



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES COMO
ALTERNATIVA AL ESTRÉS HÍDRICO EN
COLOMBIA**

Juan Felipe Villa Hoyos

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería, Escuela ambiental,
Especialización en manejo y gestión del agua

Medellín, Colombia

2020



Reúso de las aguas residuales como alternativa al estrés hídrico en Colombia

Juan Felipe Villa Hoyos

Trabajo de monografía presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en manejo y gestión del agua

Asesor (a):

Jorge Mario Berrio Restrepo – Ingeniero de Producción Biotecnológica, M.Sc. en
Ingeniería Ambiental

Línea de Investigación:

Gestión del recurso hídrico y manejo del agua

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería, Escuela Ambiental, Especialización en manejo y gestión del agua

Medellín, Colombia

2020

REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES COMO ALTERNATIVA AL ESTRÉS HÍDRICO EN COLOMBIA

Resumen: A nivel mundial, el estrés hídrico se manifiesta a través de diversos impactos ambientales, que se ven potencializados por el fenómeno del cambio climático. A razón de esto, en diferentes regiones del mundo se han realizado diversas investigaciones con el fin de mitigar a través de múltiples métodos y tecnologías, los impactos causados por el estrés hídrico. Los impactos que causa el estrés hídrico se manifiestan en el ambiente, alterando los distintos ciclos naturales, y en la sociedad, causando tensiones sociales que van desde conflictos por la escasez del agua, hasta en el aspecto económico. Entre los métodos para mitigar los impactos del estrés hídrico a nivel mundial, se ha aplicado el reúso de aguas residuales provenientes de actividades que realiza el ser humano a diario, entre las cuales cabe mencionar el uso doméstico, agricultura, industria, entre otros. Sin embargo, para poder realizar un adecuado reúso de las aguas residuales provenientes de estas actividades, es necesario cumplir con diversos parámetros técnicos y normativos, que están enfocados a mitigar los impactos ambientales y riesgos que se puedan generar. Para esto, se debe conocer el origen de las aguas residuales que se pretenden volver objeto de aprovechamiento, con el objetivo de analizar las características que poseen, y basados en los resultados, se debe analizar qué tipo de tratamiento requieren estas, según el tipo de actividad para las que vayan a ser destinadas, para que se asignen al grado de tratamiento que requieran, sea primario, secundario o terciario. A pesar de esto, el reúso de las aguas residuales presenta ventajas y desventajas ambientales, sociales y económicas. Con el fin de conocer más a fondo estas ventajas y desventajas, se analizaron diferentes casos alrededor del mundo, en los que se tuvieron en cuenta características que pueden variar el estrés hídrico en países que se encuentran en una condición de estrés hídrico crítica, hasta países con gran oferta hídrica. De manera general, el reúso de aguas residuales puede presentarse como una opción para mitigar los impactos del estrés hídrico, teniendo en cuenta el responsable cumplimiento de los parámetros normativos para su aplicación en diversas actividades.

Palabras clave: Reúso de agua residual, Estrés hídrico, Beneficios del reúso, Riesgos asociados al reúso.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y Meteorológicos (IDEAM), el agua es una sustancia esencial para la supervivencia de todas las formas de vida conocidas. Esta se puede clasificar en diferentes tipos, entre los cuales cabe mencionar el agua potable, agua salada, agua salobre, aguas pluviales y aguas residuales (IDEAM, 2018a).

Las aguas residuales (AR), son aquellas aguas que son alteradas en sus características físicas, químicas y microbiológicas por diferentes procesos antrópicos. Se pueden clasificar en aguas residuales de origen doméstico (ARD) o aguas residuales no domésticas (ARnD) y que pueden provenir del sector industrial, eléctrico, pecuarios, agrícola, aguas pluviales entre otros. Estas aguas pueden ser objeto de aprovechamiento y uso en diferentes procesos (IDEAM, 2018b).

El uso de AR puede ser considerado un método alternativo para realizar diferentes actividades que van desde las actividades industriales, la agricultura, y el doméstico, como por ejemplo el lavado de andenes y riego de jardines, entre otros, que pueden traer diversas ventajas para el ambiente.

Una ventaja importante a tener en cuenta del reúso de AR respecto a la economía y el ambiente, es la reducción de las cargas contaminantes presentes en los vertimientos que se

realizan en cuerpos de agua, ya que se reduce la contaminación de estos y se aporta para la mitigación de los impactos causados por los vertimientos, tanto por las actividades que generaron estas AR, como a la mitigación del estrés hídrico.

Para realizar el análisis de los beneficios del reúso de AR, se debe observar a través del problema que representa el cambio climático en el estrés hídrico a escala global y a escala local. Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la competencia por la oferta del agua, la contaminación en los recursos hídricos y las presiones generadas por el ser humano al ambiente, potencializan los impactos del cambio climático (ONU, 2009, pp. 1-2).

De acuerdo al IDEAM (2018), en un país como Colombia, la oferta hídrica no es homogénea en todas las regiones y el agua potable escasea, por lo cual se debe de buscar alternativas del agua que se usa en actividades como ganadería, industria, minería, para ser reemplazadas por el reúso de AR, y que el agua potable que se destinaría para estas actividades, pueda ser aprovechada para el uso doméstico en las regiones que sufren de escasez de agua.

