

Descripción de las investigaciones sobre el uso de las plantas macrófitas en el manejo de aguas residuales domésticas. Revisión de la Literatura

**Daniela María David Ospina
Daniel Esteban Álvarez Úsuga
Juan Carlos Zamorra Velásquez**

**Trabajo de grado para optar al título de
Administrador en salud con énfasis en gestión sanitaria y ambiental**

**Asesor
Diana Catalina Rodríguez Loaiza
Magister y Doctora en Ingeniería**

**Universidad de Antioquia
Facultad Nacional de Salud Pública “Héctor Abad Gómez”
Medellín
2022**

Cita	David Daniela, Alvarez Daniel et Zamarra Juan (1)	
Referencia	(1)	David Daniela, Alvarez Daniel et Zamarra Juan. Descripción de las investigaciones sobre el uso de las plantas macrófitas en el manejo de aguas residuales domésticas. Revisión de la Literatura. [Trabajo de grado profesional]. Medellín, Colombia. Universidad de Antioquia; 2022.
Estilo Vancouver/ICMJE (2018)		



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro amor y agradecimiento a la Universidad de Antioquia, que nos abrió la puerta universal del conocimiento y durante el proceso formativo nos dio herramientas para buscar la transformación del mundo para dejarlo en mejores condiciones de las que lo conocimos. A la Facultad Nacional de salud pública y sus docentes que con cada paso de esta ventura nos brindó una mirada todos los matices que tienen problemáticas que afectan a la sociedad y que todo salubrista debe buscar mejorar. A nuestra asesora de trabajo de grado Diana Catalina Rodríguez Loaiza, quien con sus conocimientos y experiencia ayudo dar un norte visible y nos invitó a la reflexión durante el proceso; a nuestros compañeros de carrea que desde sus incógnitas, charlas, discusiones y debates aportaron a nuestro crecimiento como personas y profesionales. Finalmente, a nuestras familias que pusieron de su amor afecto comprensión y apoyo para que todos superáramos nuestras flaquezas y frustraciones durante el proceso.

Tabla de contenido

Agradecimientos	3
Resumen	9
Abstract	10
1. Introducción	11
2. Planteamiento del problema	15
3. Justificación	20
4. Objetivos	24
4.1. General	24
4.2. Específicos	24
5. Metodología	25
5.1 Fuentes y descriptores de búsqueda de información.	25
5.2 Criterios de inclusión	26
5.3 Criterios de exclusión	26
5.4 Plan de análisis	26
6. Marco teórico	28
6.1 ¿Qué son las aguas residuales?	28
6.2 ¿Que son las aguas residuales domesticas?	29
6.3 ¿Qué componen las aguas residuales domesticas?	29
6.4 ¿Cuáles son las principales características que tienen estás aguas?	31
6.5 ¿Qué parámetros se hallan en ellas?	31
6.5.1 Caracterización de un agua residual urbana	31
Características físicas	32
Características químicas	32
6.5.2 Características biológicas	32
6.6 ¿Qué tan contaminadas se encuentran estas aguas?	33
6.7 ¿Qué contaminantes que se encuentran en las aguas residuales domésticas?	33
6.8 Problemáticas con aguas residuales a nivel mundial, latinoamericano y del caribe y en Colombia	34
A nivel Mundial	34

En América latina y el caribe _____	35
En Colombia _____	36
6.9 Beneficio de tratar las aguas residuales _____	38
En el mundo _____	38
7. Normatividad _____	40
Análisis de tabla 1. _____	40
8. Las aguas residuales en el sector rural _____	43
8.1 Cómo es el tratamiento de aguas residuales rurales en Latinoamérica y Colombia. _____	43
Contexto colombiano _____	46
8.2 ¿De qué están compuestas las aguas residuales Rurales? _____	47
8.3 Principales tratamientos en las zonas rurales en el mundo, Latinoamérica y Colombia. _____	48
8.4 Diferencias entre los tipos de tratamiento en las zonas Rurales y Urbanas. _____	50
8.5 Normatividad de las aguas residuales para zonas rurales. _____	51
Latino América _____	51
9. Plantas macrófitas _____	56
9.1 Tipos de Plantas Macrófitas _____	56
Las macrófitas emergentes _____	56
Las macrófitas flotantes _____	56
Las macrófitas sumergidas _____	56
9.2 Humedales de flujo superficial (FWS) _____	64
9.3 Humedales de flujo subsuperficial (SSF) _____	65
10. Discusión _____	67
11. Aguas residuales en el territorio colombiano _____	76
11.1 Medellín, Antioquia. _____	76
Línea líquida _____	76
Tratamiento primario, Sedimentación primaria. _____	77
Aireación _____	77
Sedimentación secundaria _____	77
Línea de lodos _____	77

11.2 Guatapé, Antioquia. _____	78
11.3 Vereda la Clara Caldas, Antioquia. _____	78
11.4 El Salguero de Valledupar-Cesar. _____	80
Resultados. _____	81
11.5 México, Los Altos de Jalisco, México. _____	81
12. Conclusión _____	86
13. Referencias. _____	88

Tabla de tablas

Tabla 1.	Búsqueda de datos _____	27
Tabla 2.	Normatividad Latinoamericana _____	41
Tabla 3.	Normatividad Europea. _____	42
Tabla 4.	Tipos de tratamiento _____	45
Tabla 5.	Sistemas de tratamiento de aguas residuales rurales _____	49
Tabla 6.	Valores máximos permisibles de categorización de biosólidos para su uso. 55	
Tabla 7.	Tipos de plantas macrófitas _____	61
Tabla 8.	características físicas e hidráulicas de un Humedal. _____	66
Tabla 9.	PH. _____	83
Tabla 10.	Remoción DQO. _____	83
Tabla 11.	Remoción N. _____	84
Tabla 12.	Remoción P. _____	84
Tabla 13.	Remoción grasas y aceites _____	85

Tabla de gráficos

Gráfico 1. Documentos por año _____	71
Gráfico 2. Documentos por países latinoamericanos _____	72
Gráfico 3. Documentos por países _____	73
Gráfico 4. Documentos por área temática _____	74
Gráfico 5. Documentos de otras fuentes de búsqueda _____	75

Resumen

La disponibilidad de agua dulce apta para consumo humano y las actividades antrópicas se ve fuertemente afectada por la poca disponibilidad, eficiencia y eficacia a la hora de depurar y reutilizar las aguas residuales; problemática que se agrega al deterioro de las fuentes hídricas afectando directamente a comunidades, fauna, flora y disminuyendo cada vez más la disponibilidad del recurso hídrico.

La globalidad de esta carencia en implementación de tratamientos para las aguas residuales rurales, las aparentes coincidencias de pobreza, la falta de recursos para atender a estas comunidades y la responsabilidad de la humanidad de buscar la recuperación del ambiente afectado con la ayuda de sistemas que se convierten en motores importantes impulsores de investigación en métodos alternativos y asequibles para las comunidades. Las características sociales, económicas, políticas, climatológicas e incluso las geográficas son claves a la hora de limpiar la marca que dejamos en el medio ambiente con la presencia humana, con el uso indiscriminado y despreocupado de un ambiente que no tiene recursos infinitos, y por lo contrario necesita de un uso más amable y consiente de los recursos.

En estas páginas se encuentra la búsqueda de las investigaciones enfocadas a dar solución a esta problemática por medio de la implementación de humedales artificiales y plantas macrófitas alrededor del mundo; los resultados positivos y adversos de estas experiencias hacen parte de las alternativas viables para pequeñas comunidades por su “fácil implementación” y bajos costos. La experimentación con estos humedales y plantas macrófitas representa una enorme oportunidad para el ambiente, las comunidades rurales y alejadas de las urbes, e incluso para las especies nativas de fauna y flora; sin embargo, también representa un reto en cuanto los lineamientos que se deben seguir para evitar que la solución acarree más problemas que beneficios.

Palabras claves: Aguas residuales, plantas macrófitas, humedales

Abstract

The availability of freshwater suitable for human consumption and anthropogenic activities is strongly affected by the low availability, efficiency and effectiveness in the purification and reuse of wastewater; this problem adds to the deterioration of water sources directly affecting communities, fauna and flora and decreasing the availability of water resources.

The globality of this lack of implementation of rural wastewater treatment, the apparent coincidences of poverty, the lack of resources to serve these communities and the responsibility of humanity to seek the recovery of the affected environment with the help of systems that become important drivers of research into alternative and affordable methods for communities. The social, economic, political, climatological and even geographical characteristics are key when it comes to cleaning the mark we leave on the environment with the human presence, with the indiscriminate and careless use of an environment that does not have infinite resources, and on the contrary needs a kinder and more conscientious use of resources.

In these pages you will find a search for research focused on finding solutions to this problem through the implementation of artificial wetlands and macrophyte plants around the world; the positive and adverse results of these experiences are part of the viable alternatives for small communities due to their "easy implementation" and low costs. Experimentation with these wetlands and macrophyte plants represents an enormous opportunity for the environment, rural and remote communities, and even for native species of fauna and flora; however, it also represents a challenge in terms of the guidelines that should be followed to prevent the solution end causing more problems than benefits.

Key words: Wastewater, macrophyte plants, wetlands.

1. Introducción

El cambio climático está generando una mayor imprevisibilidad y variabilidad en la disponibilidad de agua dulce. Naciones Unidas estima que, para 2050, 1800 millones de personas vivirán en países o regiones con escasez absoluta de agua [1]. No obstante, en casi todos los grandes ríos de África, Asia y América Latina la calidad del agua se ha deteriorado a causa de la contaminación. Siguen faltando datos sobre las aguas residuales. Los informes sobre el Indicador 6.3.1 (ODS 6 Agua limpia y Saneamiento) acerca de la proporción de aguas residuales tratadas de manera adecuada, indica que el 59% del flujo de aguas residuales domésticas se recoge y se trata adecuadamente, pero esta información es soportada únicamente en los datos de 79 países, la mayoría de ellos con rentas medias o altas. Mientras se ha calculado que en los países con rentas bajas solamente el 8% de las aguas residuales industriales o municipales se somete a algún tipo de tratamiento. [2].

Tomó mucho tiempo para que se reconociera la fragilidad de los recursos hídricos en varias ciudades y para que se implementaran las medidas de protección en las cuencas de captación para asegurar una gestión sostenible de los recursos [3]. El acceso al saneamiento por lo general se toma en consideración mucho después que el acceso al agua potable, y como una necesidad para responder a la aparición de un grave problema de salud pública, una vez que haya surgido [3]. Podemos tomar en consideración que en las aguas residuales domésticas hay diversos contaminantes, estas contienen tanto nitrógeno como fósforo. Que es por mucho la fuente más abundante de desperdicios vertida en los océanos del planeta [4].

Frente al panorama mundial y respecto a los diferentes tratamientos de aguas residuales domésticas, se hace relevante explorar alternativas que puedan disminuir la presión en las plantas de tratamiento de aguas residuales, en lo concerniente a infraestructura, mano de obra y que permitan la posibilidad de llevar una opción más a aquellas comunidades en las que los tratamientos convencionales

no tienen alcance a causa de diferentes limitaciones, como los terrenos, la población dispersa entre otros.

Para el tratamiento de aguas residuales tenemos actualmente los sistemas de tratamiento convencionales y los acuáticos, el primero tiene como primer objetivo la remoción de material orgánico, biodegradable, sólidos suspendidos y bacterias patógenas. Mientras que los acuáticos permiten la remoción y purificación de aquellos efluentes contaminados por metales, nutrientes, materiales orgánicos y otros contaminantes [5].

Teniendo en cuenta las posibilidades que se ofrecen con los sistemas acuáticos, encontramos que las plantas flotantes tienen la propiedad de no promover la adsorción del metal al sustrato, pero sí, de almacenarlo en su biomasa (Marchand, Mench, Jacob y Otte, 2010); por otro lado, las macrófitas enraizadas (emergentes) son generalmente más influenciadas por los metales en los sedimentos que por del agua; por lo tanto, la bioacumulación es mayor cuando hay sedimentos contaminados por metales pesados (Bonanno y Lo Giudice, 2010) [6].

Encontramos además que plantas como el “Jacinto de agua” es eficaz según algunos autores, extrayendo nutrientes del agua y al multiplicarse absorbe los nutrientes sobrantes no deseados, y emite oxígeno que restaura la pureza del agua. Como un excelente indicador biológico cuando se seca (debido a la falta de fotosíntesis al no captar el oxígeno del agua cuando está demasiado contaminada) o presenta una coloración amarillenta por exceso de elementos como el Hidrógeno “Clorosis”. El “Jacinto de agua” actúa como purificador de agua al absorber metales pesados como plomo, mercurio y cadmio. (Ávila y Zarete, 2000) [7]

En esta revisión se pretendió abordar más ampliamente las tres categorías de plantas macrófitas usadas en los procesos de purificación: Las plantas flotantes que tienen su parte fotosintética justo sobre la superficie del agua con sus raíces extendidas bajo ella. La penetración de la luz solar en el agua es reducida y la

transferencia de gas entre agua y atmósfera es limitada. Las plantas emergentes que están enraizadas en el sustrato y tienen su parte fotosintética sobre la superficie de agua. Las plantas sumergidas, incluyendo algas, pueden ser suspendidas en el agua o enraizadas en el sustrato. Durante las horas de luz solar esta categoría de plantas oxigena el agua [5].

Las plantas acuáticas presentan un papel muy importante en la estructura y funcionamiento de los lagos someros, y constituyen, por tanto, un elemento clave en el diseño de estrategias de conservación y rehabilitación de estos ambientes. Para algunas formas de vida, como las plantas sumergidas, se conoce ampliamente su influencia en las propiedades fisicoquímicas del agua o en la estructura de otras comunidades bióticas [8]. Un buen conocimiento de las funciones de los macrófitos acuáticos en humedales y ecosistemas de lagos poco profundos es fundamental para comprender los procesos básicos de los ecosistemas. También es importante para numerosas cuestiones aplicadas, como la restauración de humedales, el tratamiento de aguas residuales y el manejo de especies invasoras [9].

El potencial de las aguas residuales urbanas es un recurso poco utilizado que se encuentra actualmente bajo estricta observación. La temperatura de las aguas residuales es un recurso inicial poco utilizado. La electricidad y el biometano producido por la cogeneración ofrecen nuevas oportunidades que permiten la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero [3]. No obstante, a esto alrededor de 380.000 millones de m³ de agua podrían recuperarse a partir de los volúmenes de aguas residuales que se producen anualmente. Se calcula que este tipo de reutilización del agua alcanzará los 470.000 millones de m³ en 2030 y los 574.000 millones de m³ en 2050 [2].

Con esta revisión de la literatura adicionalmente se buscó analizar, las oportunidades que las plantas macrófitas ofrecen a las comunidades en aspectos tanto sociales, ambientales y económicos, partiendo desde la revisión de las diferentes investigaciones que se han tenido en el mundo respecto a estas, y así

poder ampliar los conocimientos que ya se tienen sobre el tema. Los altos costos que van ligados al uso de otros sistemas de tratamiento para aquellos compuestos que no están contemplados en los sistemas convencionales, hacen de los sistemas acuáticos la mejor alternativa, teniendo en cuenta que estos permiten aprovechar recursos de energía solar y de flora especialmente abundantes [5]. No es ajeno que los retos que conlleva la depuración de aguas residuales tocan a todos y cada uno de los países, bien sean desarrollados o en vía de desarrollo; el reúso de aguas ya se lleva a cabo en algunas partes del mundo y las alternativas son tan diversas y efectivas como los tratamientos tradicionales. Este trabajo de investigación pretende recolectar experiencias documentadas que sirvan como acceso a la gran variedad de posibilidades que pueden proporcionar las plantas macrófitas en la depuración.

2. Planteamiento del problema

Las aguas residuales son cualquier tipo de agua cuya calidad se vio afectada negativamente por influencia antropogénica. Las aguas residuales incluyen las aguas usadas, domésticas, urbanas y los residuos líquidos industriales o mineros eliminados, y las aguas que se mezclaron con las anteriores (aguas pluviales o naturales) [10].

Esta afectación no discrimina y abarca a cualquier territorio poblado por seres humanos, en consecuencia, los servicios de saneamiento deficientes pueden tener un costo de miles de millones para algunos países. Este monto equivale anualmente a 6,3 % del PIB en Bangladesh; 6,4 % en India; 2,4% en Níger, 3,9% en Pakistán y 7,2 % en Camboya, los datos presentados corresponden a diversos años tomados por el banco mundial como una muestra de la problemática presentada. Las pérdidas económicas son impulsadas principalmente por las muertes prematuras, el costo de los tratamientos de salud, y el tiempo y la productividad que se pierden en la búsqueda de atención médica e instalaciones de saneamiento [11].

En consecuencia, la vulnerabilidad y la carencia se ven reflejada con mucha más crudeza en las naciones de bajos ingresos donde se trata un 8% de las aguas residuales domésticas e industriales, un porcentaje muy escaso si se compara con el 70% registrado en los países de ingresos altos. Debido a esto, en muchas regiones del mundo se vierten aguas residuales contaminadas por bacterias, nitratos, fosfatos y disolventes en lagos y ríos que van a parar al mar [12].

Observando más de cerca el caso de América Latina, el tratamiento de aguas residuales se ha llegado casi a duplicar desde finales del decenio de 1990, sin embargo, se estima que entre un 70% y un 80% de las aguas negras se vierten sin ser tratadas [12]. Estas cifras representan grandes implicaciones para la salud pública, la sostenibilidad ambiental y la equidad social. Se dice que para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible en saneamiento sería necesario una

inversión que se calcula entre \$3.4 y \$11.8 mil millones de dólares al año durante el período 2016–2030, de los cuales aproximadamente 95% se dedicaría a áreas urbanas, Esto excluyendo a Chile y Uruguay [13].

La línea de tiempo que demarca una serie de avances significativos de Colombia en tratamiento de aguas residuales ha sido constante y progresiva; según el CONPES 2767, Plan de Aguas 1995-1998, en Colombia, la prestación de servicios públicos básicos aumentó significativamente entre 1985 y 1993, pasando del 58% al 76% en acueducto y del 47% al 64% en alcantarillado [14]. Sin embargo, a finales de 1993 con la ley 99 del mismo año y la ley 142 de 1994, posterior a la promulgación de la constitución de 1991, la cual promueve cambios significativos de cobertura de zonas normalmente desatendidas por las diferentes entidades gubernamentales, lo que estimó una carencia en 8.7 millones de habitantes no contaban con servicio de acueducto y cerca de 13.4 millones de habitantes carecían de alcantarillado [14].

El aumento en registrado por el DANE en cobertura rural de alcantarillado en el periodo comprendido desde 1993 hasta el 2003 presento un aumento significativo de un 16% según el documento Informe nacional de coberturas de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo – 2020 desarrollado por Carolina Domínguez Torres Eduardo Uribe Botero con el apoyo del CEDE de la universidad de los Andes. [15].

La situación más crítica se presentó en la zona rural, donde, sin incluir sistemas no convencionales, la cobertura de acueducto se estimó en 44% y la de alcantarillado en 19% [14]. Según el Ministerio de vivienda y desarrollo territorial la línea base del porcentaje de hogares rurales con acceso a soluciones adecuadas para el manejo de aguas residuales es del 10%, mientras que la meta prevista para este periodo de tiempo es del 12% y tener al final del periodo 2018-2022 al 22% de la población rural cubierta con una solución adecuada para el manejo de aguas residuales [16]. Mientras que la Superintendencia de servicios públicos en su informe sectorial habla

de una cobertura rural del 16% para el año 2020, Debe considerarse que los datos que se presentan tienen en cuenta únicamente aquellos municipios que hayan certificado en el SUI el reporte de Estratificación y Coberturas (REC). Además, los datos de coberturas por sistemas convencionales no incluyen para el caso de acueducto, modalidades de abastecimiento como pozos, y para alcantarillado, el pozo séptico, la letrina ni otras soluciones en ambos servicios [17].

