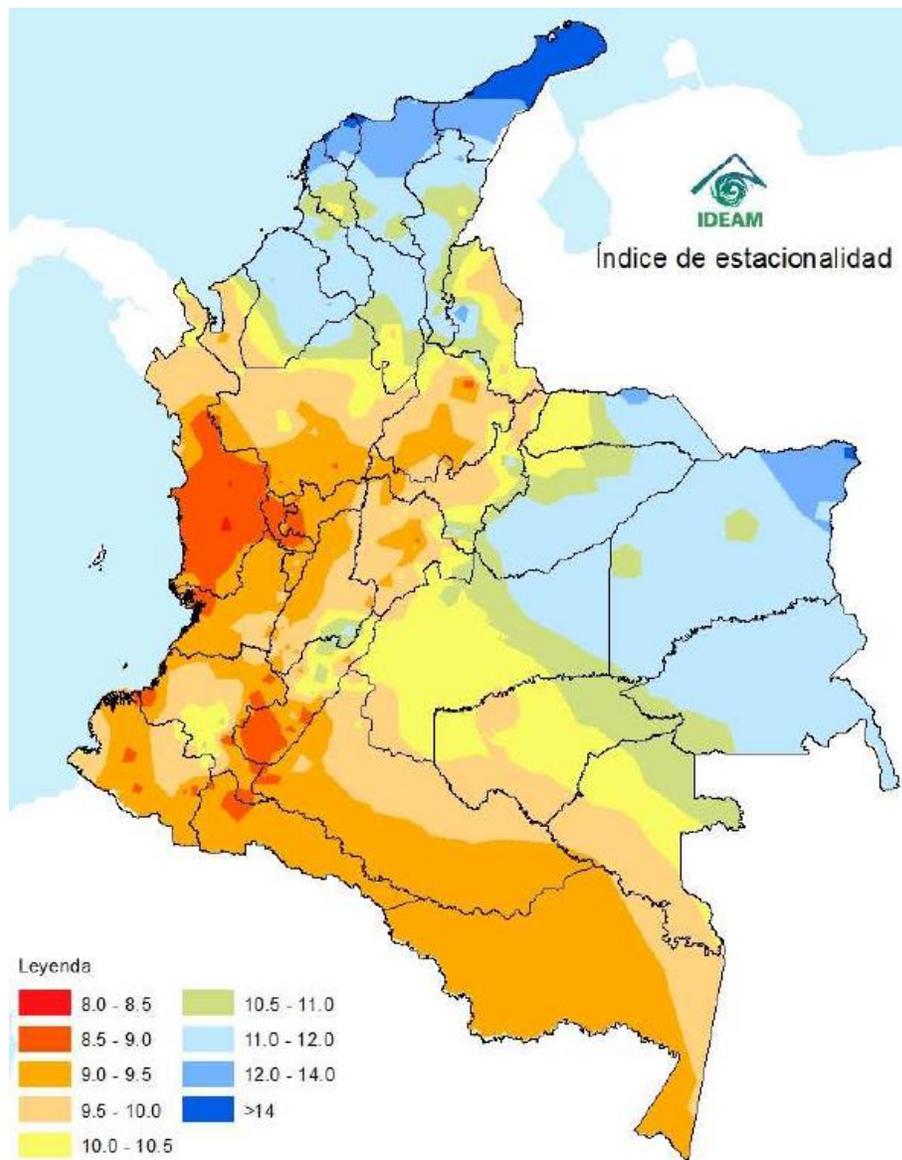
5.1. Precipitación

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) presenta el Índice de Concentración de Precipitación (PCI) en Colombia lo que refleja la estacionalidad de las lluvias lo que permite identificar las diferencias entre las temporadas secas y lluviosas. Los mayores valores de PCI indican alta estacionalidad, es decir, marcadas diferencias entre los meses lluviosos y los meses secos (IDEAM 2011).

Como se visualiza, departamentos como Putumayo, parte de Amazonas, Nariño, Caquetá, Huila, Cauca, valle del Cauca, Choco, Risaralda Caldas y una menor parte de Antioquia y Tolima no se recomienda para nada esta tecnología por la gran

cantidad de precipitación que se genera a lo largo del año lo que genera gran humedad en los terrenos y una descarga de agua residual sobre estos solo generaría una saturación de agua impidiendo la depuración del agua. Sectores en tonalidades azules, son departamentos donde el filtro verde tendría buenos rendimientos ya que se es posible identificar los meses de mayor y menor precipitación y con un adecuado almacenamiento y riego se obtendrían buenos beneficios.

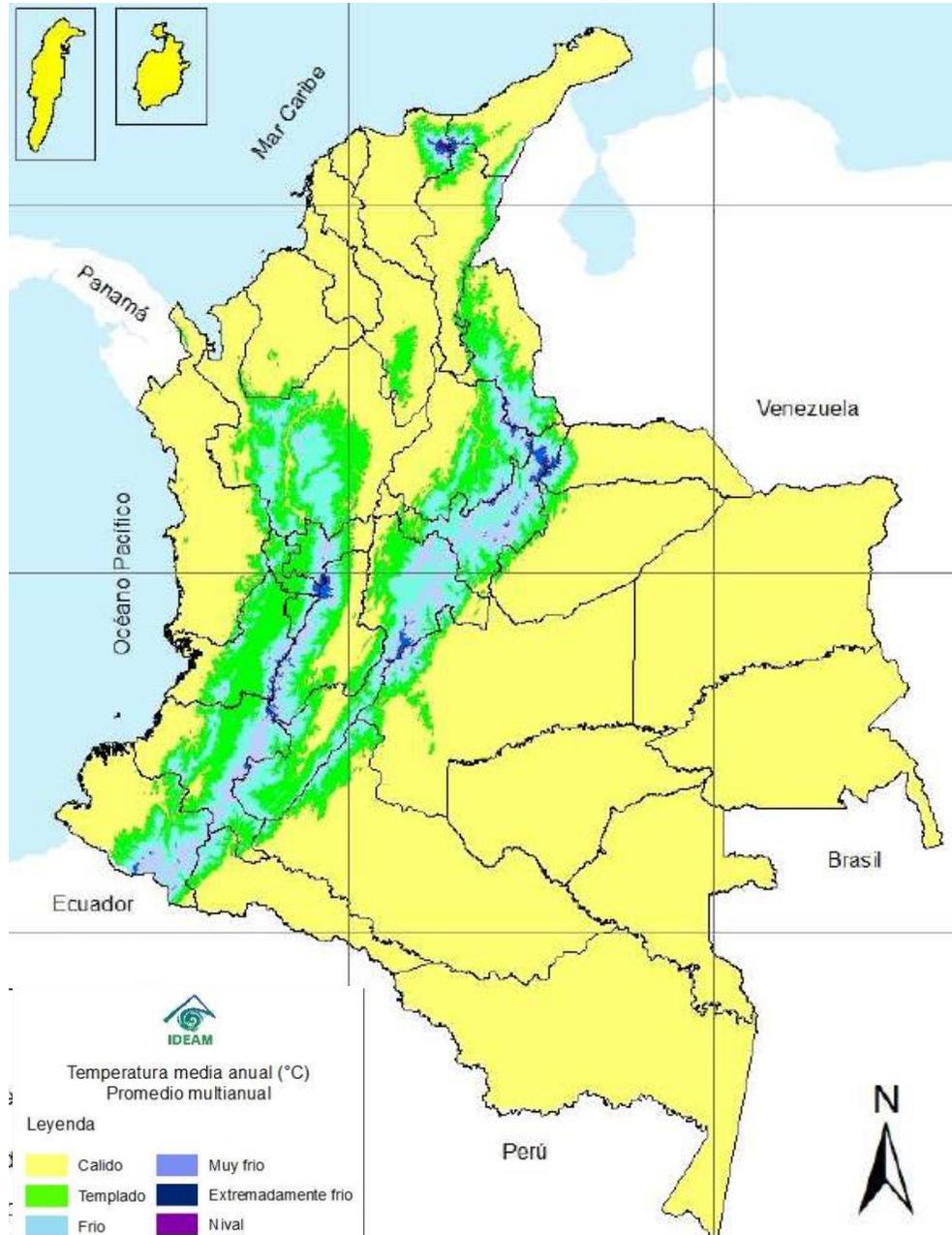
Figura 11 Índice de Estacionalidad de la Precipitación