Las estimaciones de la población mundial con escasez de agua varían dependiendo de los estudios realizados. Sin embargo, un factor influyente en el estrés hídrico es el cambio climático, y se prevé que para el año 2050 aumente la población afectada por falta de agua potable en asentamientos presentes en cuencas con deficiencia hídrica. Además, el estrés hídrico aumentaría aproximadamente en el 76% de la superficie terrestre mundial (ONU, 2007).

En diversas ciudades industrializadas, no se ha realizado un adecuado control de los sistemas de alcantarillados, lo cual, presenta implicaciones al recolectar las AR para su tratamiento. Se debe tener en cuenta que, en estos mismos sistemas, se han encontrado conexiones ilícitas al sistema de recolección de AR, trayendo como consecuencia que no haya control sobre la contaminación del recurso hídrico, al desconocer el tipo de vertimiento que se está realizando. Las razones para que esto ocurra se pueden resumir en falta de planificación institucional, falta de instalación de redes de recolección, existencia de redes viejas que se encuentran en alto estado de degradación, instalación inadecuada, operación ineficaz y mantenimiento de las redes, regulación inadecuada y control ineficaz de las conexiones existentes (UN-Water, 2015). Estas afectaciones pueden incurrir a que no se realice tratamiento de las AR, disminuyendo de esta manera la calidad del recurso hídrico y disminuyendo la oferta hídrica de los cuerpos de agua en los cuales se realizan los vertimientos.

En la presente revisión, se evidencia entonces que el estrés hídrico genera impactos sociales, económicos y ambientales, que generan la necesidad de que se busquen diversas alternativas que brinden una mejor oferta y disponibilidad del recurso hídrico para los diferentes sectores y procesos productivos presentes en áreas urbanas; para lograr esto, la adecuada gestión del recurso hídrico toma un papel importante, a través de la administración correcta de los cuerpos hídricos, y los actores institucionales deben articular las diferentes herramientas de planificación y ordenación territorial para incentivar el reúso de AR como un elemento más de oferta hídrica en los diferentes lugares que sufren de estrés hídrico.

Esta monografía tiene como enfoque contextualizar acerca de los beneficios del reúso de las aguas residuales como medida alternativa para el estrés hídrico en Colombia agravado en especial por el cambio climático.

2. OBJETIVOS

2.1. *Objetivo general*

- Evaluar el reúso de las aguas residuales como alternativa para mitigar las consecuencias del estrés hídrico en Colombia.

2.2. *Objetivos específicos*

- Examinar las metodologías y beneficios de aplicar técnicas de reúso de las Aguas Residuales como medida de mitigación del impacto del estrés hídrico potencializado por el cambio climático.
- Analizar la aplicabilidad de las técnicas de reúso de las aguas residuales, teniendo en cuenta los riesgos implícitos que conlleva, como medida de mitigación del impacto al recurso hídrico generado por el estrés hídrico en el contexto nacional de acuerdo con los ámbitos normativo, ambiental, social y económico.

3. **REÚSO DE AGUAS RESIDUALES Y ESTRÉS HIDRICO**

3.1. *Estrés hídrico y reúso de aguas residuales*

Desde la década de 1950, la comunidad científica mundial empezó a informar acerca del fenómeno del calentamiento global, fenómeno por el cual se incrementa la temperatura media del planeta tierra a un ritmo acelerado. Si bien el clima siempre ha presentado variaciones, el problema actual es que en los dos últimos siglos el ritmo de estas variaciones se ha incrementado. Como lo establece el Panel Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático - IPCC (2007), el cambio climático se atribuye al aumento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) provocado por actividades antrópicas (ONU, 2003).

Durante el 2007, se publicó el cuarto informe de evaluación del IPCC, que ha supuesto un avance en el conocimiento acerca del cambio climático, en el cual, se destaca que la resiliencia de numerosos ecosistemas se verá superada en el presente siglo por la sinergia de diversos fenómenos climáticos y por el aumento de la contaminación en especial al recurso hídrico, disminuyendo su calidad y disponibilidad afectando bienes y servicios ecosistémicos al generarse impactos por el estrés hídrico.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el estrés hídrico se define como la proporción que existe entre la demanda de agua de todos los sectores y la oferta de agua de los recursos hídricos disponibles (FAO, 2018).

Cuando la demanda de recurso hídrico es mayor que la oferta durante un periodo de tiempo determinado en una región, es posible entonces mencionar que se genera estrés hídrico, y a medida que aumentan los niveles de contaminación del agua, se pierde la capacidad de los cuerpos de agua para que el ser humano disponga de estos, además, se genera un importante impacto ambiental negativo en los ecosistemas y se altera el ciclo hidrológico. Cuando la demanda de agua sobrepasa la oferta, es posible entonces referirse a la presencia de estrés hídrico en este lugar producto de condiciones climáticas o actividades generadas en un lugar específico (Monforte y Martínez, 2009, p.9).