Así mismo el informe de la CRA en 2019 nos revela a través de un diagnóstico de metodología de análisis normativo en donde se encontró que: el 51% de las 1.102 entidades territoriales descargan sus aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento a las fuentes hídricas; lo que indica una necesidad desatendida y afectada por fenómenos como el crecimiento demográfico acelerado [18].

Sin embargo, el DNP (2019), en el marco de la propuesta de “*Política Nacional para la Gestión de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento en el largo plazo bajo el Enfoque de Economía Circular*”, presenta un diagnóstico sobre el porcentaje de tratamiento de aguas residuales en Colombia, identificando que sólo el 42,6% de las aguas producidas en 2017 fueron tratadas, Adicionalmente, señala que 10 ciudades de más de 300.000 habitantes cuentan con STAR (Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales) [19].

Teniendo en cuenta lo anterior podemos indicar que, en el país las aguas residuales son un tema en la cual se está trabajando con firmeza, pero, aun así, los vertimientos de aguas residuales provenientes del sector agrícola son las que más aportan contaminantes y material orgánico. A este tipo de descargas les siguen las realizadas por los mayores centros urbanos como Bogotá, Cali, Medellín, Cartagena y Barranquilla, entre otros, y las descargas realizadas por el sector industrial, entre las que se destacan los productores de alimentos y de licores [20].

Entre los resultados más recientes se puede observar que en el Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2020, desarrollado

por el DNP, la súper intendencia de servicios públicos y la presidencia de la república; el avance de suscriptores sigue en aumento paso de 9.774.363 en el año 2018 a 10.060.653 en 2020 representando un aumento de 2.84% en un periodo de 3 años. Con la implementación del COMPES 4004 DE SEPTIEMBRE DE 2020 que plantea los lineamientos de la “Economía Circular en la gestión de los servicios de agua potable y manejo de aguas residuales” con la finalidad de sentar líneas de acción en la protección del recurso hídrico, el aumento de tratamiento de aguas residuales, su reusó y la instauración de una conciencia ciudadana entorno al cuidado de esta [21].

Sin embargo, según el Estudio Nacional del Agua ENA 2018, publicado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, el sector de agua potable y saneamiento básico demanda cerca de 2,7 mil millones de metros cúbicos, concentrando los mayores requerimientos en las grandes ciudades (año base 2016), frente a sectores como el agrícola, con una demanda de 16,0 mil millones, sector hidroeléctrico con 9,0 mil millones y sector industria con 1,1 mil millones de metros cúbicos al año [20].

Pese a los esfuerzos en Colombia los impactos al medio ambiente y a la salud no cesan. Según datos de UNICEF, para 2017 las enfermedades diarreicas representaron el 8% de las muertes de los niños a nivel mundial (525.000 fallecimientos) y el 2% de muertes en Colombia; datos de la Universidad John Hopkins en su informe de 2020, indican que la neumonía y la diarrea son las dos principales causas de mortalidad infantil, al día mueren alrededor de 1.200 niños por diarrea. [22].

Con forme a lo anterior, las aguas residuales no deberían ser vistas como una carga para los gobiernos y la sociedad, sino como una oportunidad económica que puede convertirse en un recurso valioso. Una mejor gestión de las aguas residuales ofrece una propuesta de doble valor: además de los beneficios ambientales y para la salud que ofrece el tratamiento de las aguas residuales, es posible lograr flujos financieros

que cubran parcial o totalmente los costos de operación y mantenimiento (O&M) [13].

Entre tanto los costos económicos y de salud de la población por falta de tratamiento de aguas residuales es una problemática que si bien tiene mucha atención, actualmente representa un reto debido a que los medios convencionales para tratar las aguas residuales son bastante costosos, mediante una investigación inicial podemos ver la necesidad de tecnologías eficientes y más económicas, sabemos que las plantas tienen múltiples usos en las sociedades, por lo cual cabe resaltar que las plantas macrófitas pueden ser un recurso con el cual se obtengan resultados aún más favorables, ya hay varios países que implementan este tipo de tratamientos y sus resultados han sido favorecedores, como México y Colombia en donde se han realizado estudios que evalúan la remoción de diferentes sustancias entre ellas metales pesados, materia orgánica y diferentes contaminantes obteniendo resultados satisfactorios.

3. Justificación

Frente al panorama mundial y respecto a los diferentes tratamientos de aguas residuales domésticas, se hace relevante explorar nuevas alternativas tecnológicas de tratamiento que sean de bajo costo, de requerimientos sencillos y de fácil operación. Además, que sean acordes a las necesidades, resaltando la relevancia en los sectores periurbanos y rurales, en donde se encuentran principalmente los puntos de descargas de agua residuales domésticas sin tratamiento, lo que conlleva a un deterioro en aumento de las aguas y su entorno [10]. Los métodos físicos, químicos, biológicos y combinados son los más populares entre las empresas prestadoras de este servicio, pero exigen de una inversión en infraestructura y logística que no siempre se puede aplicar en todos los territorios, comunidades y presupuestos. Por otro lado, hay otros tipos de sistemas de depuración de aguas residuales que son de bajo costo en operación y mantenimiento, no necesita profesionales calificados, pese a ello estos carecen de popularidad dado que los procesos de depuración demandan de una extensión de terreno mayor [9].

Un buen conocimiento de las funciones de los macrófitos acuáticos en humedales y ecosistemas de lagos poco profundos es fundamental para comprender los procesos básicos de los ecosistemas. También es importante para numerosas cuestiones aplicadas, como la restauración de humedales, el tratamiento de aguas residuales y el manejo de especies invasoras [9].

La principal ventaja que ofrecen las plantas macrófitas es la depuración de algunos contaminantes presentes en el agua, esto depende de la planta que se utilice ya que la extracción puede ir desde metales pesados a la depuración de materia orgánica. Las plantas macrófitas tiene un nivel de actividad directamente relacionado con la cantidad de luz solar que reciben durante el día; esta puede variar considerablemente según la ubicación geográfica, los fenómenos climáticos y las condiciones meteorológicas propias de cada mes del año [23].

Estas plantas usan la energía solar para realizar dicho procedimiento, el cual puede ser más rápido en lugares más cálidos, debido a esto el lugar en el cual se realice el humedal artificial deberá contar con una inclinación la cual garantice un flujo laminar constante que permita la entrada y salida de las aguas a tratar y tratadas respectivamente. La eficiencia de los humedales artificiales está sujeta a diferentes factores que complementan el proceso de depuración; entre los más destacados está el uso de lechos filtrantes con presencia de carbono, gravilla de cm o gravilla de 0,5 cm y arena fina o arenilla, en algunas ocasiones plástico agro fil como impermeabilizante, piedra manzana y tubos PVC (desagüe) y una cámara séptica [24]. También se debe tener en cuenta que el tiempo de retención puede ser mínimo de 24 horas hasta 15 días ya que entre mayor sea la cantidad de tiempo mayor será la remoción de materia orgánica [25].

Por esta razón, se encontró una creciente necesidad de innovaciones en materia de tratamiento de agua, que sean de fácil acceso y sustentables económicamente, no es necesidad solo de países en vías de desarrollo, también de aquellos más desarrollados, como ejemplo tenemos a Canadá, quién se ha topado de frente con la problemática en sus comunidades indígenas, según estudios realizados la mortalidad en estos grupos poblacionales [12]. Entre está, otras razones por las cuales este país decidió adoptar políticas públicas. Las regulaciones responden a un compromiso federal asumido bajo la Estrategia Pancanadiense para la Gestión de Efluentes de Aguas Residuales Municipales (CCME) de 2009 del Consejo Canadiense de ministros de Medio Ambiente (CCME) de establecer límites nacionales de referencia de calidad de efluentes con el fin de enfrentar la problemática en la que se ha visto afectado por la precaria calidad del agua. [26]

Es a causa de esto que el acceso al agua potable y el saneamiento son derechos humanos reconocidos internacionalmente, derivados del derecho a un nivel de vida adecuado en virtud del Artículo 11 del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales. El 28 de julio de 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas (ONU) adoptó una resolución histórica que reconoce “que el derecho al agua

potable y el saneamiento es un derecho humano esencial para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos”. Además, desde 2015, la Asamblea General y el Consejo de Derechos Humanos han reconocido tanto el derecho al agua potable como el derecho al saneamiento como derechos humanos estrechamente relacionados pero distintos [27].

No es casualidad que se hable de las características fisicoquímicas del agua para el consumo humano, e incluso para su uso en procesos; como, por ejemplo, el riego de plantaciones en la agricultura según el marco de los derechos humanos, esta debe ser segura y libre de microorganismos, sustancias químicas y riesgos radiológicos que puedan constituirse como un riesgo para la salud humana [25].

Esto se tomó como un punto importante a tratar en la agenda para las naciones unidas para el 2030, se puede resaltar que en el país se han integrado diferentes políticas públicas con el fin de realizar adelantos en el tema, a causa de esto se ha visto como una oportunidad el uso de plantas macrófitas para el tratamiento de aguas residuales domésticas, puesto que según diferentes investigaciones internacionales, dichas plantas ofrecen oportunidades de depuración a menores costos, no podría decirse que es un tema completamente desconocido porque en la actualidad se ha venido implementando como parte del tratamiento pero no se conoce bastante al respecto por lo que llegamos a la conclusión es que es no solo importante sino a su vez una excelente oportunidad para mejorar la calidad de vida de diferentes poblaciones [25].

En Colombia se han realizado fortalecimientos de acciones realizadas por las entidades territoriales para el manejo de aguas residuales, principalmente en áreas rurales nucleadas y dispersas entre las metas de la política CONPES 3810 de 2014 [28]. El gobierno nacional propuso un estimado de 2.541.000 nuevas personas beneficiadas con el manejo de aguas residuales, para lo cual se destinó un presupuesto de financiación para los años 2014-2024 de \$7.6 billones por lo que se considera pertinente abordar una monografía que mire de una manera más

profunda a una tecnología que pueda dar una alternativa idónea para el tratamiento de aguas residuales domésticas [28].

Finalmente con esta revisión monográfica pretendemos mostrar como una alternativa adicional, el uso de plantas macrófitas mediante la implementación de microbiomas de humedales artificiales como actores en la remoción y depuración de además de carga orgánica, diferentes elementos presentes en las aguas residuales domésticas, si bien, la literatura puede argumentar a su vez su capacidad de remoción de algunos metales pesados, queremos llevar la mirada del lector a su implementación para características “menos complejas”. Esperamos también que la alternativa represente una oportunidad de disminuir brechas socioeconómicas y una mejora en las condiciones higiénico-sanitarias de aquellas poblaciones que no disponen aún de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

4. Objetivos

4.1. General

- Presentar la información sobre las investigaciones que se han realizado con relación al uso de plantas macrófitas en el manejo de aguas residuales domésticas a nivel mundial.

4.2. Específicos

- Describir los tipos de estudio utilizados en diferentes lugares del mundo en los cuales se lleva a cabo el proceso de tratamiento de aguas residuales con plantas macrófitas
- Analizar las metodologías utilizadas en las investigaciones que se han realizado con relación al tratamiento de aguas residuales domésticas y el uso de plantas macrófitas.
- Mencionar los hallazgos de las investigaciones con plantas macrófitas llevadas a cabo alrededor del mundo.

5. Metodología

Existen diferentes tipos de revisiones bibliográficas y de literatura, entre ellas la revisión Panorámica, su objeto principal es identificar conceptos claves que sustentan áreas de investigación, fuentes y evidencias disponibles. Esta metodología permite a los autores identificar vacíos de información sobre un tema.

Por lo anterior, se concluye que el presente trabajo académico está categorizado como una revisión bibliográfica sistemática, basada en una pregunta de investigación ¿Cómo han sido las investigaciones sobre el uso de las plantas macrófitas en el manejo de aguas residuales domésticas, según la bibliografía encontrada?

5.1 Fuentes y descriptores de búsqueda de información.

Para la monografía se utilizaron varias bases de datos de literatura científica con acceso a través del portal de la universidad de Antioquia (Redalyc, DOAJ, Dialnet). Además, se buscaron investigaciones de libre acceso en la plataforma Google académico y literatura gris de pre y posgrados, informes de investigación y documentos de sociedades científicas.

Para esto se utilizaron unos descriptores de búsqueda en las bases de datos bibliográficas: Aguas residuales, aguas residuales domésticas, tratamiento de aguas residuales, macrófitas, humedales construidos, aguas de alcantarillado, efluentes domésticos. Los tesauros utilizados fue el de descriptores en ciencias de la salud.

Por otro lado, se utilizó la base de datos bibliográfica Scopus en donde se llevó a cabo una búsqueda de datos relevantes sobre la cantidad de investigaciones a nivel mundial y desde que tiempo se empezó a investigar, cuáles son los países más relevantes y como está situado Colombia y se utilizaron las mismas palabras claves descritas anteriormente.

La búsqueda se realizó en los idiomas de español, inglés y portugués, no se aplicaron filtros de años en las investigaciones con el fin de abarcar toda la información posible.

5.2 Criterios de inclusión

- Bibliografía relacionada con el tratamiento de aguas residuales domésticas con plantas macrófitas.
- Investigaciones en donde se utilicen o implementen plantas macrófitas para el tratamiento de aguas residuales urbanas o rurales.
- Artículos e investigaciones en los idiomas, inglés, español y portugués

5.3 Criterios de exclusión

- Guías y normas técnicas sobre tratamiento de aguas residuales
- Artículos que no sean originales (cartas al editor)

5.4 Plan de análisis

Se realizó la búsqueda respectiva y especificada de todos los puntos anteriores y se seleccionaron los documentos y se sustrajo la bibliografía necesaria según los criterios de inclusión y de exclusión descritos. Se realizó una matriz con toda la literatura encontrada en donde se especifique: código del artículo (numeración asignada al texto para efectos de organización de la bibliografía), título, Artículo/investigación, autores, año de publicación, sitio de estudio, tipo de documento, resumen y datos relevantes.

Una vez los textos que se incluyeron en la revisión se seleccionaron se procedió a la redacción del informe final sintetizando hallazgos, comparando técnicas empleadas, resultados y puntos de vista, detallando conclusiones y

recomendaciones; además, se identificaron aquellos puntos en los cuales la información es mínima, y así lograr el cumplimiento satisfactorio de los objetivos propuestos.

Se utilizó el software Microsoft Excel para el análisis de la información en hojas de cálculo y Microsoft Word para la redacción del informe.

Se realizó una búsqueda exhaustiva por los motores de búsqueda descritos anteriormente y se obtuvo la siguiente información.

Tabla 1. Búsqueda de datos

Palabra clave	Motor de búsqueda			
	Redalyc	Doaj	Dialnet	Google Académico
Aguas residuales	1.312.58	941	5.816	121.000
Aguas residuales domésticas	1.593.77	4	333	24.200
Macrófitas	430	422	393	23.900
Humedales construidos	188.122	31	154	22.600

Tabla 1. La cantidad de información que se encontró en las bases de datos es muy amplia y variada, por lo cual solo se escogieron los más propicios para la monografía

6. Marco teórico

6.1 ¿Qué son las aguas residuales?

Existe una estadística frecuentemente citada de que las aguas residuales están compuestas aproximadamente en un 99% de agua y en un 1% de sólidos en suspensión, coloidales y disueltos. Aunque la composición exacta de las aguas residuales varía, obviamente, según las diferentes fuentes y a lo largo del tiempo [10]. El agua utilizada retorna a las fuentes hídricas como agua residual sin tratar en la mayoría de los casos, generando contaminación y disminuyendo la calidad de vida de las comunidades [30].

La degradación de la calidad del agua se traduce directamente en problemas medioambientales, sociales y económicos. La disponibilidad de los escasos recursos hídricos del mundo está cada vez más limitada debido al aumento de la contaminación de los recursos de agua dulce provocada por el vertido de grandes cantidades de aguas residuales insuficientemente tratadas o sin ningún tratamiento a ríos, lagos, acuíferos y aguas costeras. Además, los nuevos contaminantes emergentes, como los productos de cuidado personal y los fármacos, los pesticidas o los productos químicos industriales y domésticos, y el cambio de los patrones climáticos, constituyen un nuevo desafío para la calidad del agua con efectos a largo plazo aún desconocidos para la salud humana y los ecosistemas [29].

En 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció que el acceso al agua potable salubre y limpia y al saneamiento es un derecho humano [31].

6.2 ¿Que son las aguas residuales domesticas?

Se consideran como una combinación de uno o más de los siguientes: efluentes domésticos que consisten en aguas negras (excremento, orina y lodos fecales) y aguas grises (aguas servidas de lavado y baño); agua de establecimientos comerciales e instituciones, incluidos hospitales; efluentes industriales, aguas pluviales y otras esorrentías urbanas. [12].

Por su naturaleza son las más graves por la gran variedad de contaminantes que genera. Aquí se encuentran los fenoles, cianuros, cromo y detergentes [32].

6.3 ¿Qué componen las aguas residuales domesticas?

El agua residual contiene 1.3 MJ/persona/día (6.5 KJ/KL) de energía química [33]. Esto representa el 1% del consumo de energía global actual, o el 4% de la producción eléctrica mundial [33], y requiere un proceso para convertirla de energía química diluida a una forma utilizable. Sin embargo, representa una fuente de carbono concentrada que se puede emplear mejor directamente como recurso [34]

Cerca del 75% de los sólidos en suspensión y del 40% de los sólidos filtrables de un agua residual de concentración media son de naturaleza orgánica [32].

Globalmente, aproximadamente el 20% del nitrógeno y el fósforo “manufacturados” está presente en las aguas residuales domésticas [35].

Estás aguas están compuestas por:

Nutrientes, La cantidad de nutrientes disponibles en el agua residual es muy elevada [36].

- Fósforo, se estima que en torno al 20% del fósforo mineral consumido es excretado por los humanos [36].

- Potasio, en residuos específicos tales como los derivados de la caña de azúcar, el desgranado, las levaduras y el estiércol, y en el procesado de productos animales alimentados con cereales y legumbres [35].
- Nitrógeno, Ciertas formas de nitrógeno en el agua establecen riesgos para el hombre por su ingesta o por contacto directo con compuestos como toxinas, liberadas por floraciones de cianobacterias en ambientes eutrofizados [37].

6.4 ¿Cuáles son las principales características que tienen estas aguas?

Los recursos de agua dulce mundiales están cada vez más contaminados con residuos orgánicos, patógenos, fertilizantes y pesticidas, metales pesados y contaminantes emergentes [36]. La eutrofización es un fenómeno generalizado a nivel mundial debido a la liberación de enriquecedores de nutrientes artificial en aguas superficiales, como resultado de la gestión ineficaz de las aguas residuales y la escorrentía agrícola. La contaminación patógena es el problema más extendido de la calidad del agua en los países en desarrollo, debido al agua insegura y al saneamiento [37].

6.5 ¿Qué parámetros se hallan en ellas?

6.5.1 Caracterización de un agua residual urbana

El nitrógeno total (N) presente en el ARU hace parte esencial en los procesos biológicos ya que actúa como nutriente encontrándose en diferentes formas (N orgánico, NH_4^+ , NO_3^- y NO_2^-) y permitiendo que se lleven a cabo los procesos metabólicos. Se encuentra en su gran mayoría en forma de amonio (NH_4^+) y nitrógeno orgánico en proporciones de un 60 y 40% respectivamente, mientras que las formas nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-) es inferior al 1%. El NH_4^+ proviene principalmente de las heces humanas (urea y aminoácidos), mientras que las formas oxidadas NO_2^- y NO_3^- que son minoritarias provienen de actividades industriales y de la oxidación del amonio [38].

El fósforo presente en aguas residuales proviene en su mayoría de la materia fecal (50%), vertidos alimenticios y de los compuestos de fosfato inorgánico presente en los detergentes y productos de limpieza (30- 35%) [38].

Características físicas

Sólidos suspendidos, residuos domésticos e industriales, temperatura, color, agua residual en descomposición [39].

Características químicas

Orgánicas: son proteínas, carbohidratos, grasas y aceites, tensoactivos, fenoles, pesticidas y se encuentran en: residuos industriales, comerciales, domésticos y residuos agrícolas. [4] La materia orgánica requiere oxígeno para ser degradada en un curso de agua. El alto contenido orgánico favorece el crecimiento de bacterias y hongos [40].