Fuente: (IDEAM 2011)

5.2. Temperatura

Figura 12 Temperatura media anual (°C) Promedio multianual



Fuente: (Ideam y Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial 2011)

La figura 12 refleja la geomorfología del país, donde en las formaciones montañosas se presentan las temperaturas más frías lo que no beneficia el rendimiento del filtro

verde respecto al comportamiento que va a tener la materia orgánica en la descomposición de los contaminantes presentes, ya que la velocidad de interacción de la capa vegetal y microbiana se intensifica con la temperatura. Cabe resaltar que gran parte de estos sectores con temperaturas frías presentan un índice de ruralidad bajo lo que tampoco hace viable este mecanismo depurativo.

En términos generales el país presenta una temperatura cálida a lo largo del año abarcando mayor territorio de una posible implementación del filtro verde como tratamiento sostenible de agua residual.

5.3. Evapotranspiración

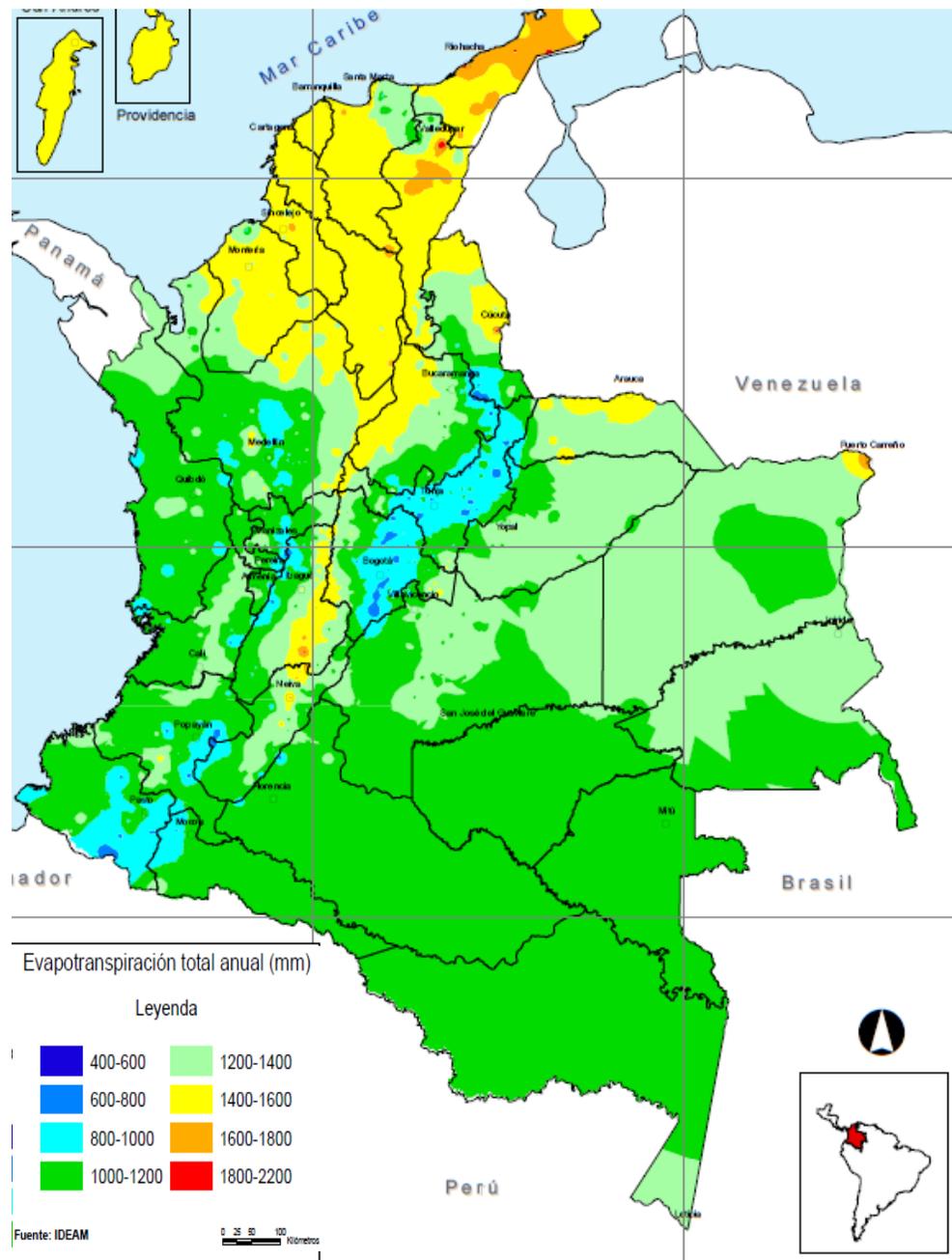
La cuantificación de la evapotranspiración es indispensable para evaluar el agua disponible en el suelo a ser utilizada por la vegetación para su crecimiento y producción. Mediante el contraste con la lluvia, permite establecer las necesidades de riego o drenaje en una región determinada permitiendo de esta forma estudiar los estudios de ordenamiento y clasificación agroclimática del país (IDEAM 2000).