El estrés hídrico puede afectar 18 millones de personas para el año 2020 y 79 millones de personas para el 2050. Este hecho impactará comunidades de países andinos (ONU-HABITAT, 2011). Frente al estrés, se han descrito dos tipos de respuestas donde la primera consiste en las herramientas de prevención al estrés, conocidas en conjunto como mecanismo de prevención, y, por otro lado, mecanismos o adaptaciones conocidos como mecanismos tolerantes, por ejemplo, el reúso de las AR (Gordillo, Gordillo, Molano, Oviedo y Aparicio, 2014).

En el Estudio Nacional del Agua (ENA) elaborado en el 2018, se establecen las cantidades de la oferta y demanda hídrica totales a nivel nacional, con lo cual se permite saber cuál o cuáles son los sectores productivos que más demandan recurso hídrico y las regiones que más ofertan este mismo, como se muestra a continuación:

En la Tabla 1, se evidencia que el sector que mayor recurso hídrico demanda es el agrícola, y el área hidrográfica que más representativo para este sector es el Caribe, en la cual se requiere 52,28% del total del sector agrícola, lo cual se traduce a 8399,77 Mm³, mientras que los sectores

que menos demandan son la minería en el área hidrográfica del Pacífico y los Hidrocarburos en el área hidrográfica del Amazonas, ya que en estas áreas la demanda hídrica es tan poca que se aproxima al 0%.

Tabla 1. *Demanda hídrica por sector en las áreas hidrográficas*

SECTOR	ÁREA HIDROGRÁFICA				
	Caribe	Magdalena-Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Agrícola	52,28%	42,51%	34,77%	11,99%	57,00%
Energía	5,75%	9,00%	10,30%	27,71%	4,01%
Pecuario	5,48%	7,76%	13,35%	17,00%	3,54%
Piscícola	1,69%	3,24%	2,73%	2,03%	1,23%
Doméstico	0,43%	1,36%	1,27%	0,02%	0,05%
Industria	1,75%	1,70%	0,08%	0,19%	11,10%
Minería	0,05%	0,47%	8,93%	8,25%	0,00%
Hidrocarburos	24,75%	25,12%	22,93%	0,00%	10,68%
Servicios	7,07%	7,56%	4,20%	29,65%	11,58%
Construcción	0,75%	1,72%	1,43%	3,16%	0,80%
	100%	100%	100%	100%	100%

Tomado y adaptado del Estudio Nacional del Agua 2018 (IDEAM, 2018)

En la Tabla 2, es posible evidenciar que el área hidrográfica con mayor oferta hídrica disponible es el Amazonas, ya que su oferta es de 425958 Mm³ de agua por año, lo cual es aproximadamente el 35,1% de la oferta hídrica total a nivel nacional.

Tabla 2. *Oferta hídrica disponible por área hidrográfica*

ÁREA HIDROGRÁFICA	OFERTA HÍDRICA DISPONIBLE (Mm ³ /año)	PORCENTAJE REPRESENTATIVO
Caribe	99220	8,2%
Magdalena-Cauca	151875	12,5%
Orinoco	381356	31,4%
Amazonas	425958	35,1%
Pacífico	155849	12,8%

Tomado y adaptado del Estudio Nacional del Agua 2018 (IDEAM, 2018)

Con base a la información del ENA 2018, se debe tener en cuenta que Colombia al ser un país con una diversa oferta hídrica, tanto de aguas superficiales como subterráneas, la disponibilidad del recurso hídrico se ha visto reducida por la demanda de agua en algunas actividades, como la agricultura en la región Caribe, teniendo en cuenta que es la región que menor oferta hídrica posee. Consecuentemente, diversos ecosistemas no alcanzan a cubrir las necesidades hídricas y su capacidad de resiliencia disminuye, por tanto, con el tiempo los impactos generados por la contaminación al recurso hídrico tenderán a empeorar (ONU, 2017, p.79).

Se puede considerar el reúso de las AR como una alternativa a implementarse como medida de adaptación al estrés hídrico como opción de abastecimiento de agua que permitan satisfacer la demanda hídrica de diferentes sectores, la cual consiste en que estas aguas se conviertan en un residuo aprovechable, minimizando la necesidad de demandar recurso hídrico de fuentes de agua que pueden ser destinadas para la potabilización.

De acuerdo con Filho (1988), el reúso de AR se basa en el aprovechamiento del agua previamente utilizada, una o más veces en alguna actividad para suplir las necesidades de otros usos. Con base a lo anterior, el reúso se puede clasificar en reúso indirecto no planeado, reúso indirecto planeado, y reúso directo planeado.

El reúso indirecto no planeado consiste en recuperar el agua de un efluente para ser reintroducida en un cuerpo de agua, sea superficial o subterránea, que pueda servir posteriormente para ser potabilizada. El reúso indirecto planeado ocurre cuando los efluentes que ya se sometieron a tratamiento son descargados de manera planeada a los cuerpos hídricos receptores con el fin de ser utilizados de manera intencional y beneficiosa en alguna actividad. Se trata de reúso directo planeado cuando los efluentes se utilizan directamente en alguna actividad de manera beneficiosa. En la Figura 1, se aprecia gráficamente la clasificación del reúso por actividad.