A finales de la centuria 19, Dupré encontró que existía una relación entre la concentración del oxígeno disuelto en el agua (OD) y su grado de contaminación. A mayor cantidad de materia orgánica contenida en una muestra de agua, más cantidad de oxígeno necesitan los microorganismos para oxidarla o degradarla [32].

Inorgánicas: la degradación biológica de sustancias orgánicas produce ácidos grasos, carbohidratos, aminoácidos e hidrocarburos; y las sustancias inorgánicas en el caso de metales tóxicos, de material particulado como arcillas y sedimentos; y de microorganismos como bacterias y protozoos [40].

PH, Cloruros, Alcalinidad, Nitrógeno, Fósforo, Azufre, Tóxicos, Metales pesados, presente en: Residuos industriales, Suministro de agua doméstica, residuos domésticos e infiltraciones de aguas subterráneas y Residuos agrícolas [32].

Gases: oxígeno Sulfuro de hidrógeno (H₂S) Metano (CH₄) presente en: Suministro de agua doméstica e infiltraciones de aguas superficiales. Descomposición anaerobia del agua residual [39].

6.5.2 Características biológicas

Protistas los encontramos en los residuos domésticos, los virus en residuos domésticos, las plantas en aguas superficiales y plantas de tratamiento y los animales en aguas superficiales y plantas de tratamiento [39].

6.6 ¿Qué tan contaminadas se encuentran estas aguas?

Hoy en día el nitrógeno se ha transformado en uno de los principales elementos contaminantes de los cuerpos de agua, causando consecuencias como la eutrofización de ríos, lagos y costas. En los ambientes acuáticos, el nitrógeno puede ser encontrado en forma de amonio N-N [H.sub.4.sup. +], Nitritos N-N [O.sub.2.sup. -] o nitratos N-N [O.sub.3.sup. -] [39].

6.7 ¿Qué contaminantes que se encuentran en las aguas residuales domésticas?

Cerca del 75% de los sólidos en suspensión y del 40% de los sólidos filtrables de un agua residual de concentración media son de naturaleza orgánica [32].

Los principales contaminantes que contienen son gérmenes patógenos, materia orgánica, sólidos, detergentes, nitrógeno y fósforo [41].

Materia Orgánica. La materia orgánica está compuesta en un 90% por carbohidratos, proteínas, grasas y aceites provenientes de excrementos y orina de seres humanos, restos de alimentos y detergentes. Estos contaminantes son biodegradables, es decir, pueden ser transformados en compuestos más simples por la acción de microorganismos naturales presentes en el agua, cuyo desarrollo se ve favorecido por las condiciones de temperatura y nutrientes de las aguas residuales domésticas [41].

A mayor cantidad de materia orgánica contenida en una muestra de agua, más cantidad de oxígeno necesitan los microorganismos para oxidarla o degradarla. [40].

Recientemente se está prestando interés a la gran diversidad de moléculas orgánicas sintéticas que están apareciendo en la composición de las aguas residuales: agentes tensoactivos, fenoles y pesticidas [42].

También se encuentran contaminantes emergentes, cuentan los fármacos, los productos de cuidado personal, los pesticidas, los productos químicos industriales y domésticos, los metales, los tensoactivos, los aditivos y los disolventes industriales que no son generalmente monitoreados y pueden tener un efecto nocivo sobre la salud humana y medioambiental. Se sabe o se sospecha que muchos de estos contaminantes alteran el sistema endocrino con efectos adversos sanitarios y ecológicos. Los conocimientos científicos y el entendimiento sobre sus efectos, el destino final y la acumulación aún son limitados, así como las iniciativas para monitorear y regular los contaminantes emergentes en los recursos hídricos y las aguas residuales. Los contaminantes emergentes no son solo un gran reto para los países en desarrollo, sino que también constituyen una preocupación para los países desarrollados, porque las instalaciones convencionales de depuración del agua y tratamiento de aguas residuales no pueden eliminar la mayoría de estos contaminantes, ni siquiera en países que cuentan con un elevado índice de recolección y tratamiento de aguas residuales [26].

6.8 Problemáticas con aguas residuales a nivel mundial, latinoamericano y del caribe y en Colombia

A nivel Mundial

El agua no tratada es una importante fuente de gases de efecto invernadero. Puesto que más del 80% del agua residual (global) se vierte en el medioambiente sin ser tratada (WWAP, 2017), tratar su materia orgánica antes de verterla podría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero [43]. Hoy muchos países ya piensan y actúan en el reúso de agua, sin embargo, en Europa, sólo el 2% de las aguas residuales tratadas se reutiliza [44].

En áreas como Iddo, Makoko, Ajegunle (Lagos, Nigeria) y otros. La contaminación fecal del sistema hídrico y el ambiente de la megaciudad a causa de la gestión

deficiente de las aguas residuales constituye un problema sanitario de magnitud [12].

Uno de los principales problemas en relación con las aguas residuales en África es la falta generalizada de infraestructura para recolección y tratamiento [12]. Las aguas residuales no tratadas son una fuente importante de GEI. Dado que, en los países en desarrollo, entre el 80 y 90 % de las aguas residuales no se recogen ni se tratan [45, 46].

Las consecuencias son inquietantes. La contaminación del agua en la mayoría de los ríos de África, Asia y América Latina es cada vez peor. Se estima que cada año aproximadamente 829.000 personas mueren de diarrea por haber bebido agua potable no segura o por falta de saneamiento o higiene en las manos. Estas causas representan el 60% de todas las muertes por diarrea del mundo e incluyen cerca de 300.000 niños menores de cinco años, el 5,3% de todas las muertes de este grupo de edades [2]

En América latina y el caribe

Las cifras en América Latina y el Caribe, denotan una marcada carencia en el manejo de aguas residuales puesto que tan solo alrededor del 60% de la población está conectada a un sistema de alcantarillado y sólo un 30% a 40% de las aguas residuales de la región que se captan se tratan [12].

Esa es una realidad cada vez más cierta para Latinoamérica donde tres cuartas partes de las aguas fecales o residuales vuelven a los ríos y otras fuentes hídricas, creando un serio problema de salud pública y para el medio ambiente, según advierten expertos del Banco Mundial según lo publicado año 2017 [47].

En Bolivia, se estima que solo el 27 % de las aguas residuales son tratadas (Programa de Agua y Saneamiento, 2016). De hecho, en las ciudades con más de 10.000 habitantes, la tasa de tratamiento de aguas residuales es de solo 39 % [48].

En algunas regiones de México los niveles de cobertura de tratamiento de aguas residuales apenas alcanzan el 10%. [42]. La producción de aguas residuales en el Valle de México asciende a 1,255.8 millones de metros cúbicos al año. La capacidad instalada de tratamiento de aguas urbanas es de 8,655 l/s y solamente se procesan 4,353 l/s [49].

En Colombia

Para el país la implementación de diferentes iniciativas para el tratamiento de aguas residuales se ha vuelto importante con el fin de llegar a cumplir la agenda de los ODS para 2030. Específicamente el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 que se refiere a lograr garantizar para 2030 la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos. A su vez, el presente Plan está alineado con el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022] [50].

En el marco del PAP-PDA28 (Programa agua para la prosperidad y planes departamentales de agua) se ha avanzado en la estructuración de planes ambientales para la formulación de proyectos que incluyen la conservación de cuencas y microcuencas abastecedoras, saneamiento básico y la gestión del riesgo de desastres, aunando esfuerzos de las entidades territoriales, prestadores de los servicios y Corporaciones Autónomas Regionales [50].

Teniendo en cuenta lo anterior se han identificado las problemáticas más relevantes en el suministro de agua potable y saneamiento básico están relacionadas con:

- a) Bajos niveles de articulación a nivel nacional, regional y local.
- b) La normatividad orientada a los servicios en el área urbana sin tener en cuenta las particularidades de la zona rural [50].
- c) Inexistente planeación, baja capacidad institucional y baja destinación de recursos, y asistencia técnica deficiente para los prestadores rurales [50].
- d) Alta atomización de prestadores y altos índices de informalidad de estos [50].

- e) Debilidad en la gestión de aspectos ambientales que dificultan el suministro de agua potable y saneamiento básico [50].
- f) Falta de aplicación de incentivos para la protección y manejo de cuencas. Aunque existen incentivos para la protección y manejo de cuencas (Decreto 953 de 2013, Decreto 1900 de 2006, entre otros) [50].
- g) Formalización de concesiones de agua y permisos ambientales. Los operadores de servicios en el área rural, en su mayoría, no cuentan con concesiones de agua o permisos de vertimiento [50].
- h) Conflictos en el uso de la infraestructura. Existen sistemas concebidos inicialmente para riego o para actividades, tales como, ganadería, el beneficio de café o cultivos de palma, que de manera complementaria se utilizan para consumo humano [50].

Según el último informe anual de avance en la implementación de los ODS en Colombia presentado para el año 2020, respecto al porcentaje de aguas residuales urbanas domésticas tratadas de manera segura en el país la meta buscaba un alcance del 41% y para el último año revisado (2018) se evidenció un progreso del 42,9%, pese a esto los datos en el sector rural son imprecisos [51].

Además, el porcentaje de la población con acceso a métodos de saneamiento adecuados estuvo en el país para el año 2018-2019 en 67,4%. Finalmente se haya en los resultados del informe que el 64,5 % de los indicadores de seguimiento a la implementación de los ODS en Colombia registran un efecto negativo, ya sea directo o indirecto. Por su parte, únicamente el 11,1 % de los indicadores tienen asociado algún tipo de efecto positivo encontrándose entre ellos el acceso a agua potable y saneamiento básico [51].

6.9 Beneficio de tratar las aguas residuales

En el mundo

La búsqueda de modelos que resulten favorables a las diferentes circunstancias en los campos tanto económicos como ambientales ha llevado a diversas instituciones y gobiernos a centrar su atención en la economía circular, la cual es un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido. [52] “Una de las principales ventajas de adoptar los principios de la economía circular para la gestión de las aguas residuales es que la recuperación y reutilización de recursos podría transformar los servicios de saneamiento, que pasarían de ser costosos a autosustentables y que le agregarían valor a la economía. Esto ayudaría a los países a superar los problemas de financiamiento que existen en el ámbito del saneamiento y a poder alcanzar así los Objetivos de Desarrollo Sostenible” Diego Juan Rodríguez, autor del informe y especialista sénior en gestión de recursos hídricos del Banco Mundial [52].

Las inversiones en agua potable y saneamiento contribuyen al crecimiento económico. Según cálculos de Guy Hutton y Laurence Haller en el estudio *“Evaluation of the Costs and Benefits of Water and Sanitation Improvements at the Global Level, Ginebra 2004 Water, Sanitation and Health Protection of the Human Environment World Health Organization”*, por cada \$1 USD invertido se recuperan entre \$5 y \$28 USD, dependiendo de la región y la tecnología teniendo en cuenta lo indicado en el tercer informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. [52].

En Latinoamérica

Son muchos los beneficios para la salud, socioeconómicos y ambientales que se derivan de proyectos de reutilización seguros y controlados, por ejemplo, la recuperación de tierras áridas para la agricultura, la creación de empleos y

oportunidades de nuevos asentamientos humanos, el aumento de la productividad agrícola, que puede ayudar a superar las deficiencias proteínicas y a mejorar la nutrición, la posibilidad de crear un mayor número de centros y oportunidades recreativos mediante el establecimiento de parques y áreas verdes, y la obtención de una alternativa viable para formas convencionales de eliminación de aguas residuales y los problemas de contaminación relacionados con las mismas [53].

El alto índice de urbanización e industrialización de América Latina y el Caribe ha acrecentado los graves problemas de eliminación de aguas residuales que aquejan a la región. Para resolver dichos problemas se necesitan programas adecuados para el control de la contaminación, programas basados en una sólida base legal y respaldada por una infraestructura institucional apropiada para que funcionen con eficacia [53].

En Colombia

Las lagunas de estabilización constituyen la tecnología más apropiada para lograr el objetivo de adecuación del tratamiento de las aguas residuales domésticas para su uso productivo, además de requerir sólo 20% de la inversión y 10% de los costos de operación que otras opciones tecnológicas demandan. El uso de estas aguas en actividades como la silvicultura, que son menos exigentes en calidad sanitaria, permitiría reducir aún más el costo del tratamiento. Además, el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas en el riego agrícola significa reducir y hasta eliminar las descargas que de alguna forma siempre generan impactos negativos en el ambiente [54]

La alternativa de utilizar las aguas residuales tratadas en actividades productivas como la agricultura, genera un espacio de concertación entre la ciudad, que dispondría de sistemas adecuados de tratamiento de bajo costo, y los usuarios potenciales de estas aguas, quienes podrían asumir parte del costo del tratamiento por el derecho a disponer de agua con nutrientes disueltos para sus actividades productivas. Por tanto, los sistemas integrados permitirían controlar un incremento

significativo de las tarifas cuando en éstas se incorpore el costo del tratamiento, garantizando así una mayor sostenibilidad del servicio [54].

7. Normatividad

En 2015, la Comisión Europea estableció la adopción de una serie de medidas para facilitar la reutilización del agua, incluyendo una propuesta legislativa sobre los requisitos mínimos del agua reutilizada [55].

En junio de 2016, los directores del Agua de la UE aprueban un documento con las Directrices sobre la integración de la reutilización del agua en la planificación y gestión del agua en el contexto de la DMA (EC, 2016), documento que representa una posición de consenso sobre buenas prácticas [56].

Análisis de tabla 1.

Entre los países latinoamericanos se han venido generando diferentes estudios y avances en el tema de la normatividad ambiental, sin embargo, podemos encontrar países como Colombia en el que la normatividad es muy antigua, se han venido realizado algunos ajustes por medio de resoluciones pero pese a esto no se han hecho cambios tan significativos, en otros países de la región encontramos panoramas similares, aunque hoy se le está prestando mayor atención al tema ambiental por lo que se esperaría que a medida que los estudios y las priorizaciones en diferentes temas se hagan evidentes, puedan emplearse nuevas normas que permitan llevar a cabo las medidas que se quieran tomar.

Tabla 2. Normatividad Latinoamericana

País	Norma	Ámbito de aplicación
Colombia	<ul style="list-style-type: none"> Resolución 631 de 2015. Ley 99 de 1993 	<ul style="list-style-type: none"> Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Por la cual se crea el Ministerio del medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.
México	Ley de Aguas Nacionales publicada el 1 de diciembre de 1992	Establece la necesidad de prevenir y controlar la contaminación del agua y proteger los recursos hídricos
Perú	Ley N° 28611 Ley General del Ambiente (Art 122)	<ul style="list-style-type: none"> El sector vivienda, construcción y saneamiento es responsable de la vigilancia y sanción por el incumplimiento de LMP en los residuos líquidos domésticos, en coordinación con las autoridades sectoriales que ejercen funciones relacionadas con la descarga de efluentes en el sistema de alcantarillado público
Argentina	Ley Nacional N°25688 de 2002 - Régimen de Gestión Ambiental de Aguas	<ul style="list-style-type: none"> Establézcense los presupuestos mínimos ambientales para la preservación de las aguas, su aprovechamiento y uso racional. Utilización de las aguas. Cuenca hídrica superficial. Comités de cuencas hídricas.
Brasil	<ul style="list-style-type: none"> Código del Agua Decreto N° 24.643 promulgado en el año de 1934 Ley N° 9.433 de 1997 Ley de Aguas CONAMA No. 357/2005 	<ul style="list-style-type: none"> Primer instrumento normativo por referirse específicamente sobre los recursos hídricos Instituyó la Política Nacional de Recursos Hídricos. Dispone sobre la clasificación de los cuerpos de agua y directrices ambientales para su marco y establece las condiciones y patrones de vertido de efluentes, y da otras providencias.

Tabla 2. Referente al panorama Europeo, la diferencia que hay entre países y aún más con los países latinoamericanos es mucho más evidente, puede ser por tratarse de lugares con mayor cantidad de población, esto genera que todas las necesidades se amplifiquen, además que en la mayoría de estos países los cambios climáticos han sido tratados como temas de prioridad en comparación con la región latinoamericana, esto puede ocasionarse por temas culturales, económicos o los factores ambientales en cada región.

Tabla 3. Normatividad Europea.

País	Norma	Ámbito de aplicación
Francia	Decreto de 2 de agosto de 2010 relativo al uso de aguas urbanas depuradas, para riego de cultivos y espacios verdes Orden de 2014, relativa con el uso de aguas residuales urbanas tratadas para el riego de cultivos y espacios verdes	Prescripciones sanitarias y técnicas aplicables a la utilización de agua residual tratada para riego de cultivos, de cultivos y espacios verdes y bosques.
Grecia	JMD 14511641 (GGB 354/2011)	Determina las medidas, procedimientos y procesos para la reutilización de aguas residuales urbanas e industriales para usos urbanos, agrícolas industriales y ambientales, incluyendo la recarga de acuíferos
España	RD 1620 2007 de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas. BOE de 8 de diciembre de 2007. n 294, pp 5063-50661	Establece el régimen jurídico y los criterios de calidad para la reutilización de las aguas depuradas. Los usos admitidos son: urbano, agrícola, industrial, recreativo y ambiental incluyendo la recarga de acuíferos.
Italia	DM 185 2003, Medidas técnicas para la reutilización del agua Reglamemo recante norme tecniche per Thilizza delle acque	Normativa para la reutilización de las aguas residuales domésticas, urbanas e industriales para los agrícolas industriales y urbanos

Tabla 3. Los contrastes climáticos dictado principalmente por las 4 estaciones del año, el actual acuerdo político (unión europea) y la disponibilidad de recursos humanos calificados y económicos hacen que la región trabaje como un todo a aquello que pueda afectar el medio ambiente incluyendo el tratamiento de aguas residuales de origen agrícola industrial o doméstico.

8. Las aguas residuales en el sector rural

8.1 Cómo es el tratamiento de aguas residuales rurales en Latinoamérica y Colombia.

En Latinoamérica el agua que es tratada solo llega al 14% según un estudio de Silva en 2006, esto debido a los altos costos de las plantas de tratamiento, México es uno de los países que más se ha preocupado por esta problemática, este se ubica entre los países latinoamericanos que han extendido su cobertura en el manejo de aguas residuales domésticas en los últimos años, al lado de Brasil, Chile, Colombia, Honduras, Nicaragua, Perú y Uruguay según la ONU [57].

En México los entes gubernamentales han buscado estrategias para el tratamiento de las aguas residuales para así mejorar las condiciones de salubridad de los ciudadanos. Pero tampoco hay acciones claras para mejorar la calidad y la cobertura esto debido al aumento de la población y los contaminantes que se están produciendo, la industria y su manejo inadecuado de los residuos sólidos y orgánicos y los por los productos químicos de la agroindustria [58].

Teniendo en cuenta la cobertura se estima para las áreas rurales de Colombia como zonas que no son atendidas de la mejor manera, viéndose aislada del desarrollo económico y social en comparación con la ciudad. La falta de recursos, servicios básicos y la poca infraestructura de acueducto y alcantarillado dando así origen a problemas de salud y contaminación. La poca inversión En el tratamiento de aguas residuales imposibilita la implementación de una planta de tratamiento (PTAR) ya que esta presenta un costo muy elevado en la construcción, operación y mantenimiento. El no tratamiento de estas aguas da resultado en la contaminación de fuentes hídricas, deteriorando así los ecosistemas cercanos y generando problemas de salubridad a la comunidad [58]

Por esta razón los sistemas de tratamiento naturales representan una opción para tratar las aguas residuales rurales y una alternativa que genera un interés para que

los países en desarrollo implementen, en donde los recursos y el personal capacitado para los sistemas convencionales escasean tanto. Una de las posibles limitantes que pueda ocurrir con este tipo de método es la disposición de los terrenos, esto debido a que puede llegarse a necesitar un gran terreno para su implementación, lo que puede provocar que sea más costoso o igual que en los sistemas convencionales [59].