Como se caracterizó anteriormente el conocimiento de la evapotranspiración y precipitación del sector permite determinar la dotación de agua requerida para riego siendo este factor determinante para el riego del cultivo seleccionado. Índices altos de evapotranspiración con poca precipitación serán sectores donde se abastecerá de mayor agua residual por la necesidad del sistema por tal razón a la hora de seleccionar un lugar se debe evaluar todas las condiciones, tanto de operación como de entorno.

La figura 13 muestra la evapotranspiración total anual representada en milímetro (mm) lo que permite analizar, que, a excepción de las tonalidades azules, el país presenta buenos índices de evapotranspiración lo que es bueno para el riego de agua residual sobre el terreno, pero como se mencionó antes también debe evaluarse la precipitación.

El país presenta buenos índices de evapotranspiración, a excepción de los departamentos como Boyacá en los que se presenta los menores índices junto con los sectores de Cundinamarca, Nariño y Cauca. Los altos índices de evaporación y transpiración en los diferentes departamentos de Colombia, beneficia la necesidad de riego de agua residual sobre el terreno, pero como se mencionó antes también debe evaluarse junto con la precipitación

Figura 13 Evapotranspiración total anual (mm)



Fuente: (IDEAM 2013)

POSIBLE IMPACTO DE LA IMPLEMENTACION DE FILTROS VERDES COMO TRATAMIENTO SOSTENIBLE DE AGUA RESIDUAL EN ZONAS RURALES

Según un estudio publicado por Global Water Partnership, Colombia se ubica en el tercer país con más agua a nivel mundial y posee tres de las mayores cuencas fluviales del mundo: Amazonas, Orinoco y el Río de la Plata (El Universal 2015). En búsqueda de mantener las fuentes hídricas en las mejores condiciones, siendo el agua un recurso limitado se hace necesario una gestión eficaz (Morató et al. 2006).

La implementación de los filtros verdes traería consigo la conservación del estado natural del agua en un alto porcentaje de calidad y no solo esto, la implementación de esta tecnología sostenible para tratamiento de agua residual promueve la interacción de los ecosistemas beneficiando no solo a la población rural si no el mejoramiento de los cauces fluviales.

El alto nivel de disposición de aguas residuales sin tratar a las fuentes hídricas se presenta por la poca existencia de sistemas de tratamiento o el inadecuado funcionamiento siendo esta la situación actual del país. Con el conocimiento de la infraestructura existente o proyectada, su estado, las políticas locales y de promoción y el fomento de las prácticas adecuadas para el manejo de aguas residuales (Departamento Nacional de Planeación 2016), el documento presentado por el viceministerio de ambiente: Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, busca específicamente dentro de uno de sus objetivos mejorar la calidad y minimizar la contaminación del recurso hídrico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial 2010).

La conciencia del agua como fuente fundamental de vida y las consecuencias de la inadecuada disposición de las aguas residuales que provocan contaminación del suelo y las fuentes hídricas, subterráneas y superficiales, siendo nocivo para la salud pública y el medio ambiente (Departamento Nacional de Planeación 2016), hace necesario que el país se involucre en este proceso de depuración de las aguas residuales.

Colombia, un territorio en el que gran superficie pertenece a las zonas rurales, se presenta un progreso menor en comparación con las ciudades en diferentes aspectos y la posible implementación del filtro verde en estas zonas ayuda al avance ecosistémico del agua disminuyendo los altos niveles de disposición de agua residual sin tratar en las zonas rurales (Departamento Nacional de Planeación 2016).

Las limitaciones económicas para la implementación de sistemas convencionales de depuración del agua hacen que los porcentajes de efluentes depurados sean escasos, por lo que esta tecnología sostenible de bajo costo se convierte en una alternativa viable (ALFA TECSPAR 2014).

El beneficio de los sistemas naturales ante los convencionales se refleja en la Tabla 5 en la cual se hace una comparación ante los dos sistemas. La zona rural permite la implementación de los sistemas naturales y se beneficiaría de las características que este presenta. La población rural es menor que la urbana por lo que el caudal que este genera puede ser dispuesto en el riego de los filtros naturales lo que no permiten los grandes caudales generados en los poblados centros urbanos.

Tabla 5 Sistemas naturales vs. Sistemas convencionales

SISTEMAS NATURALES	SISTEMAS CONVENCIONALES
Costo proyecto medio	Elevado costo proyecto
Bajo costo mantenimiento	Alto costo mantenimiento
Bajo o nulo consumo energético	Requiere consumo energético
No requiere personal técnico	Requiere personal técnico
Producción de fangos baja o nula	Elevada producción de fangos
Buena integración en el medio	Baja integración en el medio
No genera malos olores	Producción de malos olores

Fuente: (ALFA TECSPAR 2014)

1. MANEJO DE VERTIMIENTOS (Londoño Pérez y Parra Martínez 2007)

La descarga de residuos líquidos, a un cuerpo de agua o a una red de alcantarillado es lo que se conoce como vertimiento, convirtiéndose en un problema para los recursos hídricos ya que el ser humano genera una interacción al usar el agua y devolverla a la fuente hídrica. Dentro del plan de ordenamiento del recurso hídrico presente en el Decreto 1594 de 1984 se debe garantizar la calidad de los vertimientos y las óptimas condiciones de los cuerpos de agua.

El decreto presenta una carencia en los mecanismos del control de vertimientos, pero ratifica la importancia del recurso hídrico como fuente de aprovechamiento que puede verse afectada por el uso de esta.

Los criterios de calidad para los cuerpos de agua y los límites máximos permisibles de sustancias que pueden ser vertidas en ellos no es más que un mecanismo para mantener la calidad de las fuentes hídricas. Con el paso de los años se ha puesto más interés en la disposición de los vertimientos y se establecen medidas para que estos criterios sean cumplidos dentro del comportamiento con la que el agua residual regresar a las fuentes receptoras involucradas en políticas y normativas que se sintetizan en la tabla 6. El Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales

Municipales es la acción más actual que encontramos y busca las mejores condiciones para la interacción de la población con el agua.