Figura 1. Clasificación del reúso de AR por actividad

1. Reúso indirecto no planeado; 2. Reúso indirecto planificado; 3. Reúso directo planeado.
Tomado y adaptado (RALCEA, 2013).

A pesar de los múltiples beneficios, el potencial de la mayoría de los recursos hídricos no convencionales, y especialmente la reutilización y el reciclaje del agua, está aún inexplorado y subexplotado (WWAP, 2019). Cabe resaltar la diferencia entre reusar, reutilizar y reciclar ya que estos tres términos han sido utilizados como sinónimos, por lo cual en el contexto hídrico y de acuerdo al Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP, 2017) se puede definir de la siguiente manera:

- Agua reciclada o reutilizada: AR tratadas (adecuadas a los fines) que pueden utilizarse en condiciones controladas para fines beneficiosos dentro del mismo establecimiento o industria.
- Agua regenerada o reusada: AR tratadas (adecuadas a los fines) que pueden utilizarse en condiciones controladas para fines beneficiosos tales como el riego. El término de agua regenerada o reusada, no siempre se distinguen entre AR tratadas, parcialmente tratadas o no tratadas, que es información esencial en muchos contextos.

El reúso de agua se puede clasificar en dos categorías (Westerhoff, 1984):

- Reúso potable: Clasificado a su vez en directo o indirecto. Si los efluentes tratados son empleados directamente en alguna aplicación de reúso local, se denomina “Directo”. Por el contrario, si el agua utilizada y descargada en forma diluida en los cuerpos receptores y posteriormente es utilizada, se denomina “Indirecto”.

- Reúso no Potable: Se destinan para fines agrícolas, industriales, domésticos, manejo de cursos de agua, acuicultura y recarga de acuíferos.

Adicionalmente, la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos, por sus siglas en inglés (EPA) define el reúso como la reutilización del efluente y el agua recuperada desde una aplicación a otra (irrigación, recarga de acuíferos, uso industrial, líneas de incendio, entre otros).

Las AR pueden ser usadas con diferentes fines, y de las posibles actividades para destinar estas aguas, todas tienen el mismo objetivo, el cual es reducir el consumo del recurso hídrico. A partir de las experiencias de reúso de AR que se habían realizado en diferentes ciudades alrededor del mundo, se evidenciaba la necesidad de implementar políticas o normas que regularan esta actividad, tanto en agricultura como en otras actividades donde fuesen utilizadas, con el fin de evitar impactos al ambiente y daños a la salud pública (Lasso y Ramírez, 2011, p.6).

Para el año 1958, la ONU a través del Consejo Económico y Social, propuso que no se utilizaran recursos naturales óptimos en actividades en las cuales se puedan utilizar otros de menor calidad, lo que permitiría realizar una adecuada planificación de los recursos hídricos y al desarrollo del concepto de reúso (Delgado C., 2003a). Las aplicaciones urbanas, comerciales, industriales y agrícolas del agua, pueden satisfacerse con calidad inferior a la potable.

Es de tener en cuenta que, según el proceso para el que se vaya a destinar el reúso del AR, se debe cumplir con una serie de parámetros físicos, químicos y bacteriológicos, por esto el agua requiere ser sometida a un proceso de tratamiento primario (remoción de sólidos), secundario (tratamiento biológico) y/o tratamiento terciario (eliminación de contaminantes recalcitrantes), dependiendo del uso que al que se destinará su aplicación. Existen procesos que pueden eliminar hasta el 99% de los contaminantes por medio de procesos como osmosis inversa, electrodiálisis, filtración por membranas, procesos avanzados de oxidación entre otros.

Sin embargo, la aplicación de estos procesos de tratamiento y desinfección puede representar altos costos y se torna inviable económicamente su implementación.

Para la reutilización del AR, el que se podría considerar el método más adecuado es la desinfección por tratamiento de ozono (Delgado, 2013b). Entre las desventajas que presenta el uso del ozono, se encuentran la formación de subproductos como bromatos, aldehídos y cetonas, la gran demanda de energía que se demanda para la aplicación de este método de desinfección, puede ser corrosivo y tóxico, y generación de materia orgánica biodegradable (Escobedo, 2007).

En municipios donde se está desarrollando mayor actividad humana e industrial, se debe invertir en obras de infraestructura hídricas para una mayor cobertura y mayor tratamiento de los contaminantes presentes en las aguas, con el fin de cubrir la creciente demanda de manera sostenible, evitando una contaminación mayor sobre el recurso hídrico y de ser posible la utilización de las aguas tratadas en otros sectores (Delgado, 2013c).

No solo se debe propender por la implementación de nuevas tecnologías en los tratamientos de AR, sino también el reúso del AR mediante sistemas de tratamiento, dejando para el consumo humano el agua de alta calidad, y cumpliendo con ciertas características las AR tratada para actividades domésticas, agropecuarias, recreativas, de la construcción de obras civiles, lavado de pisos, entre otras actividades que pueden ser realizadas con el tipo de agua (Delgado, 2013d).