Tabla 4. Tipos de tratamiento

Tipo de Tratamiento	Principal característica	Principal desventaja
Zanjas de oxidación	Las zanjas de oxidación están basadas en la aplicación de un proceso de tratamiento biológico de lodos activados por aeración extendida en la cual se suministra oxígeno por medio de rotores.	La desventaja de este proceso es que requieren consumo de energía de 1 a 3 kg DBO/Hwh y se emplea para poblaciones de 1000 a 100 000 habitantes.
Tanques Imhoff	Los tanques Imhoff son unidades en las que se combinan los procesos de sedimentación y digestión de lodos en dos cámaras independientes	La construcción de los tanques Imhoff es más costosa que la de las fosas sépticas y el rango de población para el que se recomiendan estas unidades es de 500 a 5000 habitantes
Campos de absorción	Un campo de absorción consiste en un conjunto de líneas de tubos de barro o concreto perforado, tendidos en forma tal que el escurrimiento de agua residual proveniente del tanque séptico se distribuya uniformemente en el terreno	Una desventaja de este sistema necesita una carga hidráulica apreciable para su operación, generalmente cercana a los 2/m
Montículos de evapotranspiración	Un montículo de evapotranspiración consiste en un monte sobre la superficie del suelo formado con arena o algún otro material poroso sobre el que se distribuye al agua residual que posteriormente pasará a través de las capas del suelo.	Es, muy importante la topografía del terreno para asegurar un flujo uniforme, y en los casos en que la tasa de percolación sea menor de 120 mln/plg o 1a pendiente sea mayor del 15%, no se recomienda el uso de los montículos de evapotranspiración
Irrigación	Este es el método que se emplea con más frecuencia cuando se trata de pequeños fosos sépticos al servicio de viviendas y establecimientos. Consiste en dispersar el efluente del depósito en la capa superior del terreno por medio de tuberías conjuntas abiertas, colocadas en zanjas cubiertas de tierra.	Este procedimiento se puede utilizar si el subsuelo no es poroso, si el nivel de las aguas subterráneas está a menos de 1.2 m de la superficie, o si existe peligro de contaminación de los manantiales de agua potable.

Tabla 4. Fuente: Comisión Nacional de Aguas México (2007). Métodos alternativos encontrados a través de diversos estudios realizados en México usados principalmente en comunidades rurales algunas viviendas aisladas pertenecientes al segmento rural.

Otro caso que se puede examinar y observar es el de san salvador el cual el manejo de las aguas residuales el cual el sistema de letrinas es el más utilizado, adoleciendo de un sistema adecuado de tratamiento para las aguas negras y se dejan de tratar las aguas grises las cuales llegan a los ríos y generan grandes afectaciones a la población [58].

Contexto colombiano

En Colombia es un país en el cual se pueden resaltar muchas problemáticas y diferentes dificultades sociales, ambientales y de salud, debido al mal manejo de las aguas residuales domesticas e industriales. Las zonas rurales por muchos años han estado desprotegidas y abandonadas por el estado ya que la dificultad del ingreso a estas zonas es difícil y también al mal manejo de los dineros que ingresan. Una de las principales problemáticas de esta zona es como disponer las aguas residuales que generan, siendo los pozos sépticos el método más utilizado y la disposición directa de aguas sobre las fuentes de agua [59].

El manejo de las aguas residuales hace parte de las principales problemáticas ambientales en las que se encuentra Colombia, en donde el estado busca la disminución de los impactos negativos al ambiente. Por esta razón el país se viene ajustando a la normatividad que permita mejorar las condiciones y el manejo de las aguas residuales en todo el territorio [59].

De este modo se han identificado diferentes procesos y métodos de tratamiento de aguas residuales para las zonas rurales, para que no se siga afectando la salud humana [59].

Después del 2015, cuando se revisaron los objetivos de desarrollo sostenible, se pudo constatar que en las áreas rurales solo el 53% de la población rural contaba con cobertura de agua potable y el 15 % con cobertura de saneamiento básico seguro. En el informe de desarrollo humano de 2011 “Colombia Rural” identifico que el 32% de la población del país reside en las áreas rurales. En la zona rural la

ejecución de soluciones individuales de saneamiento generalmente ha sido realizada por iniciativas individuales de las personas o por alguna ONG [60].

El saneamiento es un requisito fundamental para poder lograr una vida digna, en cualquier tipo de asentamiento humano. Así mismo la opción tecnológica que se vaya a utilizar en esta zona varía en que se utilice de una forma óptima y que estén relacionadas con un mayor o menor deterioro ambiental. Otra de las principales falencias de las intervenciones en saneamiento en la ruralidad colombiana es en asumir el trabajo en este campo como una intervención puntual en vez de desarrollar proyectos participativos de aprendizaje. De esta manera fases tan esenciales como la planificación participativa, la capacitación para la operación y el mantenimiento no se realiza y no se organiza la gestión y mucho menos se hace seguimiento al funcionamiento y al uso de las unidades sanitarias y de los sistemas de tratamiento [60].

8.2 ¿De qué están compuestas las aguas residuales Rurales?

El tratamiento y uso de las aguas residuales se manifiesta dentro de las políticas públicas estatales para afrontar las dificultades de tratamiento y acceso de agua potable, especialmente en las zonas rurales, proceso que tiende a presentar dificultades porque es en estas zonas rurales donde el uso de las aguas residuales se concentra en la agricultura y al no establecer los cuidados necesarios, puede conllevar a consecuencias en la salud derivadas de los productos alimenticios (Souiza, Fia and Silva, 2017; Mirbolooki, Reza and Pendashteh, 2017) [61].

Estas aguas también contienen materiales disueltos, siendo la sal más habitual el cloruro sódico. La conductividad fluctúa normalmente en un rango de 300 a 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Una salinidad demasiado alta (superior a 1.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$) conduce a problemas en el riego, ya que genera el inconveniente de la salinización del suelo; a pesar de ello, algunas plantas tolerantes a las sales pueden crecer en agua gris con alta salinidad [61]. Adicionalmente en éstas se encuentran macro contaminantes que son todos aquellos contaminantes cuya concentración en el

medio ambiente es del orden de mg/L; dentro de esta clasificación encontramos materia orgánica, nutrientes y patógenos [62].

Encontramos los micro contaminantes, hace referencia a todos aquellos contaminantes cuya concentración en el medio ambiente suele ser a nivel de trazas, es decir ng/L o µg/L. Dentro de esta clasificación encontramos los Contaminantes Orgánicos Emergentes (COEs), tales como metales, plaguicidas, hidrocarburos aromáticos, también conocidos como contaminantes prioritarios (CP) (PP, en inglés Priority Pollutants) [62].

8.3 Principales tratamientos en las zonas rurales en el mundo, Latinoamérica y Colombia.

En el sector rural, la cobertura en alcantarillado y tratamiento de aguas residuales es baja. Comparativamente es más costoso construir alcantarillados en el sector rural que en el sector urbano; y construir sistemas centralizados y convencionales para el tratamiento de aguas residuales, además de los costos se dificulta aún más por la operación y mantenimiento. Aunque se construyen alcantarillados y sistemas de tratamiento centralizados en la zona rural, no siempre es posible por razones de tipo topográfico y económico [63].

Existen diferentes métodos para desinfectar aguas servidas que incluyen agentes químicos (ejemplo: cloro, cloroamina, ozono, dióxido de cloro, permanganato de potasio, entre otros), agentes físicos (ejemplo: radiación UV) e irradiación (ejemplo: electromagnetismo, rayos gamma) [62].

Como alternativa podemos considerar un sistema descentralizado integrado y sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas en el sector rural esta es una solución individual para las aguas residuales de cada vivienda, donde se integra el tratamiento de las aguas residuales, con el reúso de los subproductos del tratamiento y los productos retornan a la vivienda beneficiando a sus pobladores. Al

ser el sistema cíclico no genera residuos para disponer al ambiente, por lo tanto, no se produce contaminación. Estos sistemas de tratamiento deben diseñarse de tal manera que sean amigables con el ambiente y los contaminantes no sean vertidos a las fuentes, convirtiéndose en materia prima para la producción; además deben ser de bajos costos y de fácil construcción operación y mantenimiento [63].

Entre las diferentes tecnologías que se pueden utilizar en las zonas rurales están las siguientes.

Tabla 5. Sistemas de tratamiento de aguas residuales rurales

Sistemas de tratamiento de aguas residuales rural	
Humedales Biológicos	<p>Son filtros biológicos elaborados en piedra o arena, sembrado con plantas de pantano u otras y con aguas residuales pretratadas; su forma de uso, el agua residual es depurada por la labor de microorganismos que se consolidan en la superficie, y por otros métodos físicos como la filtración y la sedimentación.</p> <p>Aprovechan la capacidad de las plantas para la depuración de aguas residuales, la cual tiene lugar al hacerlas circular a través de estas zonas húmedas artificiales. La tecnología de Humedales Artificiales actúa como un complejo micro ecosistema.</p>
Lagunas de estabilización	<p>es un proceso de tratamiento de aguas de desagüe que es utilizado en pequeñas comunidades de Latinoamérica y el Caribe, este método consiste en retener el desagüe por un tiempo suficientemente largo para alcanzar la estabilización de excretas entre algas, productores de oxígenos y bacteria que se utilizan para la para metabolizar la materia orgánica produciendo Dióxido de carbono.</p>
Lechos bacterianos o filtros percolativos	<p>Esta tecnología se basa en la depuración de aguas residuales por medio de un proceso con microorganismos, esta técnica consiste en lechos que por lo común están elaborados en material sintético o piedra donde permite la distribución de aguas residuales de forma pareja por vaporización a través de brazos giratorios y debido a la alta ligereza del lecho se genera una aireación natural.</p>
Digestión anaerobia	<p>La digestión anaerobia es una tecnología para el tratamiento de residuos orgánicos que permite dar solución que permite dar una solución al manejo de residuos que contaminan el medio ambiente, además consiste en reducir las emisiones de gases de efecto invernaderos, y poder reutilizar (por medio de la producción de biogás) el potencial energético de los residuos y adquirir un producto abundante en nutrientes, bueno como fertilizante. En el proceso de cogestión anaerobia se mezclan varias sustancias orgánicas biodegradables, obteniendo el aumento y condicional de la producción de biogás por kilogramo de muestra.</p>
Método de Fenton modificado	<p>El método de Fenton modificado por medio de uso el agente quelante, optando por el ácido cítrico, ya que este permite las formaciones de quelatos de Fe³⁺ más sólidos que con los de Fe²⁺. La acción de los quelatos del Fe³⁺ desarrollados con agentes quelantes es baja para descomponer el H₂O₂, formando así complejos menos estables esto permite que se pueda reducir de una mejor manera apropiada a la planta de tratamiento residuales.</p>
Pozos sépticos	<p>Los pozos sépticos eliminan la materia orgánica por medio de la depuración al detener el agua residual lo cual permite que se decante por un tiempo mínimo de 24 horas</p> <p>Contemplado para el tratamiento preliminar una trampa de grasas, y un Tanque Séptico de Acción Múltiple, conformado por un sedimentador como tratamiento primario y un digestor y un filtro anaerobio de flujo ascendente como tratamiento secundario. Los lodos extraídos del sedimentador serán compostados para ser utilizados como abono en un cultivo; y el efluente como agua para riego</p>

Tabla 5 Referencias [61, 63 y 64]. *Se tienen en cuenta las tecnologías que se implementan en las zonas rurales.*

8.4 Diferencias entre los tipos de tratamiento en las zonas Rurales y

Urbanas.

Respecto a las concentraciones de los diversos constituyentes de las aguas servidas, se pueden establecer diferencias entre las de tipo urbano y las de tipo rural, debido a que presentan diferencias como la densidad poblacional, las diversas actividades que se ejercen, y los sistemas de recolección que se tienen en los núcleos humanos que las generan (Ramalho, 1998). De este modo existen poblaciones donde las cargas orgánicas y de nutrientes pueden alcanzar valores elevados (por ejemplo, superior a los 400 mg/L para DBO5, y superior a los 90 mg/L para NT), como también existen zonas de baja carga orgánica, nutrientes y otros parámetros (Vera, 2012) [62].

El tratamiento de las aguas residuales en zonas aisladas se enfrenta a muchas dificultades económicas asociadas a la contaminación difusa, la dispersión geográfica y las condiciones topográficas de los pequeños municipios, asentamientos rurales y agroindustria. De este modo los métodos convencionales de tratamiento no se pueden aplicar a estas zonas ya que exige una inversión considerable y de personal capacitado para su operación y mantenimiento. Lamentablemente estas zonas no cuentan con la capacidad financiera para aplicar estos tipos de tratamiento y en muy pocas ocasiones cuentan con el personal capacitado, por esta razón la solución lógica es la de tratar los efluentes con tecnologías de tipo pasivo que no necesitan tanta inversión técnica [62].

De esta manera en las zonas urbanas la aplicación de métodos convencionales son los más aptos ya que se necesita debido a la gran cantidad de población que se encuentra asentada y así poder suplir todas las necesidades de alcantarillado. De igual manera, es importante el compromiso de todas las instituciones que estén articuladas para así lograr mejorar la calidad de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales [64].

8.5 Normatividad de las aguas residuales para zonas rurales.

Unión Europea: La UE cuenta con la **directiva 91/271/CEE de 21 de mayo de 1991** que cobija a todos los países participantes comprendiendo entre muchas razones que las cuencas hidrográficas y sus interacciones están más allá de las divisiones del territorio y se comportan como un todo; es imperativo evitar que los miembros de la comunidad tengan alguna deficiencia en el manejo de sus aguas residuales urbanas, industriales y agrícolas. Dado que esto repercute directamente en el medio ambiente [56].

Entre las características principales de la directiva está la contemplación de las aguas residuales ubicadas en tres segmentos característicos; aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales, en contraste a los conceptos normativos e institucionales utilizados en Colombia y países Latinoamérica donde la caracterización de aguas es catalogada como; domestica urbana, domestica rural, industrial y agrícola [56].

Latino América

Costa Rica

La Política Nacional de Saneamiento de Aguas Residuales (PNSAR) se convierte en el primer referente para definir lo que se espera del sector, en relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que plantean, entre otras cosas, garantizar que las aguas residuales no afecten el medio ambiente gracias al uso de sistemas de tratamientos individuales o colectivos [65].

EI SANEBAR, se fundó en 1975 y tiene como objetivo, dotar de sistemas de disposición de aguas residuales domésticas a familias en zonas rurales del país, el cual consiste en un módulo sanitario que abarca ducha, inodoro y lavatorio; tanque séptico y drenaje, y trampa de grasa y drenaje para las aguas jabonosas [65].

Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados comunales (ASADAS) prestan los servicios de agua en las áreas rurales y están reguladas por

el **Decreto Ejecutivo 32529-S-MINAE del 2005**. Inicialmente fueron constituidas como comités de acueductos y alcantarillados del área rural – CAAR - y posteriormente transformadas en ASADAS [65].

Ecuador

El reglamento ley recursos hídricos usos y aprovechamiento del agua del año 2015 determina un sistema nacional estratégico del agua, adicional dicta los lineamientos para el uso y aprovechamiento del agua [66].

Plan nacional de saneamiento básico rural – SANEBAR este plan tiene como objetivos obtener del Gobierno Nacional del Ecuador, el compromiso político de asignar recursos financieros y técnicos para lograr la cobertura universal de servicios de agua y saneamiento sostenibles en el área rural, al año 2006. En el documento se hace una descripción de este país suramericano y se presenta el proyecto SANEBAR con sus principales componentes. Se evalúa y analiza el sector de abastecimiento de agua y saneamiento, particularmente en el área rural [67].

Perú

Decreto Supremo N° 031-2010-SA. Aprueba el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, que consta de diez títulos, ochenta y un artículos, doce disposiciones complementarias, transitorias y finales, y cinco anexos, cuyos textos forman parte integrante del presente decreto supremo. En su artículo 11 faculta a la superintendencia nacional de Servicios de Saneamiento para realizar la gestión de calidad del agua para consumo, en su artículo 13 define que es la autoridad de salud quien realiza la vigilancia Sanitaria [68].

Para el año 1986 el comité nacional de coordinación de saneamiento básico con la colaboración de la organización panamericana de la salud y la organización mundial de la salud elabora el Plan Nacional de Saneamiento Básico [69].

El actual marco legal aprobado por el Decreto Supremo N° 023-2005-VIVIENDA, establece que las Organizaciones Comunales - las cuales incluyen a las Juntas

Administradoras de Servicios de Saneamiento - son las encargadas de prestar los servicios de saneamiento en el ámbito rural [70].

Colombia

En el artículo 279 del plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 Dotación de soluciones adecuadas de agua para consumo humano y doméstico, manejo de aguas residuales y residuos sólidos en áreas urbanas de difícil gestión y en zonas rurales. Los municipios y distritos deben asegurar la atención de las necesidades básicas de agua para consumo humano y doméstico y de saneamiento básico de los asentamientos humanos de áreas urbanas de difícil gestión, y en zonas rurales, implementando soluciones alternativas colectivas o individuales, o mediante la prestación del servicio público domiciliario de acueducto, alcantarillado o aseo, de acuerdo con los esquemas diferenciales definidos por el Gobierno nacional y la reglamentación vigente en la materia. Las soluciones individuales de saneamiento básico para el tratamiento de las aguas residuales domésticas provenientes de viviendas rurales dispersas que sean diseñados bajo los parámetros definidos en el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico no requerirán permiso de vertimientos al suelo; no obstante, deberán ser registro de vertimientos al suelo que para tales efectos reglamente el Gobierno nacional. Esta excepción no aplica para hacer vertimientos directos de aguas residuales a cuerpos de aguas superficiales, subterráneas o marinas [71].

Soluciones alternativas para el manejo de aguas residuales domésticas. Las soluciones alternativas para el manejo de aguas residuales domésticas en zonas rurales deberán cumplir con las siguientes condiciones [72]:

1. Las viviendas, otras infraestructuras y equipamientos para usos dotacionales, deberán contar con instalaciones sanitarias adecuadas y con un sistema para el tratamiento de las aguas residuales domésticas [73].
2. El diseño, instalación o construcción, operación y mantenimiento de las soluciones individuales de saneamiento para el tratamiento de las aguas

residuales domesticas debe ajustarse a los requisitos técnicos definidos en el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio [73].

3. El decreto 1077 de 2015 reglamenta los valores máximos permisibles para la categorización de los biosólidos. Los biosólidos deberán cumplir con los valores máximos permisibles establecidos en la tabla 4 y se clasifican en una de las siguientes categorías: Categoría A y Categoría B, Siendo una de las alternativas atractivas y viables para las zonas rurales es preciso tener en cuenta los valores indicados [12].

Tabla 6. Valores máximos permisibles de categorización de biosólidos para su uso.

Criterio	Variable	Unidad de medida	Categoría biosólido valores máximos permisibles a b		
Químicos- metales concentraciones máximas	Arsénico (As)	Mg / Kg de biosólido (base seca)			
	Cadmio (Cd)				
	Cobre (Cu)				
	Cromo (Cr)				
	Mercurio (Hg)				
	Molibdeno (Mb)				
	Plomo (Pb)				
	Zinc (Zn)				
Microbiológicos	Coliformes Fecales	Unidades formadoras de colonias - UFC / g de biosólido (base seca)	< 1,00 E (+ 3)	< 2,00 E (+ 6)	
	Huevos de Helmintos Viables	Huevos de Helmintos Viables / 4 g de biosólido (base seca)	< 1,0	< 10,0	
	Salmonella sp	Unidades formadoras de Colonias - UFC en 25g de biosólido (base seca)	Ausencia	< 1,00 E (+ 3)	
	Virus Entéricos	Unidades Formadoras de Placas - UFP / 4 g de biosólido (base seca)	< 1,0		

Fuente [72]

9. Plantas macrófitas

El termino de plantas macrófitas presenta varias definiciones, sin embargo, todas coinciden en que son plantas que desarrollan la totalidad de su ciclo biológico en ambientes con agua libre o suelos sobresaturados, Este grupo abarca grupos tan distintos como plantas vasculares acuáticas, briófitos, carófitos y algas filamentosas. La presencia de plantas macrófitas posee un doble rol en los sistemas palustres y lacustres. Son beneficiosos desde el punto de vista de servicios ecosistémicos y podrían ser muy perjudiciales al actuar como malezas en los sistemas que han sufrido actividades antrópicas [74].