Tabla 6 Política y normatividad relacionada con el manejo

Sector Salud	
Decreto 2811 de 1974	Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente
Ley 9 de 1979	Código Sanitario Nacional
Decreto 1594 de 1984	Uso del agua y vertimientos
Sector Agua Potable y Saneamiento Básico	
Ley 142 de 1994	Régimen de los servicios públicos domiciliarios
Ley 373 de 1997	Uso Eficiente y Ahorro del agua
Resolución 1096 de 2000	Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento - RAS.
Medio Ambiente	
Ley 99 de 1993	Organiza el SINA y crea el Ministerio del Medio Ambiente
Decreto 3100 de 2003	Tasas retributivas
Resolución 372 de 1998	Monto de las tasas mínimas para las tasas retributivas
Decreto 155 de 2004	Tasas por utilización del agua
Resolución 240 de 2004	Establece tarifa mínima para las tasas por utilización de agua
Decreto 1180 de 2003	Licencias Ambientales
Documentos de Política	
Constitución Política Nacional. 1991.	
Ley 812 de 2003 por la cual se aprueba el Plan Nacional de Desarrollo 2003-2006, hacia un Estado comunitario.	
Lineamientos de Política para el Manejo integral del agua. Aprobado por el Consejo Nacional Ambiental en 1996.	
Política pública para el sector de agua potable y saneamiento básico de Colombia. 2001.	
Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos y las Zonas Costeras e Insulares de Colombia. Aprobado por el Consejo Nacional Ambiental en 2000.	
Conpes 3146 de 2001, Estrategia para consolidar la ejecución del Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres en el corto y mediano plazo.	
Conpes 3164 de 2002, Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos y las Zonas Costeras e Insulares de Colombia – Plan de Acción 2002 – 2004.	

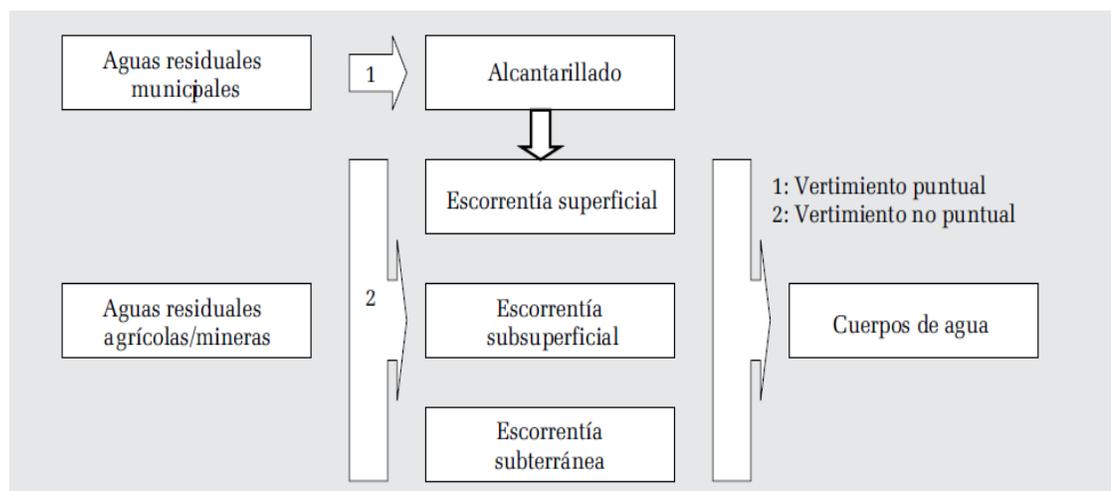
Conpes 3177 de 2002, Acciones Prioritarias y Lineamientos para la Formulación del Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales (PMAR)
Ley 812 de 2003, Ley del Plan Nacional de Desarrollo 2002 –2006 Hacia un Estado Comunitario.
Lineamientos de la Política Nacional del Océano y los Espacios Costeros – LPNOEC. Adoptado por los miembros de la Comisión Colombiana del Océano en 2003.

Fuente: (Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial. 2004)

Corresponde al Estado garantizar la calidad del agua para consumo humano y, en general, las condiciones del recurso hídrico. La ordenación de las cuencas hidrográficas permite la integración de los diferentes recursos hídricos permitiendo a su vez analizar la interacción entre sí y con el medio natural, también permite identificar la oferta y demanda de los recursos siempre en búsqueda del bienestar de las comunidades humanas y la sostenibilidad de este.

Los vertimientos se pueden analizar desde puntuales y no puntuales (difusos) siendo los primeros los correspondientes a estos puntos exactos donde se identifica la descarga que pasa a la red de alcantarillado. Por lo general las aguas residuales de las actividades agropecuarias y mineras se convierten en vertimientos no puntuales, estos vertimientos se incorporan a la escorrentía superficial, sub superficial y subterránea. En los vertimientos puntuales es más fácil establecer las características de la descarga, por lo tanto, no resulta nada fácil determinar con exactitud las características de los vertimientos no puntuales, por su misma naturaleza.

Grafico 13 Vertimientos puntuales y no puntuales



Fuente: (Londoño Pérez y Parra Martínez 2007)

Según el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, las inversiones de tratamiento de agua residual se encuentran en segundo nivel de prioridad (Superintendencia de Servicios Públicos 2013) por lo que se hace necesario que se implementen mecanismos depuradores de agua residual.

De acuerdo al Índice de la Alteración Potencial de Agua (IACAL) se presentan presiones potenciales por cargas contaminantes a la calidad del agua, la figura 13 muestra las condiciones hidrológicas del año medio para las subzonas hidrográficas.

Las subzonas potencialmente más presionadas por contaminación corresponden a los denominados ríos Timaná y otros directos al Magdalena, directos Magdalena (md), Neiva, Lagunilla y otros directos al Magdalena, en el alto Magdalena. En el Magdalena medio los directos Magdalena entre ríos Guarinó y La Miel (mi), Quebrada El Carmen y otros directos, Suárez, y Sogamoso. Bajo San Jorge–La Mojana, en el bajo Magdalena. Risaralda, Guabas, Zabaletas y Sonso, en el Cauca. Lago de Tota, Río Guitara, en el Meta y Patía. León, Dagua-Buenaventura-Bahía Málaga en Caribe litoral. Son bastantes los lugares que generan un alto índice potencial de carga contaminante sin mencionar los que generan un índice más bajo, pero aun así alteran la calidad del agua.

Como se puede visualizar en la siguiente figura, siguen generándose grandes presiones potenciales por cargas contaminantes en diferentes municipios del país donde se evidencia la carencia del manejo de vertimientos y se destaca la importancia del tratamiento de este, bajo las medidas necesarias para proteger los cuerpos de agua incentivando hacia los beneficios que se generan. El vertimiento difuso se presenta como el más crítico siendo este el que debería ser más restrictivo frente a la normativa existente por el alto impacto que genera.