Las AR poseen un papel fundamental para fomentar la conservación de una manera más íntegra los cuerpos de agua, tendiendo a que se aproveche el recurso hídrico de una manera responsable, y es de tener en cuenta que el sector agrícola es el sector que demanda mayor consumo de agua, por lo tanto las AR se pueden destinar para el aprovechamiento, a pesar de requerir tratamientos que permitan tener controlados niveles como los de salinidad, y eliminación de sustancias nocivas presentes en las AR como microorganismos (virus, bacterias

u hongos) o metales pesados que puedan afectar los cultivos e introducirse en la cadena trófica (Manga, Logreira, y Serralt, 2001a).

De igual manera, los macronutrientes presentes en las AR se pueden considerar una importante fuente alternativa de abastecimiento para la agricultura como se expone posteriormente en la sección de estudio de casos donde el reúso del AR es una alternativa para la producción agrícola, debido a que presentan cargas de macronutrientes como el fósforo y el nitrógeno, que de aplicarse para esta actividad, podrían contribuir a reducir la utilización de fertilizantes químicos, buscando mejorar la condición económica de los agricultores (Manga et al, 2001b).

Las AR pueden ser tomadas como una fuente ideal de oferta hídrica para actividades que no requieran parámetros de calidad tan altos como si el del caso del agua para consumo humano, y pueden ser destinadas en otro tipo de aplicaciones, a pesar de que la reutilización directa para consumo humano todavía no sea una opción viable, por los problemas de salud pública que esto podría conllevar (Delgado, 2003).

De acuerdo con el Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua (CETA, 2013), se presentan los pasos a seguir para definir el reúso como se muestra a continuación:

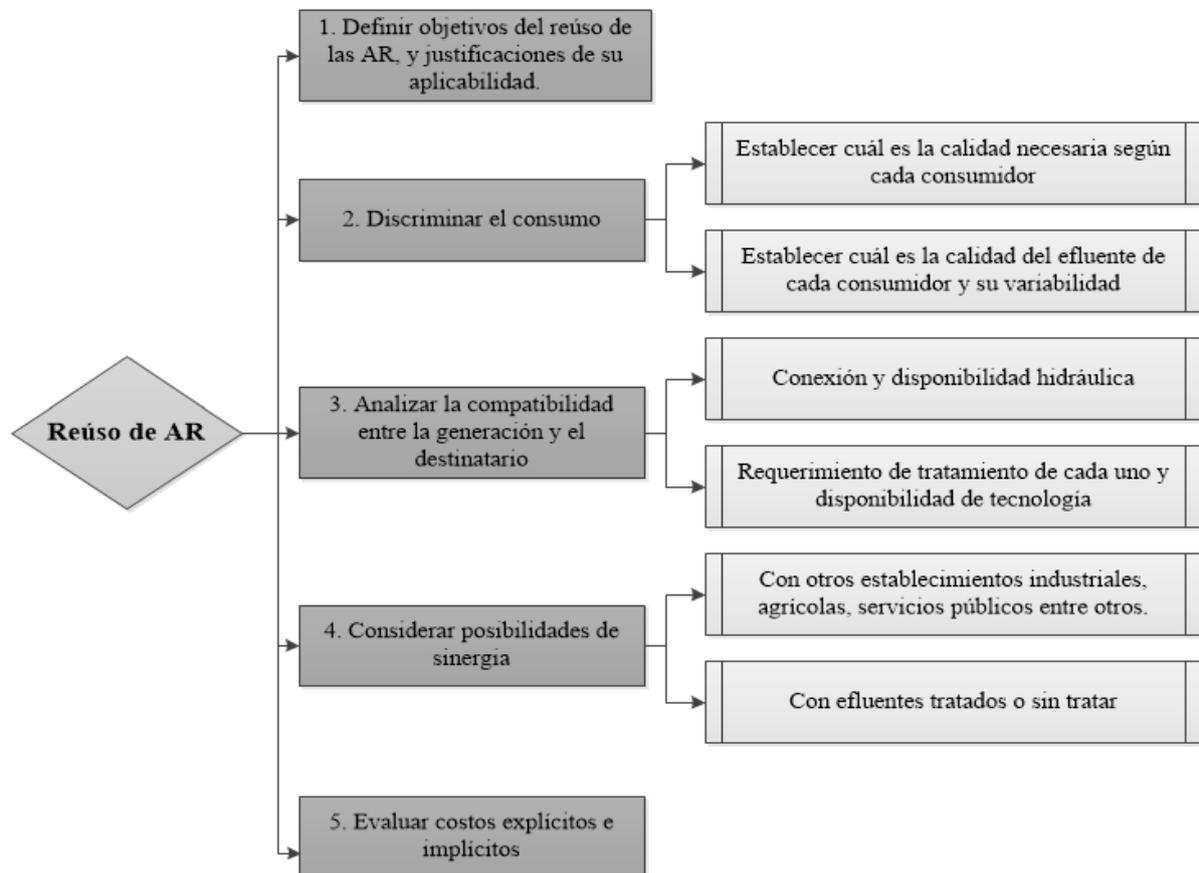


Figura 2. Pasos para el reúso de AR

Tomado y adaptado del Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua (CETA, 2013).