9.1 Tipos de Plantas Macrófitas

Existen tres categorías generalmente útiles en los procesos de purificación:

Las macrófitas emergentes

Son plantas que crecen con la humedad, pero la profundidad del agua les permite enraizarse o anclarse al sustrato y sobresale con vástagos en la parte superior del agua. Algunas de estas plantas son muy conocidas: caliguetes, juncos, carrizos, platanillos, ninfas y hasta bambúes [74].

Las macrófitas flotantes

Son aquellas que crecen en la superficie del agua, pero ocasionalmente sus raíces pueden anclarse al sustrato cuando el agua baja drásticamente, en estas se pueden encontrar los lirios de agua, lechugas, lentejas y helechos [74].

Las macrófitas sumergidas

Son las menos conocidas ya que estas pasan la mayor parte del tiempo debajo del agua y no son muy perceptibles mientras no crezcan en abundancia, dentro de este grupo se pueden encontrar las elodeas [75].

De acuerdo con lo anterior se puede determinar que para una buena selección de una especie vegetal para el uso de una unidad de tratamiento se debe tomar en cuenta no solo los efectos de dicha especie sobre el agua a tratar, si no la compatibilidad en el clima y en el ambiente del lugar de operación [76].

Por otra parte, también es importante su capacidad de transportar oxígeno desde las hojas hasta la raíz, su tolerancia a concentraciones elevadas de contaminantes, su capacidad de asimilación de estos, su tolerancia a los diversos cambios climáticos, su resistencia a los insectos y enfermedades y su facilidad de manejo [76].

De este modo las macrófitas comprenden un ampliado y variado grupo de plantas en las que se destacan el Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*), la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), La salvinia (*Salvinia Spp.*), la redondita de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*), y algunas especies de lentejas de agua (*Lemna Spp.*, *Spirodella Spp.*). Las plantas emergentes o helófitas. Entre ellas se encuentran los carrizos (*Phragmites spp.*), los esparganios (*Sparganium spp.*), las espadañas (*Typha spp.*), el lirio de agua (*Iris pseudacorus L.*) [77].

Los sistemas de tratamientos acuáticos se basan principalmente en el mantenimiento de una cobertura vegetal de macrófitas sobre una lámina de agua, estos se disponen en forma de estanques o canales en serie, en el cual están aislados correctamente en la cual discurre el efluente [78].

Los sistemas que utilizan macrófitas acuáticas (humedales), constituye una alternativa muy importante a la problemática de saneamiento, esto debido a su capacidad de proliferación y absorción de contaminantes. Entre las principales cualidades de estos sistemas se encuentra, la nula generación de lodos, el bajo costo de construcción y mantenimiento sencillo, pero requiere de un constante seguimiento; son sistemas muy flexibles ya que no son susceptibles a cambio de caudales y carga del afluente, la biomasa actúa como aislante del sedimento, lo que

proporciona una actividad microbiana constante, mantiene la diversidad ambiental y no producen olores y se integran al paisaje [79].

En sus principales desventajas figuran como principal, el poco conocimiento acerca de su funcionamiento y se requiere de dos a tres estaciones para su crecimiento para llegar a la máxima eficiencia, los proyectos se deben diseñar acorde a cada característica en particular, La acumulación de sólidos en el lecho granular acelera su colmatación, tienen un aumento significativo en la salinidad del afluente. Además, estas plantas pueden ser una problemática para otras especies nativas ya que pueden ser invasoras [80].

Otro factor importante para el funcionamiento de los sistemas con macrófitas, son los microorganismos ya que de estos depende la eficiencia en la remoción de los contaminantes. Estos contribuyen a la eliminación de la materia orgánica y ayuda a la transformación de compuestos nitrogenados y de fósforos contenidos en el agua residual [81].

La velocidad de remoción de las plantas macrófitas varía extensamente, esto depende del crecimiento de las plantas y la cantidad de concentración del contaminante en el tejido de la planta. La reducción de DBO5 en función del tiempo de retención y a temperaturas mayores de 20°C con este tipo de plantas es de alrededor del 70% en cinco días de retención. Este sistema puede proporcionar un sistema secundario y terciario al agua residual por medio de la acción microbiana provenientes de las plantas macrófitas [82].

Así mismo, con la utilización de plantas macrófitas se pueden obtener reducciones entre el rango del 21% a 91% para SST Y DBO5, y entre 95% a 90,2% para la DQO, además de esto se ha demostrado ser muy eficiente en la remediación en ecosistemas que estén contenidos de nutrientes, arsénico, zinc, cadmio, cobre, plomo, cromo y mercurio, esto ocurre por las reacciones que ocurren con los microorganismos adheridos al sistema radicular de la planta [83].

Sin embargo, el papel de remoción frente a los agentes patógenos no es muy claro, se han obtenidos en algunos estudios porcentajes que van desde el 80 y el 99% de remoción en coliformes fecales y *E. coli*. Pero en otros se ha encontrado que la eficiencia del sistema con macrófitas es menor que a las lagunas de estabilización convencionales [84].

El uso de las plantas macrófitas históricamente ha sido desarrollado bajo diversos esquemas de sistema de tratamiento. En este mismo orden de ideas hay una gama amplia de diseños en función de las características de cada uno. El más utilizado comúnmente es en el sistema de humedales, este tipo de diseño se puede utilizar con plantas macrófitas flotantes y la literatura la referencia como humedales con plantas flotantes, y humedales con macrófitas emergentes en flotación [84].

En los países de Latinoamérica hay grandes diferencias socioeconómicas tanto ambientales como tecnológicas, por lo que hay zonas que carecen de saneamiento básico y otras que solo alcanzan niveles aceptables de tratamiento del agua residual. Por esta razón los problemas en las zonas rurales son más acentuados ya que estos carecen de sistemas de alcantarillado y sistemas convencionales de tratamiento. De esta manera los sistemas de tratamiento natural son los más recomendados dados los bajos costos de operación y mantenimiento y a las altas eficiencias de eliminación de contaminantes que se pueden alcanzar [84].



Para estas problemáticas existen varias opciones que se pueden aplicar entre estas se incluyen las lagunas de oxidación, macrófitas flotantes y enraizadas, y humedales construidos. Los principales mecanismos de eliminación de contaminantes de los humedales incluyen la combinación de varios procesos físicos, químicos y biológicos en donde los microorganismos y los sustratos, el agua y las plantas realizan la eliminación de la materia orgánica, patógenos y otros contaminantes del agua residual [84].



La eficacia de este sistema puede variar de acuerdo con el tipo de planta que se escoja, por eso no se puede generalizar sobre la selección de especie de

macrófitas, pues cada especie puede responder de diferente manera a las condiciones exactas donde se va a llevar a cabo el proceso de depuración [85].

La utilización de plantas macrófitas como sistemas de depuración ha sido estudiada muy ampliamente por varios investigadores, también han investigado la eficiencia de estas plantas en lagos eutrofizados, la capacidad de las macrófitas para extraer metales pesados y retención de mercurio. Por otro lado, las plantas macrófitas también se pueden utilizar como restauradores de riveras y ríos, mejora de área de pantanos y como uso ornamental en estanques o lagos [86].

Tabla 7. Tipos de plantas macrófitas

Año	País	Titulo	Plantas Usadas/ Estudiadas	Tipo de Agua	Imagen
2019	Colombia	Evaluación de un sistema a escala laboratorio, de un filtro de macrófitas en flotación como tratamiento de aguas residuales de un autolavado.	Jacinto de Agua (<i>Eichhornia crassipes</i>) y Lenteja de Agua (<i>Lemna minor</i>)	Industrial	 <p>Tomada de: http://www.consultaplantas.com/index.php/es/plantas-por-nombre/plantas-de-la-d-a-la-l/314-cuidados-de-la-planta-eichhornia-crassipes-o-jacinto-de-agua</p>
2016	Colombia	Eficiencia de eliminación de contaminantes del agua residual doméstica con humedales construidos experimentales plantados con <i>Cyperus ligularis</i> (Cyperaceae) y <i>Echinochloa colonum</i> (Poaceae)	<i>Cyperus ligularis</i> (Cyperaceae) y <i>Echinochloa colonum</i> (Poaceae)	Doméstica	 <p>Tomada de: https://ecuador.inaturalist.org/taxa/161458-Cyperus-ligularis</p>

2010	Colombia	Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas.	Canna limbata, y Heliconia psittacorum Phragmites sp	Domestic a	 <p>Tomada de: https://es.wikipedia.org/wiki/Heliconia_psittacorum</p>
2018	Colombia	Fitorremediación en aguas residuales sin tratamiento previo. Caso: Tierra Negra, Boyacá	Buchón de agua (Eichhornia crassipes)	Domestic a	 <p>Tomada de: https://miregion360.com/el-buchon-de-agua-que-invade-al-rio-cauca-y-que-epm-intenta-controlar/</p>



2013	México	Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante plantas macrófitas típicas en Los Altos de Jalisco, México	El carrizo común (Phragmites australis), el gladiolo (Gladiolus spp) y la totora (Typha latifolia)	Domestic a	 <p>Tomada de: https://www.malaga.es/es/turismo/naturaleza/lis_cd-13071/carrizo-phragmites-australis</p>
2017	Perú	“Evaluación de la eficiencia de humedales artificiales verticales empleando Cyperus alternifolius Y Chrysopogon zizanioides para el tratamiento de aguas	Cyperus alternifolius y Chrysopogon zizanioides.	Domestic a	 <p>Tomada de: http://www.consultaplantas.com/index.php/es/plantas-por-nombre/plantas-de-la-a-a-la-c/272-cuidados-de-la-planta-cyperus-alternifolius-o-planta-paraguas</p>

Tabla 6 Plantas macrófitas que han sido objeto de estudio y han sido analizadas en cuanto a su desempeño de la remoción de materia orgánica en países como México, Perú y Colombia

Para que las macrófitas funcionen se pueden utilizar diferentes procesos como lo son los humedales artificiales, de este se desprenden tres líneas muy importantes de acuerdo con la planta que se vaya a utilizar, estos se consideran en cuanto al movimiento del agua a través del humedal, se consideran los siguientes tipos: horizontal, vertical, flujo superficial y flujo subsuperficial [76].

9.2 Humedales de flujo superficial (FWS)

Estos se configuran con una apariencia muy similar a los humedales naturales, se diseñan con canales o estanques con paredes ataludadas, en donde estas y el recubrimiento inferior son estancos. Se pueden utilizar macrófitas emergentes, también pueden incorporar especies acuáticas flotantes, y especies vegetales sumergidas [76]. Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas, suelen tener aguas con profundidades inferiores a 60 cm, además con pendientes que no superen el 1% para asegurar un adecuado tiempo retención para las plantas macrófitas (espadañas, carrizos y juncos) [76].

Cada elemento de los humedales hace parte importante y aportante del ecosistema: las raíces y tallos sumergidos sirven de soporte a las bacterias y mejoran la capacidad de absorción y filtración del suelo, los tallos superficiales atenúan la radiación solar, la menor penetración de luz controla el crecimiento de algas e interviene en la transferencia de oxígeno a la masa de agua. [86].

Complementariamente los sedimentos funcionan saturados continuamente, por lo tanto, el ambiente es generalmente anóxico, debido a la poca disponibilidad de oxígeno, condición que permite reducir las concentraciones de nitrógeno en el agua y la consiguiente eutrofización de los cuerpos de agua a los que el humedal alimenta [87].

Los sistemas FWS son de apariencia similar a los humedales naturales, en estos hay una combinación de espacios con lámina de agua a la vista y otros con cobertura total de vegetación acuática [87].

Estos se utilizan principalmente para tratamientos terciarios y en algunos casos para el secundario, algunos de los ejemplos en los que se puede utilizar son las lagunas o zanjas vegetadas, pantanos artificiales donde siempre hay una superficie de agua libre [88].

9.3 Humedales de flujo subsuperficial (SSF)

En este sistema el flujo del efluente es de horizontal subsuperficial que el agua se discurre por debajo de la superficie del sistema. Se pueden utilizar macrófitas emergentes como los juncos, y vegetación flotante [76].

Los mecanismos que utilizan estos humedales para mejorar la calidad del agua son la sedimentación, filtración y precipitación química, transformación química y transformación de contaminantes [90].

Es un tratamiento efectivo en forma pasiva, no necesita y seguimiento por parte de personal calificado, su funcionamiento como tratamiento secundario puede durar un año excepto en climas fríos y para tratamiento terciario avanzado pueden operar todo el año en climas cálidos y semicálidos [90].

Un factor muy importante es la densidad poblacional para poder implementar un sistema con macrófitas en una zona rural es la densidad poblacional de dicha población. Según la OCDE son territorios rurales aquellos donde la densidad poblacional es inferior a 150 habitantes por kilómetro cuadrado [91]

En la siguiente tabla se presentan las características físicas e hidráulicas de los diferentes tipos de humedales construidos que se utilizan para el tratamiento de aguas residuales. En las características hidráulicas se encuentran las cargas hidráulicas (profundidad del agua distribuida a través de la superficie del humedal

en un periodo de tiempo determinado), siendo éste un factor a tener en cuenta para la eliminación de la DQO, DBO5 y PT [92].

Tabla 8. características físicas e hidráulicas de un Humedal.

Características físicas			Características Hidráulicas	
Tipo de humedal	Profundidad (m)	Áreas unitarias (m ² /PE)	TRH (d)	CH (mm/d)
HFHS	0,2 – >1,2 (-0,6) a	5,0 – 20,0	0,1 – 15,0	12 – 160
HFHSS	0,3 – 1,0 (0,5)	2,5 – 10,0 (0,5)	2,0 – 10,0 (>5,0)	12 – 160
HFVSS	0,8 – 1,0 (0,9)	0,9 – 5,5 (2,0 – 3,0)	1,0-2,0	12 – 160

Para poder decidir el humedal más pertinente se debe tener en cuenta las características del efluente y la calidad de este mismo, que es lo que se desea obtener ya que las eficiencias de los diferentes parámetros están directamente relacionadas con el tipo de humedal.

10. Discusión

El agua es un recurso finito del cual depende la vida, alimentación, economía, ocio, industria y la salud misma. Aun así, el uso de este recurso es indiscriminado y en algunas de las transformaciones que sufre se produce un daño difícil de remediar. Siendo de gran importancia la conservación como especie, se debe tener en cuenta que los daños a la salud trascienden fronteras y posiciones sociales, afectando a cada habitante de este planeta.

Existen, además, unas amenazas adicionales en cuanto a contaminantes se refieren, que aun en el mejor sistema de depuración pasan desapercibidos por su naturaleza sintética y son reciclados en el ciclo del agua, estos son: Pesticidas, fenoles, tensoactivos, fármacos, productos de aseo personal, disolventes industriales, entre otros.

Para tener en cuenta esto es preciso mencionar que en la actualidad los compuestos que en su mayoría provienen de residuos líquidos domésticos, no se consideran parte de lo que puede ser una problemática mayor, pero teniendo en cuenta que el mercado evoluciona a pasos agigantados las consecuencias son cada vez mayores, puesto que todo avanza en pro de suplir las nacientes y crecientes necesidades de los hogares, agricultura y demás, desde los artículos de limpieza básica, como aquellos que se tienen en cuenta para diferentes procesos de desinfección, mantenimiento o simplemente para uso cotidiano, son contaminantes preocupantes para el agua como: la lejía, los fosfatos, el cloro, las sales de sodio (sulfonato de alquílenseno sódico lineal), presentes en el detergente sólido, el

amoníaco, etanol, fluoruros, alcohol, saborizantes, colorantes vegetales como el que encontramos en la pasta dental.

Los contaminantes mencionados anteriormente son solo algunos que deberían preocuparnos, no solo por el daño al agua, sino también por lo que pueden causar a nuestra salud, más allá de las afecciones conocidas como las gastrointestinales, dermatológicas, neurológicas y nutricionales, trascendiendo a problemas reproductivos, genéticos, enfermedades degenerativas y algunas afecciones psicológicas.

Por otro lado, según diferentes estudios citados en el presente documento, se puede sustentar la importancia del agua en el mundo y todo lo que se está llevando a cabo para su cuidado, sin embargo, se encuentra que no se ha prestado igual importancia al reúso de éstas; la recuperación de las aguas posterior a su uso es vital para poder suplir las crecientes necesidades de la población mundial.

Las aguas residuales, no solo son útiles cuando se trata de la recuperación del recurso hídrico, también son idóneas por su energía química aprovechable, poseen la capacidad de ser una fuente de carbono y se pueden usar en otros procesos diferentes a la ingesta humana, como el riego de cultivos.

El daño no se limita a los causados en la fuente donde se vierten las aguas sin un adecuado tratamiento o la nulidad del este, pues trasciende a problemáticas transversales que por lo general no se asocian directamente; como el aumento de gases de efecto invernadero, la pérdida de fauna, flora y el retraso económico de las comunidades. La deficiencia en cuanto a tratamiento de aguas residuales asciende en proporción al crecimiento demográfico, la falta de planeación de las diferentes urbes, zonas rurales dispersas y centros nucleados; esta misma carencia desencadena un daño que genera una deuda ecológica, traducida al deterioro de cuencas y paisajes, pérdida de fauna y flora, alteración de la cadena trófica, emisión de malos olores y la pérdida de la calidad de vida de los habitantes que aprovechan la fuente hídrica.

El factor económico parece ser la principal constante a la hora de ver las causas en la falta de tratamiento de aguas residuales (de cualquier origen), sin embargo, estas permiten la posibilidad de uso posterior a ser tratadas, lo que ofrece este beneficio brinda alternativas frente a diferentes situaciones como lo son la evasión de multas ambientales, que adicionalmente abre las puertas a las oportunidades de generación de energía eléctrica, elaboración de biofertilizantes, aprovechamiento de biogás como combustible, entre otros, teniendo en cuenta que en la actualidad se vienen haciendo grandes esfuerzos al fortalecimiento de la investigación de estas alternativas.

No es muy común correlacionar a las aguas residuales con la generación de beneficios económicos, y las posibilidades asociadas son diversas siempre y cuando se realice la adecuada gestión ambiental y sanitaria, pues la recuperación y reutilización podrían solventar parte de los gastos que genera el tratamiento, por supuesto que este es aún un tema en investigación y que requiere comparativos con los sistemas convencionales los cuales son poco tocados en la literatura.

El tratamiento de aguas residuales por medio de plantas macrófitas ofrece una nueva alternativa a las poblaciones que no cuentan con la capacidad técnica e infraestructura para la aplicación de alternativas como una PTAR o pozos sépticos. En algunos países de Europa se vienen llevando a cabo grandes esfuerzos y unas medidas que incluyen algunos macrófitos en la depuración de las aguas residuales, a pesar esto, se ha visto que pese a los esfuerzos es una pequeña proporción del agua tratada la que se reutiliza.

Los diferentes estudios sobre las plantas macrófitas son principalmente experimentales y estos se realizan bajo condiciones ya estipuladas en laboratorios, con el fin de observar la eficacia de los parámetros esperados, y poder determinar si cumple con las condiciones necesarias para replicar a escalas mayores. Pese a que en Latinoamérica y particularmente en Colombia no es una práctica mayoritaria, el uso de las plantas macrófitas en los tratamientos de aguas residuales, los humedales pilotos que trabajan con este tipo de plantas acuáticas, han tenido

resultados bastante favorables, donde la remoción de diferentes compuestos y la turbiedad del agua se vieron favorecidos con estos resultados.

Los retos que enfrentamos hoy como especie distan por mucho de los que se presentaron en los pasados siglos, el ajuste de cuentas ambientales demanda el uso de todas las herramientas que otorga la sinergia de biotecnologías, conciencia y trabajo ambiental. Donde la intervención del hombre sea mínima y se transfiera el proceso a ciclos naturales “controlados y monitoreados”.