2. FILTRO VERDE COMO MANEJO DE VERTIMIENTOS PARA LAS ZONAS RURALES

El beneficio de los filtros verdes como tratamiento sostenible de agua residual radica no solo en su naturaleza, si no en el comportamiento de este mecanismo como solución al vertimiento puntual y no puntual ya que, al implementarse, se convierte en una pauta de depuración antes de la descarga a las diferentes escorrentías, fuentes hídricas receptoras. Promueve también la configuración de alcantarillados ya que estos son necesarios para dirigir las descargas de agua residual hacia el filtro verde lo que organizaría la situación de muchos sectores rurales carentes de alcantarillado.

Como se analizó previamente, la superficie rural es de gran magnitud, espacio idóneo para la implementación de filtros verdes ya que se hace necesaria un amplio terreno, se necesita espacio para que se genere una buena porción de cultivo de acuerdo al caudal de agua residual generado por la población.

Las tecnologías sostenibles como filtros verdes van de la mano ante el manejo de vertimientos y el tratamiento de aguas residuales en las normativas existentes ya que la calidad del agua obtiene muy buenos resultados, es sostenible, lo que implica menor costo a largo plazo por la naturaleza del mantenimiento y el personal técnico necesario, lo que es importante ya que los recursos monetarios destinados al tratamiento de agua residual se reducen y así mismo se puede mantener por más tiempo convirtiéndose en una respuesta positiva ante las estrategias que se han desarrollado en el país.

Los sectores más rurales, aquellos que están lejos de los centros urbanos que en muchas ocasiones no tiene acceso a una gran tecnología serían los mayores beneficiados por las características de mantenimiento de esta tecnología y a su vez porque al generarse buena calidad de agua vertida en la fuente hídrica esta no se convierte en un peligro para la fauna y flora beneficiando también la salubridad de la población.

Los municipios deberían contar con plantas de tratamiento que disminuyan el impacto del vertimiento de aguas residuales y evaluar la viabilidad de la construcción de una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) teniendo en cuenta las normas técnicas establecidas en el Reglamento del Sector (RAS 2000) (Unicef et al. 2006).

En muchas ocasiones no se amerita realizar tan grande proyecto, en pequeños municipios la experiencia ha demostrado que las plantas depuradoras de aguas residuales, basadas en tecnologías convencionales, originan problemas, tanto técnicos como económicos, generando que un gran número de éstas instalaciones queden fuera de servicio en un plazo de tiempo muy corto (Sainz Sastre 2005) por

tal razón un filtro verde puede atender poblaciones más pequeñas beneficiando también la interacción de ecosistemas.

Dar solución a la contaminación de las aguas residuales no solo beneficia la fuente receptora, que está siendo gravemente afectada, si no que potencializa la creación de terrenos que se integran perfectamente en el medio rural convirtiéndose en un mecanismo sostenible por el bajo costo energético, la inexistencia de lodos y los altos niveles de depuración que beneficiaría a la disminución de los índices potenciales de contaminantes vertidos en las fuentes (Alianza por el agua 2008).

El agua es un recurso no renovable que debemos cuidar a lo largo de los años sin generar ningún impacto negativo para ella. El uso del agua con el incremento de las diferentes actividades del país como agricultura o hidrocarburos siempre se verá en incremento como se muestra a continuación en una proyección realizada por el Estudio Nacional del Agua, sumado a esto el incremento de la población también se refleja en el en la demanda hídrica proyectada para el país lo que incrementa la importancia del tratamiento de agua residual ya que a mayor demanda mayores vertimientos y como ya se ha mencionado anteriormente una alta carga contaminante no permite la depuración natural de las aguas residuales generando contaminación.

Los filtros verdes proporcionan una solución antes las descargas de las aguas residuales municipales que en muchos casos han generado problemas ambientales críticos por todas las consecuencias que se generan por los vertimientos no puntuales, que son los de mayor porcentaje para las zonas rurales.

Los municipios colombianos deben orientarse hacia una mayor responsabilidad en la gestión para orientar el desarrollo socioeconómico y ambiental acatando la normatividad establecida en búsqueda del mejor beneficio económico, social, cultural y ambiental, teniendo en cuenta las tecnologías blandas como los filtros verdes como mecanismo depurador de aguas residuales hacia los sectores rurales del país son un mecanismo viable de implementación.

Tabla 7 Proyecciones de uso de agua total en los sectores económicos y uso doméstico millones de m³

Demanda Sectores millones de m³	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Uso doméstico total + Pérdidas	2.963	2.996	3.029	3.062	3.095	3.128	3.161	3.194	3.227	3.260	3.294
Agrícola	16.760	17.823	18.962	20.468	22.056	23.940	26.116	28.638	31.699	35.363	39.526
Pecuario + Pérdidas	3.049	3.071	3.077	3.123	3.165	3.210	3.253	3.298	3.341	3.385	3.428
Piscícola	1.654	1.869	1.977	2.085	2.193	2.301	2.409	2.517	2.625	2.733	2.841
Uso en energía XM HH	7.738	8.345	8.638	9.018	9.380	9.612	9.975	10.319	10.566	10.798	11.039
Industria+ Construcción	2.106	2.107	2.108	2.109	2.111	2.112	2.114	2.115	2.117	2.118	2.120
Hidrocarburos	592,8	1,3	1,3	1,2	1,3	1,4	1,5	1,4	1,2	1,1	1,0
Minería Carbón y oro	640	666	692	720	749	779	810	843	876	911	948
Servicios + Pérdidas	481	485	488	492	496	499	503	506	510	513	517
Total demanda de agua	35.987	37.366	38.976	41.082	43.250	45.586	48.346	51.435	54.966	59.087	63.717

Fuente: (IDEAM 2014)

El motivo de tratar las aguas residuales es salvaguardar la salud pública y el medio ambiente. Si las aguas residuales no son tratadas y son vertidas directamente en ríos, lagos o mares, introduciendo elementos de contaminación que acaben produciendo importantes daños ecológicos en el entorno ambiental y enfermedades de salud pública.

El filtro verde se convierte en un mecanismo que depura el agua y se incorpora al medio ambiente convirtiéndose en un mecanismo sostenible para la población rural.

CONCLUSIONES

- Los filtros verdes, como mecanismos de depuración de agua residual, necesitan una evaluación de las condiciones de entorno y operación en conjunto. De no ser así, esta tecnología no obtendrá el rendimiento óptimo, especialmente si nos limitamos a realizar un diseño que solo tenga en cuenta la carga hidráulica y la superficie necesaria para esta.