Como instrumento de medición, en el ENA 2018, se cuenta con un sistema de indicadores que dan cuenta de las condiciones del sistema hídrico natural y los relacionados con la intervención antrópica que tienen efectos sobre la cantidad, variabilidad y calidad de agua. Para el análisis como medida del impacto sobre el estrés hídrico por el reúso de AR se pueden considerar los siguientes indicadores (IDEAM, 2010):

- Índice de uso de agua (IUA): Cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios, en un período determinado (anual, mensual) y unidad espacial de análisis

(área, zona, subzona, etc.) en relación con la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades de tiempo y espaciales.

- Índice de vulnerabilidad hídrica al desabastecimiento (IRH vs IUA): Mide el grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener una oferta para el abastecimiento de agua, que ante amenazas –como periodos largos de estiaje o eventos como el Fenómeno cálido del Pacífico (El Niño)– podría generar riesgos de desabastecimiento.

3.2. Casos de aplicación

Los tipos y aplicaciones del reúso de las AR, se clasifican de acuerdo con el sector o infraestructura a las cuales se destinarían, siendo los principales: el urbano, que incluye irrigación de parques públicos, campos de atletismo, áreas residenciales y campos de golf; el industrial, en el que ha sido empleado durante los últimos años, especialmente en los sistemas de refrigeración de las industrias, y el agrícola, en la irrigación de cultivos (Silva y Torres, 2008, p.3).

Entre las AR que más contaminantes podrían contener, son las ARnD industriales. Estas aguas, posteriormente a ser tratadas, transportan sustancias nocivas como arsénico, cadmio, cobre, cromo, plomo, mercurio y zinc, los cuales, de acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, (por sus siglas en inglés EPA), son clasificados como metales pesados tóxicos. Cuando las concentraciones de estos metales exceden los límites permitidos (esto será variable dependiendo de cada país y región), sucederá que se acumulan en la cadena trófica y se alterará el sistema biológico. Las actividades donde suelen generarse estos metales tóxicos pesados, son la galvanoplastia, industria metalúrgica, industria de curtimbres, trabajo con sustancias químicas, minería, fabricación de diferentes tipos de baterías, elaboración de fertilizantes, generación de lixiviados, aguas subterráneas contaminadas con desechos peligrosos previamente, entre otros (Zaidi, 2007a).

Por otro lado, el concepto de huella hídrica, se puede definir como el volumen de agua que se requiere para producir los bienes y servicios consumidos por un individuo, persona o país. (Becerra, Bravo, y Membrive, 2013, p.23).

El reúso de las AR puede ser una importante alternativa para mitigar estos impactos, en especial en la reducción de la huella hídrica gris, la cual se define como volumen de agua dulce necesario para asimilar la carga de contaminantes por parte de un cuerpo receptor, tomando como referencia las normas de calidad ambiental, asociando los límites establecidos a una calidad buena para el ambiente y para las personas, es por esto que en la medida en que se cumplan los parámetros normativos locales, los sistemas hídricos no requerirán una mayor demanda para la asimilación de los contaminantes permitiendo que la oferta hídrica permanezca constante o se incremente.

Algunas razones que pueden potencializar el estrés hídrico en diferentes regiones del mundo, son el incremento de la población, y el aumento del desarrollo en países densamente poblados, lo cual demanda mayor bienestar económico y que haya seguridad alimentaria. (Prats-Rico, 2016, p.4).

Según la ONU (2018a), para el año 2016, aproximadamente 2000 millones de personas alrededor del mundo estaban siendo afectadas por las consecuencias del estrés hídrico, tanto desde el aspecto social como el económico, y se prevé que esta cifra siga aumentando drásticamente con el paso del tiempo. Los efectos del estrés hídrico se pueden mitigar, haciendo un buen uso del recurso hídrico, y para esto, se podría pensar en diferentes alternativas de oferta, por lo cual, el reúso de AR podría ser considerada una importante alternativa para diferentes actividades productivas (2018b, p.9).

3.2.1. Contexto internacional

ISRAEL: En este país se hizo necesario buscar diferentes alternativas de consumo de agua, con el fin de que se pudiera dar prioridad al agua potable para que fuese destinada para el consumo humano. En vista de lo anterior, el gobierno planteó llevar a cabo el tratamiento de AR que puedan ser susceptibles al reúso, y se estableció cumplir una meta de 500 millones de m³/año de AR para reúso, de las cuales la gran mayoría son de origen doméstico. Esto se planificó en para un período del año 2007 hasta el año 2020, con el objetivo de que estas aguas sean destinadas a uso doméstico, riego de jardines y lavado de calles, riego de campos en que se realice agricultura, con la finalidad que los depósitos subterráneos de agua puedan ser preservados (Shalhevet, 2007, p.29). La oferta hídrica en Israel entonces, para consumo humano se incrementa con el reúso de las AR, de igual forma la necesidad de implementar mayor infraestructura para el tratamiento de AR, y de esta forma disminuyendo el estrés hídrico que se genera por la contaminación a los cuerpos hídricos.

JORDANIA: En este país, en promedio hay pérdidas del 60% de la oferta en sus acuíferos (Universidad Mu'tah, 2007b). Estas pérdidas y los impactos que se generan, se deben mitigar posteriormente, y una de las maneras en que es posible realizar esta mitigación, es a través del reúso de AR. Las AR que se sometan a tratamiento, según el grado que requieran por la actividad para la que se vayan a destinar, pueden contribuir a la disminución del estrés hídrico y a los impactos que se generen al ambiente.