Entre los estudios tomados en esta revisión, se pudo conocer el rendimiento de algunas plantas macrófitas en flotación, como tratamiento de aguas residuales de un autolavado; los resultados arrojaron que la eficiencia de estas plantas en materia orgánica fue de más del 44% en cuanto a remoción de esta, sólidos suspendidos y sólidos sedimentables. La eficiencia en remoción varía según el parámetro a analizar. Encontrando resultados como: la DBO con la lenteja de agua y el jacinto de agua la remoción fue del 97% y el 91% respectivamente. En DQO la lenteja de agua y el Jacinto de agua fueron de 83,67% y de 97,32%.

Estudios que se llevaron a cabo en campo revelaron que las condiciones ambientales como el clima, la pluviosidad, la cantidad de luz solar al día, los vientos y la temperatura generan cambios a través del año aumentando o disminuyendo la remoción.

En México se realizó un estudio con plantas macrófitas en donde se observó que las reducciones más significativas se obtuvieron con temperaturas cálidas. Encontrando que el mes de abril fue uno de los meses en los cuales se obtuvieron mayores porcentajes de remoción, en el cual la DBO presentó un porcentaje de remoción del 86% especialmente con la *tatora* y el *carrizo de agua*, en remoción de Nitrógeno fue mejor el carrizo de agua con un porcentaje del 64% y en remoción de Fosforo fue mejor la *tatora* con un porcentaje de remoción del 75,75%.

Uno de los factores más importantes que influye en la capacidad de remoción de contaminantes de las plantas macrófitas, es el clima estacional ya que los mejores

resultados se ven en los meses más cálidos comprendidos entre abril y julio en esta investigación.

Gráficas con palabras clave: (macrophytes, AND wastewater, AND domestic AND wastewater, AND wetland, AND sewage AND water, AND domestic AND effluents).

Gráfico 1. Documentos por año

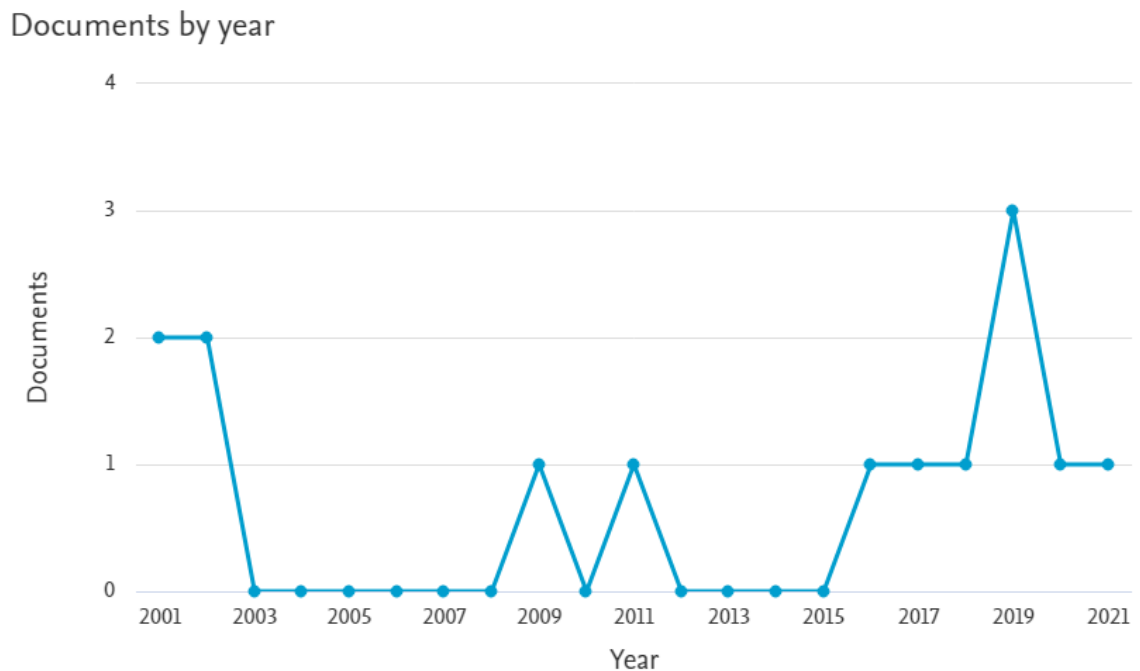


Ilustración tomada de Scopus

Documentos por año de investigación: El interés por parte de la comunidad científica en cuanto a investigación sobre las palabras clave y de interés en esta monografía muestran picos en el aumento y la disminución de forma bastante abrupta. Donde podemos ver la nulidad en los lapsos de tiempo comprendidos entre los 2003 al 2008 y 2012 a 2015; sin embargo, es a partir de este último año que se despierta de nuevo el interés de investigación alcanzando su mayor pico de la veintena en el año 2019.

Gráfico 2. Documentos por países latinoamericanos

Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.

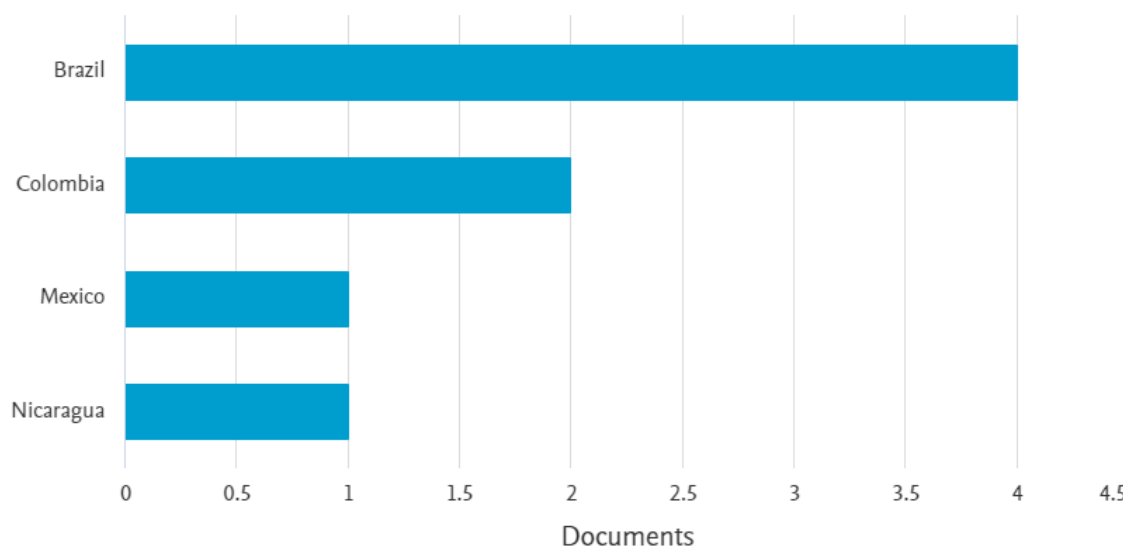


Ilustración tomada de Scopus

Análisis realizado por país de publicación: Sin lugar a duda la investigación en Latinoamérica y el Caribe de las temáticas que involucran esta monografía cuenta con muy pocas publicaciones. Lo que contrasta con la gran cantidad de posibilidades que representaría la implementación de estas prácticas de saneamiento de aguas residuales en esta región. Sin embargo, es alentador que el temático este siendo tomada en cuenta y que Colombia sea el segundo país con representación en los avances e investigaciones. Es probable que la falta de investigación pueda estar relacionada con un déficit de interés o es quizás que no se logra con facilidad la financiación para este tipo de exploración. En Latinoamérica hay unos altos niveles de pobreza en distintos lugares, principalmente en las zonas rurales y dispersas hay mayor afectación en lo concerniente a los procesos de

tratamiento, sería de gran ayuda profundizar en aquellos temas que nos permiten disminuir las disparidades que tenemos entre los cascos urbanos y el sector rural.

Gráfico 3. Documentos por países

Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.

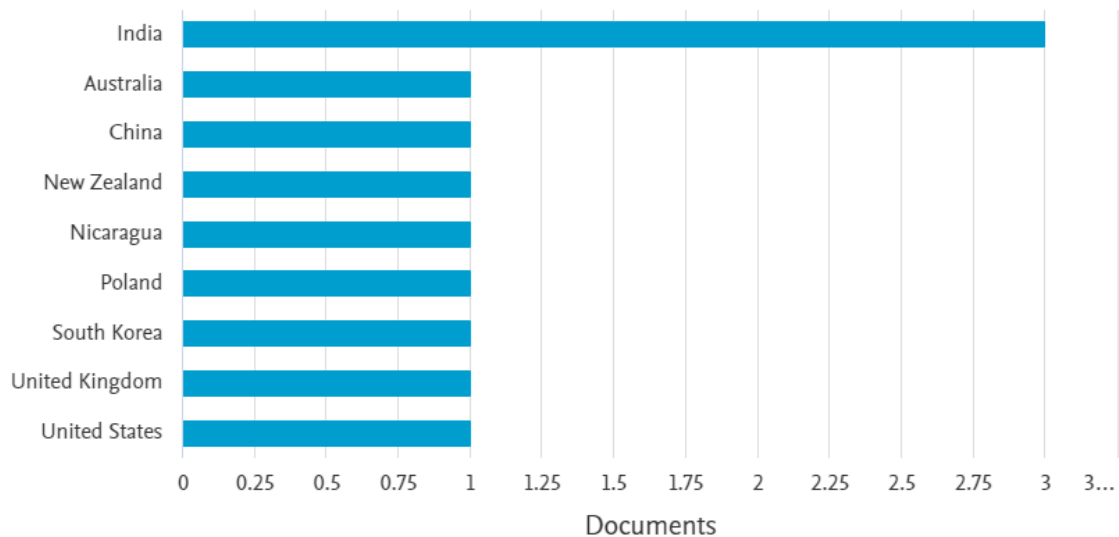


Ilustración toma de Scopus

Análisis realizado por Países a nivel mundial: El Rankin a nivel mundial no muestra mayor diferencia en comparación a los niveles vistos en Latinoamérica y el Caribe; pese a que durante la investigación fueron utilizadas diferentes bases bibliográficas la constante fue el bajo volumen de investigaciones que incorporaran el uso de plantas macrófitas en tratamiento de aguas residuales. Es de notar que la base que permitió una mayor profundización y acceso a la información fue Scholar de Google.

Gráfico 4. Documentos por área temática

Documents by subject area

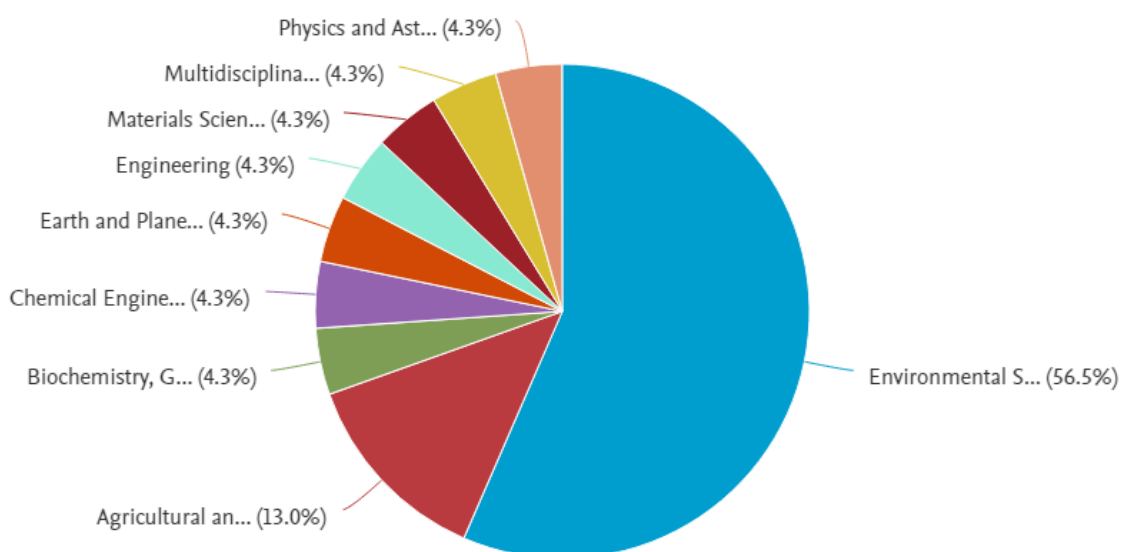


Ilustración tomada de Scopus

Se realiza un análisis según el área de estudio: En esta representación podemos identificar las áreas en las cuales se han realizado estudios a partir de las palabras claves mencionadas en las búsquedas, con resultados esperados y se evidencia el avance que tiene el sector ambiental y sanitario que, a su vez, sorprende la cantidad de indagaciones respecto de otras disciplinas ajenas a esta. Teniendo en cuenta que no solo se trata de un tema de interés para la salud pública, esto demuestra que las plantas macrófitas representan una oportunidad más allá del beneficio sanitario y ambiental.

Gráfico 5. Documentos de otras fuentes de búsqueda

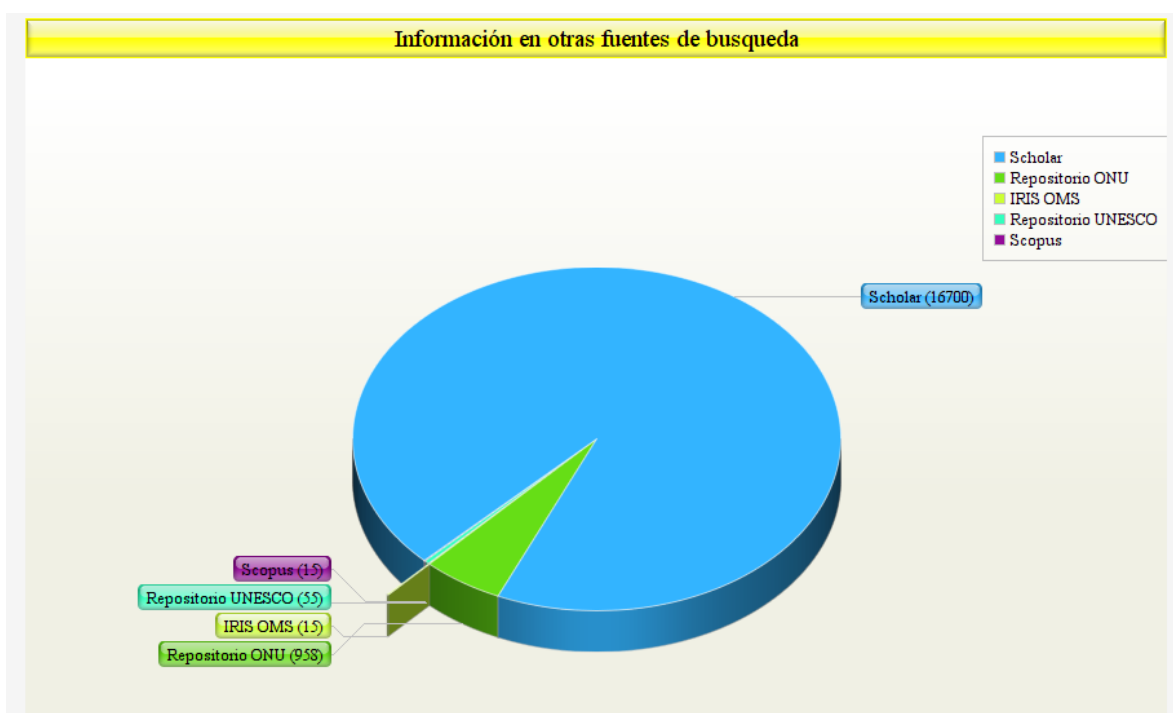


Ilustración realizada con generadordegraficos.com

Análisis fuentes de búsqueda: A partir de la información que brinda esta grafica sobre algunos de los motores de búsqueda utilizados para el desarrollo de esta monografía se observa un mayor número de hallazgos por medio de Scholar, este permite un mayor acceso a la información, pero a su vez cuenta con menos respaldo científico que las otras plataformas.

11. Aguas residuales en el territorio colombiano

Colombia es un país con grandes contrastes sociales, culturales, geográficos y económicos; es por ello por lo que a lo largo y ancho del territorio se pueden encontrar una variedad de tratamientos en las aguas residuales.

11.1 Medellín, Antioquia.

Según el censo de 2020 el departamento de Antioquia contaba con una población de 6, 677,930 de los cuales se desprenden poblaciones con grandes necesidades en la depuración de sus aguas residuales como lo es el distrito especial de ciencia Medellín, en el que se concentra el 38% de la población total del departamento. [93].

Según la entidad prestadora de servicios públicos domiciliarios EMP, actualmente se cuenta con un sistema de tratamiento de depuración de aguas residuales que depura el 84% de las aguas generadas. Este tratamiento comienza en la canalización de las aguas que son llevadas por medio de un sistema de alcantarillado hasta las 3 plantas de tratamiento ubicadas a la orilla del río Aburrá-Medellín y que a su vez son compartidas por los demás municipios del Área Metropolitana [93].

Una vez que son recibidas las aguas en la planta de tratamiento pasan por dos líneas de procesos, una de ellas líquida y una sólida para la remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos:

Línea líquida

En esta línea se realiza un cribado por medio de rejillas que atrapan los residuos (basuras) grandes, luego pasa a un desarenador donde se separa la arena presente en el agua por medio de un proceso llamado sedimentación, esta arena es evacuada en contenedores a un relleno sanitario y el agua continúa su camino para

empezar con el “tratamiento primario”, continua con la “Aireación” y finaliza con la “Sedimentación secundaria” [93].

Tratamiento primario, Sedimentación primaria.

En un tanque sedimentador se da el espacio para que grasas, aceites y espumas floten y los sólidos más pesados se sedimenten en el fondo formando unos lodos. El agua resultante de este proceso tiene una remoción del 60% de los sólidos suspendidos y un 35% de la DBO (Demanda Biológica de Oxígeno) [93].

Aireación

En este proceso se agrega aire a las aguas resultantes, esto ayuda a que los diferentes microorganismos que dependen del oxígeno puedan transformar esta materia orgánica en otros compuestos como H₂O, CO₂, energía y en la reproducción de estos mismos. Este oxígeno requerido para esta etapa es tomado del aire y se lleva al fondo de los tanques donde es inyectado por “sopladores” y distribuido por difusores que lo liberan en forma de burbujas finas [93].

Sedimentación secundaria

En esta etapa el agua resultante del proceso de aireación pasa por unos tanques rectangulares que tienen unos equipos llamados barre lodos que sitúan los lodos en una tolva en la que finalmente se bombean y el agua resultante es vertida al río Aburra-Medellín [93].

Línea de lodos

Los lodos resultantes del primer proceso son tratados inicialmente en las “centrifugas” en donde se les retira la humedad para poder transformarlos en biosólidos y se prepara para la digestión anaeróbica, este proceso estabiliza la materia orgánica “lodos” donde algunos procesos intervienen bacterias anaeróbicas que dan como resultado CO₂, H₂O, BACTERIAS Y BIOGÁS. Para este proceso es necesario que la temperatura sea de unos 36°C con variaciones de un grado +o - [93].

Si bien es uno de los sistemas modelos en el país y cuenta con un gran respaldo, aceptación y presupuesto. Este sistema aun no llega cumplir con la meta trazada de devolverle la vida al río Medellín. Abonando que el sistema está diseñado para aguas residuales domésticas y no industriales (en su mayoría sin tratamiento) como es la realidad [93].

11.2 Guatapé, Antioquia.

Este municipio de tan solo 8709 habitantes es altamente turístico, gracias a las aguas represadas en embalse Peñol-Guatapé; adicionalmente su particular topografía que, aunque hermosa no es la más adecuada para la recolección de sus aguas residuales por medio de una malla de alcantarillado como sucede en otros territorios, sin embargo, en el casco urbano se cuenta con un sistema de recolección y tratamiento de aguas residuales que consta de 3 tanques con tres procesos quietamiento, biodigestión y secado de lodos [94].

En los “islotes” zona rural se cuentan con pozos sépticos lo que aseguraría que el embalse no recibe descargas directas [94].

Este sistema cuenta con la enorme ventaja de tener una población baja a la cual atender, sin embargo, la información de su capacidad de remoción es escasa y no da una clara visibilidad a su eficacia.