En muchas biografías no se encuentra la necesidad de evaluar otras condiciones, haciéndose necesario diferenciar características de operación que involucran, por ejemplo, el funcionamiento de la interacción suelo, planta y agua; de las condiciones del entorno, involucradas indirectamente en esta interacción. La correcta evaluación de estas condiciones permitirá identificar las condiciones geográficas en donde se hace posible una implementación del filtro con un desempeño óptimo y descartar otros en donde otras tecnologías puedan tener un mejor desempeño.

- Una implementación del filtro verde en las zonas rurales de Colombia, podría disminuir el porcentaje de deterioro de las aguas subterráneas y superficiales. Lo que generará beneficios ecológicos, sostenibles y sociales en las zonas rurales, teniendo en cuenta que estas presentan menor desarrollo de infraestructura para el saneamiento en comparación las zonas urbanas. En su amplio territorio, Colombia presenta un extenso sector rural en donde un buen análisis de las condiciones de funcionamiento del filtro verde, y de las características propias de cada región, podrán determinar un óptimo rendimiento de depuración del agua.

Esto otorgará beneficios hacia las fuentes hídricas receptoras que no recibirían una carga contaminante que afecte los ecosistemas. Las diferentes condiciones evaluadas en el presente documento, en términos generales, permiten hacer viable la implementación de los filtros verdes en gran parte del territorio colombiano. Esto de acuerdo con la geomorfología y ubicación del país. Igualmente, el diseño al tener en cuenta las características físicas y ambientales de la zona de implementación de los filtros, permitirá implementar el filtro verde como mecanismo sostenible de agua residual en las zonas en donde no existe infraestructura de saneamiento tradicional.

- La medida de un problema se da al analizar la viabilidad de la solución. La normatividad existente, referente a las aguas residuales, al tratamiento y manejo de vertimientos, son una herramienta guía en búsqueda del beneficio del ambiente y de la sociedad. La implementación de nuevas tecnologías para la depuración del agua residual en regiones rurales es un mecanismo alternativo, no convencional, que buscan dar solución a la carga contaminante generada por el ser humano.

Resultan claras las consecuencias negativas que generan los vertimientos no controlados de estas aguas tales como la eutrofización de ríos, y los consecuentes costos de volver estas aguas potables para aprovechamiento de la población. Si se realiza un previo tratamiento al agua residual, directamente en la fuente, no solo se beneficia la fauna y flora si no que se disminuyen costos y se aumenta la salubridad de las poblaciones en las zonas rurales. Este es el principal beneficio de esta tecnología.

- Los mecanismos de tecnología blanda como los filtros verdes necesitan escenarios específicos de aplicación como las zonas rurales. En otros escenarios, como en grandes poblaciones su implementación no resulta tan ventajosa, especialmente por las cargas contaminantes y el espacio necesario. En comparación, las tecnologías convencionales no son la mejor solución a poblaciones pequeñas o con índices de ruralidad alto ya que estas generan costos más elevados en la construcción, operación y mantenimiento, en comparación con otras tecnologías.

Es así como, en algunas ocasiones no amerita realizar la construcción de una planta de tratamiento de agua residual para tratar los vertimientos, los caudales son pequeños y los puntos de vertimiento se encuentran muy separados unos de otros. Es por esto que los filtros verdes son una alternativa viable y sostenible, que no solo beneficia la economía del sector, sino que a su vez mejora la interacción de las poblaciones con los ecosistemas. Es una alternativa con amplio grado de implementación en varios sectores rurales del país en concordancia con las características evaluadas para el mejor rendimiento.

- Departamentos como Arauca, Casanare, Meta, Vichada, Guanía, Guajira Magdalena, Atlántico, Bolívar y Córdoba reflejarían muy buenos resultados ante la depuración de agua residual por las condiciones evaluadas: Precipitación, temperatura y evapotranspiración. Siendo estas tres condiciones de entorno los principales a evaluar para futuros proyectos por su naturaleza, las tres son una interacción conjunta, pero cabe resaltar que no se puede dejar de lado la evaluación in situ de las condiciones de operación.
- El agua doméstica es la que genera mayores vertimientos en todo el país y el filtro verde se ajusta perfectamente a las condiciones del tipo de agua residual, en caso de ser utilizada la tecnología blanda para tratamiento de aguas provenientes de la agricultura es importante analizar el tipo de componentes ya que las plantaciones pueden verse afectadas por los tóxicos que puedan contener. Agua doméstica o de otro origen no se recomienda para cultivos agrícolas por la propia naturaleza de esta.

BIBLIOGRAFIA

- ALBARRACIN, Luis Felipe, 2016. *Intercambio Cationico* [en línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=vu05FP-ajbw>.
- ALFA TECSPAR, 2014. *Manual de Tecnologías Sostenibles en Tratamiento de Aguas*. S.l.: s.n. ISBN 9789584453075.
- ALIANZA POR EL AGUA, 2008. *Manual de depuración de aguas residuales urbanas* [en línea]. S.l.: s.n. ISBN 8497171721. Disponible en: <http://alianzaporelagua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf>.
- ALPUENTE, T., 2015. El ciclo del nitrógeno y el compostaje. *5 de abril* [en línea]. [Consulta: 8 marzo 2018]. Disponible en: <http://elhuertoentubalcon.com/el-ciclo-del-nitrogeno-y-el-compostaje/>.
- ÁLVAREZ, F., 2002. Filtros verdes . Un sistema de depuración ecológico. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. XXIII, no. 1, pp. 25-29.
- ANDREO, M., 2003. Demanda Biológica de Oxígeno (D.B.O.). [en línea]. [Consulta: 21 febrero 2018]. Disponible en: <https://www.mendoza-conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/DBO.htm>.
- ARTESANÍAS DE COLOMBIA S. A., 2015. Fortalecimiento de la actividad artesanal en el departamento del putumayo. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://repositorio.artesantiasdecolombia.com.co/bitstream/001/3398/1/INST-D 2015. 76.pdf>.
- ASOCIACION GALEGA DE EMPRESAS DE XARDINERIA, 2016. Riego en las cubiertas vegetales. Como calcularlo. [en línea]. [Consulta: 8 marzo 2018]. Disponible en: <http://agaexar.com/riego-en-las-cubiertas-vegetales-como-calcularlo/>.
- CABRERA, A.L. y WILLINK, A., 1973. *Biogeografía de América Latina*. Washington D.C.: s.n.
- CANALES., V., 2015. El chopo, un árbol muy común en España. *Hogar canales Mapfre* [en línea]. [Consulta: 26 marzo 2018]. Disponible en: <https://www.hogar.mapfre.es/jardineria/plantas-y-flores-de-exterior/5868/caracteristicas-chopo>.
- CENTO DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS DEL AGUA, 2008. Métodos naturales de tratamiento de aguas residuales. [en línea]. S.l.: s.n., pp. 10. Disponible en: http://aguas.igme.es/igme/publica/libro33/pdf/lib33/cap_3.pdf.
- COLCIENCIAS, 2016. Colombia, el segundo país más biodiverso del mundo. [en

[en línea]. [Consulta: 27 marzo 2018]. Disponible en: http://www.colciencias.gov.co/sala_de_prensa/colombia-el-segundo-pais-mas-biodiverso-del-mundo.