GHANA: en la ciudad Kumasi ubicada en Ghana, los campesinos de áreas rurales, basándose en el riego con AR sometidas a tratamiento primario, en cultivos vegetales para la actividad económica, han generado ingresos de 6 millones de dólares, y ganancias de hasta 4 millones de dólares en un año (UN-Water, 2017b) sin embargo, no se menciona por parte del autor acerca de otros usos para los que se destinan estas ARD.

INDIA: En la India, los estanques de oxidación y los procesos de lodos activados son los dos métodos de tratamiento de AR más utilizados. Estos suelen ser costosos y requieren complejos procesos de operación y mantenimiento. El reúso de AR se vuelve una importante alternativa económica para las actividades como la agricultura. (Hettiarachchi, 2016, pp. 139-145).

Las corrientes de AR que se disponían en estas redes de alcantarillado, al ser analizadas permitieron establecer que las concentraciones de nutrientes y metales pesados estaban por encima de los límites permitidos por la ley (Hettiarachchi, 2016b).

La propuesta para el reúso experimental de estas AR se realiza con tres vegetales (*Phragmites karka*, *Acorous calamus* y *Typha latifolia*) para evaluar su eficiencia comparativa de reducción de nutrientes y metales y, por lo tanto, detectar una combinación adecuada de vegetación y medios con una prometedora eficiencia de reducción de contaminantes (Hettiarachchi, 2016d).

El monitoreo de la eficiencia de reducción de los contaminantes en los cultivos, realizado a largo plazo realizado en un período del año 2009 al 2011, demostró que la especie *Typha latifolia* representaba una ventaja sobre las otras especies, especialmente en la eliminación de nitrato (90,74%), fosfato (77.65%) y potasio (48.57%), níquel en un rango de 70 a 74% y plomo en un rango de 53-63%, evidenciando que esta especie era la más adecuada para la eliminación de trazas de estos metales. A pesar de esto, por parte del autor, no se hace mayor énfasis ni detalle respecto a los diferentes usos a los que se podrían someter las AR

ESTADOS UNIDOS: El inicio de los programas de reutilización con frecuencia ha sido propiciado por la demanda de grandes consumidores de agua. Existen diversos ejemplos al respecto, como la ciudad de Baltimore en EE. UU, que en 1942 inició el suministro de 4.5 m³/s de efluente secundario clorado a una planta de fabricación de acero situada a 7.2 km y la construcción, en 1982, de una conducción de AR de 58 km de longitud. El agua reusada así distribuida, se emplea en la mayoría de los usos urbanos no potables, incluyendo riego de

parques, extinción de incendios y uso en cisternas de servicios sanitarios, campos de golf, riego de campos de escuelas y parques (García, 2016, p. 36).

En el estado de Arizona también ha implementado la reutilización de AR en diferentes experiencias. Se estima que para el año 2003, se aprovecharon aproximadamente 4687.3 Mm³, de las cuales, el 70% de estas fueron destinadas para uso en la agricultura. Teniendo en cuenta que la agricultura es uno de los sectores que más demanda el aprovechamiento hídrico, el reúso de las AR se convierte en una alternativa viable para afrontar el estrés hídrico, reduciendo así la captación adicional del recurso (Megdal, 2007).

3.2.2. Contexto general de América Latina

En América Latina en general, diariamente se arrojan 2 millones de toneladas de residuos en cuerpos de agua, incluyendo residuos químicos e industriales, ARD y ARnD de origen agrícola. Se calcula que la producción de AR a nivel mundial es de 1500 km³, y asumiendo que 1 litro de AR podría contaminar 8 litros de agua dulce, se puede estimar que el volumen de AR a nivel mundial es de 12000 km³ (Madera, s.f., p.2), sin embargo, no se hace énfasis en las actividades para las cuales podrían ser destinadas las AR.

A pesar de la riqueza hídrica que representan a nivel mundial Latinoamérica y el caribe, muchos de los recursos hídricos que poseen se encuentran contaminados a causa de vertimientos de ARnD provenientes de diversas en las que no se realiza un adecuado registro y control de los vertimientos en los cuerpos de agua, en especial por las AR provenientes de actividades en áreas urbanas y esto representa riesgos e impactos negativos para la salud del ser humano, y para los ecosistemas.

Aproximadamente, entre 261000 y 327000 km de ríos en América Latina y el Caribe se encuentran fuertemente contaminados, pues la concentración de coliformes fecales que presentan se estima superior a 1000 NMP/100 mL. Esto permite evidenciar que los mayores contaminantes de los cuerpos de agua se encuentran en las áreas urbanas debido a la gran concentración de población en áreas urbanas, y la presión que existe de generar mayor urbanización contribuye a la disminución de la oferta hídrica (ONU, 2017).