11.3 Vereda la Clara Caldas, Antioquia.

La granja porcícola llamada Centro de los Recursos Naturales Renovables La Salada, con el fin de contrarrestar los efectos dañinos que podría tener el vertimiento de las aguas residuales contaminadas con eses y los fuertes olores que emanan al aire circundante causantes de una alta contaminación, se optó por la implementación de un humedal artificial que además de suplir la necesidad de saneamiento aportaba una disminución significativa en los olores propios de la actividad porcícola [95].

La solución adoptada para la depuración de estas cargas contaminantes fue la fitorremediación a través de humedales artificiales. Se primó por el uso de plantas nativas como lo son [95].

- Matandrea (*Zingiberaceae Hedychium montana*)
- Pasto pará (*Gramineae Brachiaria mutica*)
- Cebollita (*Cyperaceae Erioporum schechzeri*)
- Coquito (*Cyperaceae Cyperus rotundus*)
- Flor amarilla semilla (*Asteraceae Taraxacum officinale*)
- Pasto taner (*Gramineae Brachiaria arrecta*)
- Pontederiácea N° 1 (*Pontederiáceae Heterantera sp.*)
- Pontederiácea N°2 (*Pontederiáceae Eichhornia sp.*)
- Coquito miniatura (*Cyperaceae Garex sp.*)
- 1. Flor moradita semilla (*Poligonaceae Peñigonun sp.*) [95]

Con las cuales se llevan a cabo 6 funciones de fitorremediación: Fitoextracción, Rizofiltración, Fitoestabilización, Fitoestimulación, Fitovolatilización y Fitodegradación [95].

En la adaptación de terreno para el humedal artificial fue necesario el uso de diferentes medios granulares como: grava, arenón chino, Vermiculita, Arena y Cisco de arroz. Estos fueron ubicados en capas para simular las condiciones de un humedal [95].

Este piloto fue implementado durante un mes con los siguientes resultados.

- La remoción de DBO fue del 35% exitoso
- La remoción de sólidos suspendidos fue de 50%
- El nitrógeno estuvo entre 59% y 90%
- El fósforo tuvo una remoción del 90% del cual 75% fue captado por los medios granulares y el restante asimilado por las plantas

- Adicionalmente el agua resultante paso de marrón oscuro a un color cristalino traslucido [95].

El mayor acierto fue la selección de las plantas puesto que fueron tomadas de ríos cercanos y contaban con las características necesarias para adaptarse al sistema. Es de tener en cuenta que no solo son las plantas las que intervienen en el proceso si no también otros factores como caracterización de las aguas, los medios granulares, la radiación solar y supervisión periódica del sistema [95].

11.4 El Salguero de Valledupar-Cesar.

La implementación de una laguna anaerobia de oxidación con lentejas de agua (*Lemna Minor* y *Duckweed*) en El Salguero ubicado en el municipio de Valledupar-Cesar como tratamiento secundario para la remoción de contaminantes presentes en las aguas crudas resultantes de la PTAR. Las pruebas que se realizaron buscan determinar la remoción de P y N (nitrógeno y fosforo) [96].

Este estudio fue liderado por el CIDI de la Universidad Popular de Cesar CIDI y tuvo una duración de 15 días, la metodología consistía en tomar 5 muestras de 14L puestas en recipientes con una base de 987,5 cm² por una altura de 14 cm [96].

Posteriormente fueron inoculados con un cultivo de *Duckweed* de una finca ubicada a 4 kilómetros de la laguna, lo que aseguraba que no se estaba implantando una especie invasora que pudiese alterar el ecosistema [96].

La disposición de las muestras fue la siguiente:

Reactor 1,2 y 3 contenían agua proveniente del efluente de la laguna y fue inoculado con *Duckweed* [96].

Reactor 4 contenía agua proveniente de la finca donde se tomaron las *Duckweed* [96].

Reactor 5 contenía agua de la laguna, pero no tubo inoculación [96].

La interacción de *Duckweed* con las aguas a tratar fue observada en un lapso de nueve horas comprendido entre la 7am a 4pm; periodo en el que las plantas realizan una mayor actividad debió a la radiación solar y las funciones derivadas de esta [96].

Resultados.

Remoción superior al 90% de P y N en los primeros 3 reactores en los que se contaba con presencia de las lentejas de agua *Lemna Minor* y *Duckweed* [96].

El reactor 4 tuvo una remoción de tan solo el 43,35% de P y N, pero este pertenecía a la muestra lo que significa que no tenía suficiente alimento para que las plantas realizaran sus funciones de transformación de la materia orgánica en energía, otras plantas CO y O2 [96].

Finalmente, el reactor 5 no presento cambios significativos dado que no contaba con plantas macrófitas y su presencia fue de control efectivo [96].

El aprovechamiento de las plantas macrófitos representa una oportunidad para comunidades y/o viviendas rurales que no cuentan con la capacidad técnica administrativa, y monetaria para implementar sistemas de tratamiento convencionales [96].

El uso de plantas nativas es una constatación que brinda mayor seguridad al entorno y aumenta las posibilidades de éxito del humedal o laguna artificial que se implementa [96].

11.5 México, Los Altos de Jalisco, México.

El estado libre y soberano de Jalisco cuenta con una población de 8,3 millones de habitantes y al igual que muchas otras ciudades cuenta con dificultades para el tratamiento de aguas residuales domésticas; pues según CONAGUA 2010 de los 14,144 Litros/segundo generados, tan solo se tratan 3,493.5 litros/segundo [97].

Con el 16% del territorio de Jalisco, Los Altos desembocan sus aguas residuales al río Verde ubicado en la cuenca Lerma-Chapas-Santiago con una temperatura en sus aguas que oscila entre los 17°C hasta los 26.3°C [97].

El objetivo de esta implementación es la remoción en los siguientes parámetros:

- PH
- DQO 5 Días
- Nitrógeno total
- Fosforo total
- Grasas y aceites

El tiempo de retención definido fue de 3, 5 y 7 días, y cuatro evaluaciones realizadas en los meses de diciembre 2010, abril 2011, julio 2011 y noviembre de 2011 [97].

Las plantas seleccionadas fueron:

- El carrizo común (*Phragmites australis*)
- El gladiolo (*Gladiolus spp*)
- La totora (*Typha latifolia*) [97].

Para el experimento se utilizaron plantas con 1m de altura de c/u de las especies, en el día 0 a estas se les agregaron 15 litros de agua cruda. La temperatura media en el primer mes de monitoreo diciembre de 2010 fue de 17°C, de abril de 2011 fue de 26°C, en el mes de julio de 24,3°C y finalmente en noviembre 2011 de 19,4°C [97].

Los resultados son satisfactorios y revelan lo siguiente:

Los meses de con mayor temperatura fueron abril y julio en los cuales se registró mayor remoción en menor tiempo.

Tabla 9. PH.

	pH día 0			pH día 3			pH día 5			pH día 7		
	T	G	C	T	G	C	T	G	C	T	G	C
Diciembre 2010 TEM=1 7°C		7.4	7.2	7.4	7.2	7.2	7	7.2	7.2	6.8	6.	7
Abril 2011 TEM=2 6.3°C		7.4	7.2	7.4	7.2	7.2	7	7.2	7.2	6.8	6.	7
Julio 2011 TEM=2 4.3°C		7.4	7.2	7.4	7.2	7.2	7	7.2	7.2	6.8	6.	7
Noviembre 2011 TEM=1 9.4°C	7.	7.4	7.2	7.4	7.2	7.2	7	7.2	7.2	6.8	6.	7

Tabla 7. Resultados observados en cambios de pH en segmentos trimestrales

Ligeramente alcalino a neutro

Tabla 10. Remoción DQO.

	DQO día 0			DQO día 3			DQO día 5			DQO día 7		
	T	G	C	T	G	C	T	G	C	T	G	C
Diciembre 2010 TEM=(17°C)	0	0	0	31	32.2	33.3	37.5	62.2	65.5	67	80.6	82.2
Abri 2011 TEM=(26.3°C)	0	0	0	70.6	43.6	45.8	84.8	50.6	69.7	86.7	66.7	86.1
Julio 2011 TEM=(24.3°C)	0	0	0	68.6	40.1	44	83.1	48.7	68.2	86.1	65.3	85
Noviembre 2011 TEM=(19.4°C)	0	0	0	83.3	66.6	37.7	83.1	64.1	40	69.4	43.7	37.8

Tabla 8. Resultados observados en cambios de DQO en cuatro semanas ubicadas cada 3 meses en las cuatro estaciones y sus cambios de temperatura como principal variante en la remoción.

Tabla 11. Remoción N.

	N día 0			N día 3			N día 5			N día 7		
	T	G	C	T	G	C	T	G	C	T	G	C
Diciembre 2010 TEM=(17°C)	0	0	0	6	5	5	2	1	2	3	2	30
Abr 2011 TEM=(26.3°C)	0	0	0	1	8	9	3	2	2	5	3	45
Julio 2011 TEM=(24.3°C)	0	0	0		7	1	3	1	3	5	3	64
Noviembre 2011 TEM=(19.4°C)	0	0	0	1	6	2	2	2	2	4	3	48

Tabla 8. Remoción de nitrógeno observada en las cuatro semanas de monitoreo realizadas durante los meses de diciembre abril julio y noviembre

Tabla 12. Remoción P.

	N día 0			N día 3			N día 5			N día 7		
	T	G	C	T	G	C	T	G	C	T	G	C
Diciembre 2010 TEM=(17°C)	0	0	0	36	15	22	51	22	41	62	38	48
Abr 2011 TEM=(26.3°C)	0	0	0	42	19	39	68	50	50	75.75	68	51
Julio 2011 TEM=(24.3°C)	0	0	0	40	18	35	65	50	44	72	59	51
Noviembre 2011 TEM=(19.4°C)	0	0	0	39	16	32	60	46	43	67	58	48

Tabla 13. Remoción grasas y aceites

	T	G	C	T	G	C	T	G	C	T	G	C
Diciembre 2010 TEM= (17 °C)	0	0	0	10	19	38	13	30	51	15	41	62
Abr 2011 TEM= (26.3°C)	0	0	0	31	28	41	38	35	67	55	59	75.5
Julio 2011 TEM= (24.3°C)	0	0	0	29	28	39	40	35	64	60	55	72
Noviembre 2011 TEM= (19.4°C)	0	0	0	16	21	39	25	31	60	50	45	67

Tabla 11. La remoción de grasas y aceites también varía según la radiación solar y los picos de temperatura reportados durante los meses de en los que se hizo el monitoreo

Cabe resaltar que en este tratamiento se aprovecharon factores adicionales como la radiación solar, la intervención de microorganismos presentes en raíces y lecho del humedal.

12. Conclusión

En la actualidad se hace imprescindible poder contar y proponer tecnologías más eficientes y que puedan resultar económicamente sustentables para el tratamiento de aguas residuales, ya que la población seguirá creciendo y así mismo la necesidad de aprovechar correctamente los recursos. Con este documento se logra visualizar las diferentes experiencias, condiciones y resultados de la implementación de plantas macrófitas para enfrentar la problemática ambiental que generan las aguas residuales domésticas generada por la acción antrópica. En las aplicaciones recopiladas a lo largo de la monografía se puede observar la capacidad depuradora de los humedales artificiales y su microbioma asociado en cuanto la remoción de materia orgánica. Su aplicación podría llegar a significar una solución bajo las condiciones apropiadas de carácter social y económico, disponibilidad de terrenos adecuados, acceso técnico para la implementación y disponibilidad de especímenes que no generen un daño ecológico. Su implementación como servicio sanitario es posible pero continua en investigación.

De igual manera para que el uso de estas plantas se pueda efectuar de una manera adecuada, se deben realizar diversos estudios el cual garantice que la inclinación del terreno sea la adecuada, el tipo de planta a utilizar en el tratamiento, los sistemas de tratamientos que acompañaran este método, estudios meteorológicos de la zona donde se llevara a cabo, el tiempo de retención del agua. De esta manera, se puede determinar que este sistema de tratamiento es multifactorial, ya que hay muchos factores que intervienen y, por lo tanto, no es preciso afirmar que se ha completamente viable.

El uso de plantas macrófitas puede llegar hacer un tratamiento que se puede efectuar en muchas zonas principalmente en las áreas rurales donde el problema del saneamiento básico es más precario, obviamente esto cambia de acuerdo con la zona, ya que está comprobado que es más rápido en las zonas de temperatura cálida. Uno de los problemas más importantes de estas plantas es que son invasoras y pueden traer más inconvenientes, por eso es importante la elección de una planta adecuada y que preferiblemente que sea endémica.

Observando las diferentes alternativas de tratamiento puede concluirse que para las zonas rurales que suelen ser las más problemáticas en las diferentes regiones de Latinoamérica, la mejor opción son los humedales construidos con las plantas enraizadas y flotantes.

Sin embargo, el reto trasciende lo individual y debe darse un liderazgo desde lo institucional, para que dichos tratamientos sean vigilados y acompañados por las autoridades pertinentes según el territorio. La puesta en funcionamiento de los humedales requiere una inversión sensible a condiciones variables como; las diferentes necesidades de la población, sin embargo, puede recomendarse para pequeñas comunidades a modo experimental realizando una constante vigilancia, sugiriendo el reemplazo o retiro de plantas que tengan mucha reproducción. Además de requerir una investigación previa para conocer las plantas nativas que puedan ser parte del tratamiento.

Mas allá de del uso o no de estas plantas el fin es la protección, el reúso y limpieza de un bienpreciado y difícil de renovar.

13. Referencias.

1. Nico Saporiti Y Eleanor Robins. Aumentar la reutilización del agua: por qué tiene sentido reciclar nuestras aguas residuales: Banco mundial blogs [internet] 2021 [citado 2022 Febrero 02] Disponible en: <https://blogs.worldbank.org/es/voces/aumentar-reutilizacion-del-agua-reciclar-aguas-residuales>
2. Koncagül, Engin, Tran, Michael, Connor, Richard. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: UNESCO [internet] 2021 [citado 2022 Febrero 02] Disponible en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_spa/PDF/375751spa.pdf.multi
3. UNESCO, Water, Megacities & Global Change. Portraits of 15 Emblematic Cities of the World: UNESCO [internet] 2016 [citado 2021 Septiembre 25] Edición deuxième ISBN 978-92-3-300111 Paris, Francia. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367868/PDF/367868spa.pdf.multi>
4. UNESCO, Gretchen Kalonji; Jefe de Redacción: Susan Schneegans; Coordinador de la versión española: Lic. Frank Ortiz Rodríguez – Realización: Mirian Querol y Lic. Perfecto O. Dipotet Alonso. Traducido del inglés por: Adriana Montenegro Boletín trimestral de información sobre las ciencias exactas y naturales Vol. 10, No. 4 París Cedex 15, Francia Un mundo de ciencia [internet] 2012 [citado 2022 febrero 01] Un Mundo de ciencia, vol. 10, no. 4 Disponible en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000218053_spa?10=null&queryId=32fa8156-5a52-4ec7-a1aa-1aa824a8b156
5. Esperanza Morales Potencial De Plantas Acuáticas En El Tratamiento De Aguas Residuales Vol. 4, No. 2, Colombia: Ciencia y Tecnología [internet] 1986 [citado 20 de Marzo 2022] Disponible en: <http://repositorio.minciencias.gov.co/bitstream/handle/11146/1553/1986-V4-N2-Articulos-Art%202.12.pdf?sequence=1>
6. Caviedes Rubio DI, Universidad Cooperativa de Colombia, Delgado DR, Olaya Amaya A, Universidad Cooperativa de Colombia, Universidad Surcolombiana. Remoción de metales pesados comúnmente generados por la actividad industrial, empleando macrófitas neotropicales. Prod limpia [Internet]. 2016 [cited 2022 Oct 6];11(2):126–49. Available from: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552016000200012
7. Pedraza H, Tania M. Eficiencia de Eichornia spp y Lemna spp nativas en humedales artificiales en la remoción de sulfonato de alquilensenos lineal de los detergentes presentes en aguas residuales domésticas, Moyobamba - 2017. Universidad Nacional de San Martín-Tarapoto; 2018. Available from: <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/2790> lbenceno lineal de los

- detergentes presentes en aguas residuales domésticas, Moyobamba -2017 (unsm.edu.pe)
8. M. Meerhoff, Mazzeo N. Importancia de las plantas flotantes libres de gran porte en la conservación y rehabilitación de lagos someros de Sudamérica: Ecosistemas [Internet]. 2020 [citado 2021 Septiembre 25];13(2). Disponible en:
<https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/209>
 9. The role of macrophytes in wetland ecosystems Ecol. Field Biol. 34(4): 333-345, 2011 JEFB journal of ecology and field biology, Eliška Rejmánková* Department of Environmental Science and Policy, University of California Davis, One Shields Avenue, Davis, CA 956 16, USA Disponible en:
<https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO201101152701538.pdf>
 10. EcuRed Aguas Residuales Cuba [internet] 2011 [citado 2021 Oct 12] Aguas residuales Disponible en: https://www.ecured.cu/Aguas_residuales
 11. Mundial B. Saneamiento: Panorama general [Internet]. World Bank. 2019 [citado 2021 Marzo 23]. Disponible en:
<https://www.bancomundial.org/es/topic/sanitation#1>
 12. WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas), Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. UNESCO [internet] 2017 [citado 2022 Enero 05] Disponible en:
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647?posInSet=1&queryId=475402dd-f553-4822-aec3-18a03920ea92>
 13. Rodríguez D, Serrano H, Delgado A, Nolasco D, Saltiel G. De residuo a recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe. Bancomundial.org [Internet]. 2018;63. [citado 13 de Feb de 2022] Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/33436>
 14. Departamento Nacional de Planeación. Documento CONPES 2767 [Internet]. Gov.co. 22/03/ 1995 [citado 27 de Septiembre de 2021]. Disponible en:
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/2767.pdf>
 15. Carolina D, Uribe Botero E. Evolución del servicio de acueducto y alcantarillado durante la última década [Internet]. Core.ac.uk. [citado 2022 Sep 13]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/6395231.pdf>
 16. De Servicios S, Domiciliarios P. Informe nacional de coberturas de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo -2020 [Internet]. Gov.co. [citado 2022 Sep 12]. Disponible en:
https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/2020_agua_lineamientos_22_05_2020.pdf
 17. Ministro de Vivienda C y. T. Lineamientos e indicadores para la formulación de metas de cobertura, calidad, continuidad y aseguramiento en el acceso a agua potable y saneamiento básico [Internet]. Gov.co. 2020 [citado 2022 Aug 22]. Disponible en:

https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/2020_agua_li neamientos_22_05_2020.pdf

18. CRA "Documento de avance de análisis de impacto normativo Bogotá D.C" [internet] 2019 [citado 2021 Septiembre 04] Disponible en: [AIN-FINAL-VERTIMIENTOS-16122019.pdf \(cra.gov.co\)](https://www.cra.gov.co/AIN-FINAL-VERTIMIENTOS-16122019.pdf)
19. Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2020 [Internet]. Gov.co. 2021 [citado 2022 Sep 8]. Disponible en: https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe_sectorial_aa_30-12-21_vf%20%281%29.pdf
20. Ricardo José Lozano Picón, María Claudia García Dávila, Yolanda González Hernández, Nelson Omar Vargas Martínez, Luis Carlos Delgado Estudio nacional de Agua ENA 2018 Bogotá, Colombia [internet] 2018 [citado 2021 Septiembre 30] Disponible en: http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf
21. Departamento nacional de planeación. Conpes 4004 economía circular en la gestión de los servicios de agua potable y manejo de aguas residuales [internet]. Gov.co. 2020 [cited 2022 sep 10]. Available from: <https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/conpes/econ%c3%b3micos/4004.pdf>
22. Informe Nacional De Calidad Del Agua, Informe, Humano C, Delegado S, Acueducto P, Aseo AY, Amanda K, et al. Informe Nacional de Calidad del Agua para Consumo Humano INCA 2020 [Internet]. Gov.co. 2020 [cited 2022 Oct 8]. Available from: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/inca-consumo-calidad-agua-2020.pdf>
23. Alejandro M, Departamento de Fisiología, Biología Molecular y Celular Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Universidad de Buenos Aires, Fitorremediación Agrobiotecnología 2011. [Internet] Disponible en: Fitorremediacion | PDF | Contaminación | Plantas (scribd.com) <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/29400>
24. Quispe Q, Winston A. Diseño y construcción de humedal artificial para la recuperación de aguas residuales en la población de alcalá. Rev Cien Tec In [Internet]. 2021 [citado 2022 Sep 1];19(24):133–48. Disponible en: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?Pid=S2225-87872021000200009&script=sci_arttext
25. Erika Vanessa Vanegas Gómez Universidad Nacional Abierta y A Distancia –UNAD Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y De Medio Ambiente ECAPMA Ingeniería Ambiental Puerto Gaitán, [Internet] mayo 2020 [citado 2021 sept 3]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/35009/evvanegasg.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
26. Canada.ca. [citado 2022 Sep 12]. Disponible en: <http://bitly.ws/vHJP>
27. WWAP. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás [Internet]. UNHCR. 2019 [citado 2021 Spring 3]. Disponible en: <http://bitly.ws/vHJP>