CONAGUA, C.N. del A., 2015. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Tratamientos no Convencionales*. Mexico: s.n. ISBN 9786076260081.

CONANT, J. y FADEM, P., 2008. *A Community Guide to Environmental Health*. First edit. Canada: s.n. ISBN 9780942364569.

DANE, 2017. DANE. [en línea]. Disponible en: <http://www.dane.gov.co/>.

DELGADILLO, O., 2005. *Riego Por Aspersión* [en línea]. 2005. España: s.n. Disponible en: https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Hidraulica/PresentacionesPDF_STR/TemaRiegoAspersion.pdf.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACION, 2016. Construcción de Unidades Sanitarias para Vivienda Rural Dispersa. *Proyectos Tipo. Soluciones ágiles para un nuevo país*. [en línea], vol. 1.0, pp. 43. Disponible en: <https://proyectostipo.dnp.gov.co/images/pdf/unidadesanitarias/PTunidadesanitarias.pdf>.

DURÁN, J.M., RETAMAL, N. y MORATIEL, R., 2010. El papel del nitrógeno en la agricultura y la contaminación por nitrato. *interempresas.net* [en línea]. [Consulta: 26 marzo 2018]. Disponible en: <http://www.interempresas.net/Agricola/Articulos/39819-El-papel-del-nitrogeno-en-la-agricultura-y-la-contaminacion-por-nitrato.html>.

ECURED., 2013. Riego por Aspersión. [en línea]. [Consulta: 21 marzo 2018]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Riego_por_Aaspersion.

EDAFOLOGIA.NET, 2005. Lección 5. Propiedades fisicoquímicas. [en línea]. [Consulta: 21 febrero 2018]. Disponible en: <http://www.edafologia.net/introeda/tema05/ccc.htm#anchor295991>.

EL UNIVERSAL, 2015. Colombia, el tercer país que más agua tiene en el mundo. 6 de marzo [en línea]. [Consulta: 8 marzo 2018]. Disponible en: <http://www.eluniversal.com.co/ambiente/colombia-el-tercer-pais-que-mas-agua-tiene-en-el-mundo-186844>.

ESPIGARES G, M.; PÉREZ LÓPEZ, J. a., 1985. *Aguas Residuales: Composición*. 1985. S.l.: s.n.

FORERO RUIZ, A.F. y URREGO ROJAS, C.J., 2016. *Modelamiento de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales del barrio Fontanar de Suba*.

S.I.: Universidad Católica De Colombia.

- GONZALEZ, J.M. y PLAYAN, E., 2000. Principios básicos del riego por superficie. *Ministerio De Agricultura Pesca Y Alimentacion* [en línea], vol. 1. Disponible en: http://www.mapama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1994_10-11.pdf.
- HABITISSIMO, 2016. Presupuesto instalar sistemas de riego. [en línea]. [Consulta: 26 marzo 2018]. Disponible en: <https://www.habitissimo.es/presupuestos/instalar-sistemas-de-riego>.
- HERNANDEZ MUÑOS, A., HERNANDEZ LEHMANN, A. y GALAN MARTINEZ, P., 2004. *Manual de Depuracion Uralita*. 3ª. Madrid: Paraninfo. ISBN 8428328811.
- IDEAM, 2000. La evapotranspiración potencial en Colombia. [en línea]. [Consulta: 12 abril 2018]. Disponible en: http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=18505&shelfbrowse_itemnumber=19504#shelfbrowser.
- IDEAM, 2011. Índice De Concentración De La Precipitación. *II congreso del Clima* [en línea], pp. 12. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21147/Indices+climatologicos.pdf/>.
- IDEAM, 2013. Evapotraspición total anual (mm). *II Congreso Nacional del Clima* [en línea], pp. 80. Disponible en: <http://www.pronosticosyalertas.gov.co/web/pronosticos-y-alertas/mapas-graficos-tiempo-clima/indicadores-climatologicos>.
- IDEAM, 2014. *Estudio Nacional del Agua* [en línea]. Bogotá D.C.: 2015. ISBN 9789588067704. Disponible en: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf.
- IDEAM y MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2011. Temperatura promedio en Colombia. *II Congreso Nacional del Clima* [en línea], pp. 1-4. Disponible en: <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/778>.
- INFANTE BETANCOUR, J., RIVERA DÍAZ, O., JARA MUÑOZ, A. y OTROS., 2008. *Árboles y Arbustos más frecuentes de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá*. Bogotá D.C.: s.n. ISBN 9789587190472.
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA., 2003. Los Métodos Naturales De Depuración De Aguas Residuales Urbanas. En: L. MORENO MERINO (ed.), *La Depuración De Aguas Residuales Urbanas De Pequeñas Poblaciones Mediante Infiltración Directa En El Terreno Fundamentos Y Casos Prácticos*. Madrid: s.n., pp. 13-27. ISBN 84-7840-464-3.
- JAIME, L.I.G., 2016. Filtros verdes. Humedales. Macrofitas. Módulo Gestión de Aguas Residuales y Reutilización. *Escuela de Organizacion Industrial* [en

línea], pp. 16. [Consulta: 1 enero 2017]. Disponible en: https://www.eoi.es/es/file/52937/download?token=9LA_2LZW.

KNOBELSDORF MIRANDA, J., 2005. *Depuración Biológica De Las Aguas Residuales Urbanas* [en línea]. S.l.: Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en: <http://www.tdx.cat/handle/10803/5909>.

LONDOÑO PÉREZ, R. dario y PARRA MARTÍNEZ, Y., 2007. Manejo de vertimientos y desechos en Colombia. Una visión general. *Revista Épsilon*, vol. 9, pp. 89-104. ISSN 1692-1259.

LU, S., PEI, L. y BAI, X., 2014. Study on method of domestic wastewater treatment through new-type multi-layer artificial wetland. *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea], vol. 40, no. 34, pp. 11207-11214. ISSN 03603199. DOI 10.1016/j.ijhydene.2015.05.165. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.165>.

MANEJO DE AGUAS, 2015. Riego por surcos. [en línea]. [Consulta: 26 marzo 2018]. Disponible en: <http://www.cenicana.org/web/programas-de-investigacion/agronomia/manejo-de-aguas/metodos-de-aplicacion-del-riego/riego-por-surcos>.