28. Departamento Nacional de Planeación. Documento CONPES 3810 [Internet]. Gov.co. 2014 [citado 19 de enero 2022]. Disponible en: <https://www.minvivienda.gov.co/normativa/conpes-3810-2014>
29. Sarantuyaa Zand IDA-EJ. Iniciativa Internacional sobre la Calidad del Agua [Internet]. Unesco.org. 2015 [citado el 14 de febrero de 2021]. Disponible en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000243651_spa?2=null&queryId=47e77c13-90b5-4ddc-837a-7fb4bb783889
30. OMS. Saneamiento [Internet]. Who.int. 2019 [citado el 14 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/sanitation>
31. Raffo Lecca, Eduardo, Ruiz Lizama, Edgar Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. Lima, Perú Industrial Data, [internet] 2014 [citado el 18 de Enero 2022] vol. 17, Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81640855010>
32. Matassa, S., Batstone, D.J., Hülsen, T., Schnoor, J., and Verstraete, W. (2015b). Platforms for energy and nutrient recovery en domestic wastewater: A review [Internet]. Aguasresiduales.info. [citado el 14 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/la-estacion-depuradora-de-aguas-residuales-del-siglo-xxi>
33. Batstone, D.J., Hülsen, T., Mehta, C.M., and Keller, J. (2015a). Platforms for energy and nutrient recovery en domestic wastewater: A review. Chemosphere 1402-11. Platforms for energy and nutrient recovery en domestic wastewater: A review. Chemosphere 1402-11 [internet] 2015 [citado 13 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25455679/>
34. Cordell, D., Drangert, J.-O., and White, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Global Environmental Change [internet] 2009 [citado 19 de Enero 2022] 19(2), 292-305. Disponible en: <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/la-estacion-depuradora-de-aguas-residuales-del-siglo-xxi>
35. Sáez* y Joheni A. Urdaneta G. A. Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe [Internet]. <https://www.redalyc.org/pdf/737/73737091009.pdf>. 2014 [citado 2022 Sep 13]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/737/73737091009.pdf>
36. Cárdenas Calvachi GL, Sánchez Ortiz IA. Vista de Nitrógeno en aguas residuales: Orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública [Internet]. Edu.co. 2013 [citado el 19 de enero de 2022]. Disponible en: https://revistas.udenar.edu.co/index.php/usalud/article/view/375/pdf_21
37. Zandaryaa, S.; Mateo-Sagasta, Javier. Organic matter, pathogens, and emerging pollutants. CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems (WLE). [internet] 2018 [citado 10 de diciembre de 2021] pp.125-138. Disponible en: <https://wle.cgiar.org/organic-matter-pathogens-and-emerging-pollutants>

38. UNESCO, ONU-Agua Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático [internet] 2020 [citado 13 de Diciembre de 2021] Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611.locale=es>
39. J.E. Sánchez-Ramírez1*, Josep Ribes3, José Ferrer4, Mª Francisca García-Usach Obtención de los principales parámetros del agua residual urbana empleados en los modelos matemáticos de fangos activados a partir de una caracterización analítica simple [internet] 2017 [citado 09 de Feb 2022] Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6662298>
40. Metcalf and Eddy, Inc, Asano, T., Burton, F. L., Leverenz, H., Tsuchihashi, R., & Tchobanoglous, Water Reuse Issues, Technologies, and Applications [internet] 2007 [citado 09 de Feb 2022] Disponible en: https://www.academia.edu/download/58801387/Metcalf_Eddy_Inc_an_AECOM_Company_Takashi_Asb-ok.xyz.pdf
41. Rodriguez Rodriguez, Abad, Mau Inchaustegui, Silvia Piedra Castro, Lilliana Jimenez Montealegre, Ricardo Herrera Vargas, Juan Pablo Aislamiento de cepas bacterianas oxidantes de amonio y nitrito del suelo y su uso potencial en la reducción de nitrógeno en las aguas residuales domesticas Revista de biología tropical [internet] 2017 [citado 19 de Ene 2022] Vol.65 (4), p.1527. Disponible en: <http://bitly.ws/vHJP>
42. Almicar Muñoz Cruz Caracterización y tratamiento de aguas residuales Monografía universidad Autónoma del estado de Hidalgo [internet] 2008 [citado 19 de Ene 2022] Disponible en: <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/514/?sequence=1>
43. Henry, G y Heinke, G. Ingeniería Ambiental. Traducido por Héctor Escalona y García. [Internet] 1999 [citado 14 de Diciembre de 2021] 778 p. Disponible en: <http://bitly.ws/vHJN>
44. Miguel Espigares García; R Gálvez; José A Pérez López. Aspectos sanitarios del estudio de las aguas [internet] 1985 [citado 14 de Diciembre de 2021] Disponible en: https://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf
45. Paul Jeffrey, Marie Raffin, Alfieri Pollice, Yvan Poussade, Emmanuel Van Houtte, Jordi Bacardit, Kristell Le Corre Pidou. Water Reuse Europe Review [internet] 2018 [citado 14 de Diciembre de 2021] Disponible en: https://www.water-reuse-europe.org/wp-content/uploads/2018/08/wre_review2018_final.pdf
46. Manzoor Qadir Addressing Trade-offs to Promote Safely Managed Wastewater in Developing Countries Water Economics and Policy, [internet] 2018 [citado 14 de Diciembre de 2021] Vol. 4, No. 2 Disponible en: <http://bitly.ws/vHJM>
47. Carmen Yee-Batista especialista en agua y saneamiento del Banco Mundial Un 70% de las aguas residuales de Latinoamérica vuelven a los ríos sin ser tratadas [internet] 2013 [citado 19 de Enero 2022] Disponible en:

<https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/01/02/rios-de-latinoamerica-contaminados>

48. Alfonso Alvestegui Reutilizar y reducir: en busca de un mejor tratamiento de las aguas residuales en Bolivia. [internet] 2020 [citado 19 de Ene 2022] Disponible en: <https://blogs.worldbank.org/es/latinamerica/reutilizar-y-reducir-en-busca-de-un-mejor-tratamiento-de-las-aguas-residuales-en>
49. Banco Interamericano de Desarrollo, María Eugenia de la Peña Jorge Ducci Viridiana Zamora Tratamiento de aguas residuales en México [internet] 2013 [citado 19 de Enero 2022] Disponible en: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Tratamiento-de-aguas-residuales-en-M%C3%A9xico.pdf>
50. Ángela María Escarria Sanmiguel, Andrea Yolima Bernal Pedraza, Carlos Andres Daniels Jaramillo, Daniel Monsalve Ortiz, Hermes Dario Cruz Gomez, Jesus Leandro Tarazona Moncada, Carolina Borrero Ortiz Plan Nacional de Abastecimiento de Agua Potable Y Saneamiento Básico Rural [internet] 2021 [citado 19 de Enero 2022] Disponible en: <https://minvivienda.gov.co/system/files/consultasp/plan-nacional-apsbr.pdf>
51. Departamento Nacional de Planeación. informe anual de avance en la implementación de los ODS en Colombia [Internet]. Ctfassets.net. 2020 [cited 2022 Oct 3]. Available from: https://assets.ctfassets.net/27p7ivvbl4bs/31ciOsgZW3bQ80Ke8zge50/ebed988a05545bdffbd2357675ab25ea/Informe_ODS_2020.pdf
52. World Bank Group. El agua residual puede generar beneficios para la gente, el medioambiente y las economías, según el Banco Mundial [Internet]. World Bank Group. 2020 [citado el 19 de enero de 2022]. Disponible en: <http://bitly.ws/vHJJ>
53. Nuevos enfoques para la disposición final de aguas residuales en América Latina y el Caribe [Internet]. Paho.org. 1985 [cited 2022 Sep 9]. Available from: <https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/15861/v98n1p34.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
54. Cavallini JM. SISTEMAS INTEGRADOS DE TRATAMIENTO Y USO DE AGUAS RESIDUALES EN AMÉRICA LATINA: REALIDAD Y POTENCIAL [Internet]. Upf.br. [cited 2022 Oct 10]. Available from: http://cbhpf.upf.br/phocadownload/simposio/dr_moscovo_cavallini.pdf
55. Hutton, Guy, Haller, Laurence & World Health Organization. Evaluation of the costs and benefits of water and sanitation improvements at the global level [internet] 2004 [citado 20 de enero 2022] Disponible en: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/68568>
56. Comisión Europea (2015) Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y Al Comité de las Regiones. [internet] 2015 [citado 17 de Ene 2022] Disponible en: https://www.academia.edu/63589505/Reutilizaci%C3%B3n_de_aguas_rege neradas_en_el_marco_de_la_planificaci%C3%B3n_hidrol%C3%B3gica

57. Mercedes Echegaray; Adrián Pérez-Barbón; Virtudes Martínez-Hernández; María Del Carmen Cabrera Santana; Lucila Candela; Irene DE BUSTAMANTE Reutilización de aguas regeneradas en el marco de la planificación hidrológica [internet] 2016 [citado 15 de diciembre de 2021] Disponible en: <http://bitly.ws/vHJH>
58. Zurita-Martínez F, Castellanos-Hernández O, Rodríguez-Sahagún A. El Tratamiento De Las Aguas Residuales Municipales En Las Comunidades Rurales De México* Municipal Wastewater Treatment In Rural Communities In México [Internet]. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v2nspe1/v2spe1a11.pdf>
59. Jaqueline J, De La Hoz P, Vidal A. Excreta and Wastewater Management in Rural Communities. Effects On Public Health [Internet]. [citado 2022 Jul 11]. Disponible en: <http://bitly.ws/vHJF>
60. Guía para la implementación RURAL HACIA UN CAMBIO DE ENFOQUE EN EL SANEAMIENTO RURAL INDIVIDUAL [Internet]. [cited 2022 Oct 8]. Available from: https://www.asirsaba.com.co/wp-content/uploads/2019/02/4.-Documento-SANEAMIENTO-RURAL_OK_23.01.20191.pdf
61. Mercedes Echegaray; Adrián Pérez-Barbón; Virtudes Martínez-Hernández; María Del Carmen Cabrera Santana; Lucila Candela; Irene DE BUSTAMANTE Reutilización de aguas regeneradas en el marco de la planificación hidrológica [internet] 2016 [citado 15 de diciembre de 2021] Disponible en: https://www.academia.edu/63589505/Reutilizaci%C3%B3n_de_aguas_regeneradas_en_el_marco_de_la_planificaci%C3%B3n_hidrol%C3%B3gica
62. 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 Ingeniería Civil Bogotá D.C. 2018 [Internet]. [citado 2022 Jul 11]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/160741286.pdf>
63. Zurita-Martínez F, Castellanos-Hernández O, Rodríguez-Sahagún A. El Tratamiento De Las Aguas Residuales Municipales En Las Comunidades Rurales De México* Municipal Wastewater Treatment In Rural Communities In México [Internet]. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v2nspe1/v2spe1a11.pdf>
64. Joaquín Suárez López, Alfredo Jácome Burgo, Héctor del Río Cambeses, Daniel Torres Sánchez, Pablo Ures Rodríguez. El Reciclaje de aguas grises como complemento a las Estrategias de gestión sostenible del agua en el medio Rural. Researchgate.net. [citado el 6 de julio de 2022]. Disponible en: <http://bitly.ws/vHJD>
65. Noyola A. Tendencias en el tratamiento de aguas residuales domesticas en Latinoamérica [Internet]. Sistemamid.com. [citado 2022 Jul 10]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/266883981_EI_TENDENCIAS_EN_EL_TRATAMIENTO_DE_AGUAS_RESIDUALES_DOMESTICAS

66. Torres, Patricia. Perspectives of anaerobic treatment of domestic wastewater in developing countries [Internet]. Redalyc.org. [citado 2022 Jul 10]. Disponible en: <http://bitly.ws/vHJC>
67. Escalante-Estrada VE, Garzón-Zúñiga MA, Valle-Cervantes S. Remoción de macronutrientes en el tratamiento de aguas residuales porcícolas. Ra Ximhai [Internet]. 2012 Dec 31;75–82. Disponible en: <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1909>
68. Urbanas R. Directiva 91/271/Cee Sobre El Tratamiento De Las Aguas [Internet]. Gob.es. [citado 2022 Jul 13]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/agua/publicaciones/03_Manual_Directiva_91_271_CEE_tcm30-214069.pdf
69. El Aya Universidades Cámaras y Los Bancos MSAHP, desarrollo BID B y. K. Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales [Internet]. Aya.go.cr. 2016 [citado 2022 Jul 3]. Disponible en: <http://bitly.ws/vHJA>
70. Delgado RC. Reglamento ley recursos hídricos usos y aprovechamiento del agua [Internet]. Gob.ec. [citado 2022 Jul 12]. Disponible en: <http://bitly.ws/vHJy>
71. Plan nacional de saneamiento básico rural - SANEBAR [Internet]. Ircwash.org. [citado 2022 Jul 11]. Disponible en: <https://es.ircwash.org/resources/plan-nacional-de-saneamiento-b%C3%A1sico-rural-sanebar>
72. Decreto Supremo Ni 031-2010-SA [Internet]. Gob.pe. [citado 2022 Jul 11]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minsa/normas-legales/244805-031-2010-sa>
73. Plan Nacional De Saneamiento Básico [Internet]. Ircwash.org. [citado 2022 Jul 11]. Disponible en: <https://www.ircwash.org/sites/default/files/827PE86-4271.1.pdf>
74. Joco AI, Fernández C, Gandullo R. Macrófitas acuáticas vasculares del sistema de drenaje del Alto Valle de Río Negro, Patagonia (Argentina). Revista del Museo de La Plata [Internet]. 2018 [citado el 7 de abril de 2022];3(2):296–308. Disponible en: <https://publicaciones.fcnym.unlp.edu.ar/rmlp/article/view/2198/0>
75. Delgadillo M, Condori L. Planta de tratamiento de aguas residuales con macrófitas para comunidades cercanas al Lago Titicaca. Rev. Boli Ciencias. 2010;63–6.
76. Fernández-González J. Capítulo 6. Humedales artificiales para depuración. Man Fito depuración Filtros macrófitas en Flota. 2009;79–89.
77. Callo huanca MA. Uso de macrófitas flotantes en la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfatos de las aguas residuales de Puno. 2018; Disponible en: <http://bitly.ws/vHJx>
78. Marte J, Lara J. Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte. ING y Cienc [Internet]. 2012;8(15):221–43. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v8n15/v8n15a11.pdf>
79. Katherine Bedoya-Urrego José M. Acevedo-Ruiz2 Carlos A. Peláez-Jaramillo Sonia del Pilar Agudelo-López Caracterización de biosólidos

- generados en la planta de tratamiento de agua residual San Fernando, Itagüí (Antioquia, Colombia) [internet] 2013 [citado 11 de enero 2022]. Disponible en: <https://www.scielo.org/article/rsap/2013.v15n5/778-790/>
80. Ramos-Espinosa MG, Rodríguez-Sánchez LM, Martínez-Cruz P. Uso de macrófitas acuáticas en el tratamiento de aguas para el cultivo de maíz y sorgo. *Hidrobiológica*. 2007;17(1 SUPPL.):7–15.
 81. Castañeda A, Flores H. Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante plantas macrófitas típicas en Los Altos de Jalisco, México. *Palatka Rev Tecnol y Soc*. 2013;3(5):13.
 82. Castañeda Villanueva A, Flores López H. Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante plantas macrófitas típicas en Los Altos de Jalisco, México. *PAAKAT Rev. Tecol y Soc*. 2013;3(5):2.
 83. Garavito Bermúdez GI, Ospina Romero LV, Ospina Mora DC. Evaluación de un sistema a escala laboratorio, de un filtro de macrófitas en flotación como tratamiento de aguas residuales de un autolavado. *Rev. Logos, Cien Tecnol*. 2019;12(1):10–20.
 84. J Internacional S, Residuales A. Evaluación del efecto del tratamiento con plantas acuáticas (. 1987;193–201).
 85. Carlos J, Aracelly C. del agua residual doméstica con humedales construidos experimentales plantados con *Cyperas ligularis* (Cyperaceae) y *Echinochloa colonum* (Poaceae). 2016; VII:93–103.
 86. Hidalgo J, Montano J, Estrada M. RECENT APPLICATIONS OF WASTEWATER BY MEANS. *Theoria* [Internet]. 2005;14(ISSN 0717-196X):17–25. Disponible en: <http://bitly.ws/vHJw>
 87. Marteo J, Lara J. Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte. *Ing y Cienc* [Internet]. 2012 [citado 2022 abril 7]; 8(15):221–43. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v8n15/v8n15a11.pdf>
 88. Artunduaga OAS. Humedar i: alternativa innovadora de bajo costo para depurar aguas residuales en países en vía de desarrollo. *Revista ambiental agua, aire y suelo* [Internet]. 2013 [citado 2022 agosto 31];1(1). Disponible en: https://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RA/article/view/134/131
 89. Mena-Sanz J. Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos. *Conapa*. 2008;25.
 90. . Castrillón YUL. Estado del arte. *Energía eólica*. 2019;27–66.
 91. Carlos J, Johan RJ, De Aguas M. Configuración territorial de las provincias de Colombia Ruralidad y redes [Internet]. *Cepal.org*. [citado el 13 de septiembre de 2022]. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40852/S1700637_es.pdf?sequence=4&isAllowed=y
 92. Cehum.org. [citado el 13 de septiembre de 2022]. Disponible en: <http://bitly.ws/vHJv>

93. Garavito Bermúdez GI, Universidad Libre, Bogotá, Colombia, Ospina Romero LV, Ospina Mora DC, Universidad Libre, Bogotá, Colombia, Universidad Libre, Bogotá, Colombia. Evaluación de un sistema a escala laboratorio, de un filtro de macrófitas en flotación como tratamiento de aguas residuales de un autolavado. Rev logos cienc tecnol [Internet]. 2019;12(1):10–21. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/logos/v12n1/2422-4200-logos-12-01-10.pdf>
94. CORNARE descripción ambiental municipio de Guatapé Antioquia, Colombia [internet] 2011 [citado 14 de enero 2022]. Disponible en: <http://bitly.ws/vHJu>
95. Arias Martínez, Sergio Adrián Betancur Toro, Ferney Mauricio Gómez Rojas, Gonzalo, Salazar Giraldo, Juan Pablo Hernández Ángel, Marta Lucía" Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas Caldas, Antioquia [internet] 2019 [citado 20 de enero 2022]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11404/3250>
96. Vista de Evaluación de la utilización del duckweed como alternativa de postratamiento de aguas residuales domesticas en efluentes de lagunas de oxidación [Internet]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. [citado el 13 de septiembre de 2022]. Disponible en: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/nova/article/view/438/1111>
97. Aldo Antonio Castañeda Villanueva, Hugo Ernesto Flores López Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante plantas macrófitas típicas en Los Altos de Jalisco, México Los Altos de Jalisco, México Paakata Revista de tecnología y sociedad Universidad de Guadalajara. [internet] 2019 [citado 26 de enero 2022]. Disponible en: Dialnet-TratamientoDeAguasResidualesDomesticasMediantePlan-5815442.pdf