MELADZE, M. y MELADZE, G., 2017. Climate Change: a trend of increasingly frequent droughts in Kakheti Region (East Georgia). *Annals of Agrarian Science* [en línea], ISSN 15121887. DOI 10.1016/j.aasci.2017.02.011. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1512188717300222>.

MERINO, L.M., FERNÁNDEZ JURADO, M.A., RUBIO CAMPOS, J.C., CALAFORRA CHORDI, J.M., LÓPEZ GETA, J.A., BEAS TORROBA, J., ALCAÍN MARTÍNEZ, G., MURILLO DÍAZ, J.M. y GÓMEZ LÓPEZ, J.A., 2003. Los Métodos Naturales De Depuración De Aguas Residuales Urbanas. En: L.M. MERINO (ed.), *La Depuración De Aguas Residuales Urbanas De Pequeñas Poblaciones Mediante Infiltración Directa En El Terreno Fundamentos Y Casos Prácticos* [en línea]. S.l.: s.n., pp. 13-27. Disponible en: http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion_aresidual/2.pdf.

METCALF & EDDY INC., 1995. *Ingeniería de aguas residuales. tratamiento, vertido y reutilización*. [en línea]. Tercera ed. España: s.n. ISBN 84-481-1612-7. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/290416625/Ingenieria-de-Aguas-Residuales-Completo>.

MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL., 2004. *Plan nacional de manejo de aguas residuales en Colombia*. [en línea]. Bogotá D.C.: s.n. Disponible en: <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2016.

Macrocuencas. [en línea]. [Consulta: 11 abril 2018]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=1938:macrocuencas#documentos-de-interés>.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2010. *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico* [en línea]. S.l.: s.n. ISBN ISNB: 978-958-8491-35-6. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/plan-hidrico-nacional/Politica-nacional-Gestion-integral-de-recurso-Hidrico.pdf>.

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONOMICO, 2000. Tratamiento de Agua residual. *REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO* [en línea]. Colombia: s.n., pp. 150. Disponible en: http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_e_.pdf.

MONSALVE SAENZ, G., 1999. *Hidrología en la ingeniería* [en línea]. 2ª. Colombia: Alfa Omega. ISBN 958-95741-1-1. Disponible en: https://drive.google.com/file/d/0B8D2_Q6wggqIRNG5yWjdkRzYwZzQ/view?usp=sharing.

MORATÓ, J., SUBIRANA, A., GRIS, A., CARNEIRO, A. y PASTOR, R., 2006. Tecnologías sostenibles para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación* [en línea], vol. 3, pp. 19-29. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69530105%0ACómo>.

OSORIO, C., 2011. La desoladora geografía del campo. *La silla vacía* [en línea]. [Consulta: 28 marzo 2018]. Disponible en: <http://lasillavacia.com/historia/la-desoladora-geografia-del-campo-28006>.

PÉREZ CORREA, E. y PÉREZ MARTÍNEZ, M., 2002. El sector rural en Colombia y su crisis actual. *Cuadernos de desarrollo rural* [en línea], no. 48, pp. 35-58. ISSN 0122-1450. Disponible en: http://repositoriodigital.academica.mx/jspui/handle/987654321/199177%0Ahttp://www.javeriana.edu.co/ier/recursos_user/documentos/revista51/SCANNER/CDR_48/art%EDculo002.pdf.

PROCURADURÍA GENERAL DE LA NACIÓN, MINISTERIO DE AMBIENTE, V.Y.D.T., DOMICILIARIOS, S.D.S.P., PLANEACIÓN, D. De y UNICEF, 2016. Los programas y proyectos municipales para el sector. *La Infancia, el Agua y el Saneamiento Básico en los Planes de Desarrollo Departamentales y Municipales* [en línea]. S.l.: s.n., pp. 57-163. Disponible en: http://www.procuraduria.gov.co/portal/media/file/descargas/publicaciones/parte4_agua.pdf.

REDACCIÓN NEGOCIOS, 2008. Colombia sólo trata 9% de sus aguas residuales. *El Espectador* [en línea]. 25 septiembre 2008. Disponible en:

<http://www.elespectador.com/impreso/negocios/articuloimpreso-colombia-solo-trata-9-de-sus-aguas-residuales>.

- ROCA FERNÁNDEZ, A.I., 2010. Elementos del suelo esenciales para las plantas. [en línea]. [Consulta: 21 febrero 2018]. Disponible en: http://www.infoagro.com/abonos/elementos_suelo_esenciales_plantas.htm.
- RODRÍGUEZ CHAPARRO, T. y OSPINA, I.M., 2005. Humedales artificiales de flujo vertical para mejorar la calidad del agua del río Bogotá. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 15, no. 34, pp. 74-84.
- SAINZ SASTRE, J.A., 2005. *Tecnologías para la sostenibilidad: Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales* [en línea]. Madrid: s.n. ISBN 848872358X. Disponible en: <https://books.google.com/books?id=r9aK7UttDU8C&pgis=1>.
- SÁNCHEZ SAN ROMÁN, J. (Dpto G.U.S., 2010. *Evapotranspiración* [en línea]. 2010. S.l.: s.n. Disponible en: <http://hidrologia.usal.es>.
- SANTOS PEREIRA, L., DE JUAN VALERO, J.A., PICORNELL BUENDÍA, M.R. y TARJUELO MARTÍN.BENITO, J.M., 2010. *El Riego Y Sus Tecnologías*. España: s.n. ISBN 9788469299791.
- SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PUBLICOS, 2013. *Informe Técnico Sobre Sistemas De Tratamiento De Aguas Residuales En Colombia*. Bogotá D.C.: s.n. ISBN 9789585820333.
- UNICEF, DNP, MINISTERIO DE AMBIENTE y PROCURADURIA GENERAL DE LA NACION, 2006. El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo. *La infancia, el agua y el saneamiento básico en los planes de desarrollo departamentales y municipales*. [en línea]. S.l.: s.n., pp. 31-56. Disponible en: <http://www.unicef.org.co/pdf/Agua3.pdf>.
- YU, K.L., SHOW, P.L., ONG, H.C., LING, T.C., CHI-WEI LAN, J., CHEN, W.-H. y CHANG, J.-S., 2017. Microalgae from wastewater treatment to biochar – Feedstock preparation and conversion technologies. *Energy Conversion and Management* [en línea], vol. 150, pp. 1-13. [Consulta: 12 octubre 2017]. ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2017.07.060. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417306957?via%3Dihub>.