BOLIVIA: En las áreas urbanas de Bolivia, el 30% de las AR que se vierten en los alcantarillados son sometidas a tratamiento, mientras que el resto se descargan directamente en los cuerpos receptores. En este país, 84 de los 98 municipios con una población mayor a 2000 habitantes, poseen Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). 31 de las 84 PTAR no funcionan adecuadamente, y las 53 plantas restantes tienen una tasa de eliminación de contaminantes menor al 50%, lo que representa un riesgo a la salud humana respecto a que las PTAR ya se encuentran muy viejas, no se invierte un adecuado presupuesto para el funcionamiento de estas y los operadores no poseen la suficiente experiencia para su manejo (Hettiarachchi, 2016, pp. 301-306).

Para el año 2012, el 32,5% de la población boliviana habitaba áreas rurales, y el 67,5% restante en áreas urbanas. Esta población demanda gran cantidad de suministros básicos como agua potable, alimentación, y, por consiguiente, saneamiento básico. Bolivia puede tener en un año más de 7 meses con escasez de recurso hídrico, y el 40% del territorio nacional se encuentra en condición de escasez de agua para riego, creando de esta manera incertidumbre en los habitantes sobre la disponibilidad del agua. En 2012, aproximadamente el 11% (303000 ha) de la tierra cultivada se había equipado con algún sistema de riego, y el 70% de la tierra irrigada dependía de fuentes de agua superficiales.

Las AR, hayan sido o no sometidas a tratamiento, son utilizadas como fuente renovable, sin embargo no se menciona en específico las actividades para las cuales se destinan, y su uso no estima los riesgos que se generan para la salud humana y para el ambiente. Los habitantes de las cuencas bajas de las ciudades La Paz, El Alto, Santa Cruz y Cochabamba tienen problemas debido a la poca oferta hídrica, y a la calidad de las aguas de las que disponen, debido a las

actividades humanas que se realizan en las cuencas altas, y el vertimiento de AR sin tratar en los ecosistemas de agua dulce.

3.2.3. Contexto nacional

De acuerdo con la Corte Constitucional de Colombia, a través de la sentencia T740/11, se reconoce “el derecho de todos de disponer de agua suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para el uso personal o doméstico”. Colombia, es un país con abundante recurso hídrico, en el cual se cuenta con suficiente agua para que, en teoría, cada persona pueda disponer de 50000 m³; un 50% de la población no tiene acceso a agua potable, y aproximadamente 10 millones de colombianos no cuentan con sistema de acueducto (Gordillo, Gordillo, Molano, Oviedo, & Aparicio, 2014a, p.1).

Si bien Colombia hasta ahora no se considera un país que ha sido impactado por el estrés hídrico, las diferentes variables tanto económicas como políticas han conllevado que el país se encamine rumbo a experimentar las consecuencias del estrés hídrico, ya que el déficit existente de agua potable no sólo afecta la población de las áreas rurales, sino también a las zonas urbanas densamente pobladas, y la problemática tiende a aumentar teniendo en cuenta la contaminación de los cuerpos hídricos (Gordillo et al, 2014b).

En Colombia existen diversos vacíos institucionales y normativos, a partir de los cuales surge la oportunidad de aplicar parámetros enfocados a mejorar la institucionalidad y el ordenamiento del recurso hídrico, en los cuales se debería partir desde el contexto nacional y a partir de este contexto, a los demás entes territoriales, estableciendo nuevas y mejores alianzas entre las diversas instituciones territoriales, a través de las cuales sea posible llevar a cabo proyectos en los que se lleve un adecuado control de los cuerpos hídricos, su estado y la contaminación que en estos se genere.

Las AR que se utilizan para el riego de cultivos, provienen de actividades del sector agropecuario, industrial y agroindustrial (Silva et al, 2007d). En Bogotá, para el año 1996 se regaban aproximadamente 3.500 hectáreas de cultivos de flores y hortalizas, con un caudal medio de 1,5 m³/s de agua bombeada del río Bogotá y atravesaban humedales naturales como forma de tratamiento. Se puede apreciar los valores dentro de los niveles considerados “normales” y que no superan los máximos aceptables para suelos agrícolas, los cuales corresponden para plomo entre 10 y 150 mg/kg, para Cadmio entre 1 y 2 mg/kg, para arsénico entre 5 y 40 mg/kg y para plomo un máximo de 70 mg/kg (Miranda et al, 2008).

3.3. Aplicación y parámetros de las AR

El aprovechamiento de las AR tratadas, suele ser una importante alternativa para diferentes actividades. La principal y más útil experiencia se encuentra en la agricultura. Sin embargo, para estas aguas también deben ser analizados sus parámetros físicos, químicos y biológicos, con el fin de que los niveles permisivos para cada parámetro, no incumplan la normatividad local donde se realice el aprovechamiento.

Las ARD y ARnD, como resultantes de cualquier proceso, presentan cargas de diferentes componentes, como residuos de las industrias, metales pesados, materia orgánica proveniente de las ARD, entre otras, dependiendo de diversos factores como el avance tecnológico, nivel de industrialización, condiciones climáticas, hasta nivel educativo de las personas que las producen (Zaidi, 2007b).

En el aprovechamiento de las AR, se busca maximizar los beneficios y minimizar los riesgos. En los países en vía de desarrollo, las AR se vierten constantemente sin haber sido tratadas en cuerpos de agua como ríos, arroyos, quebradas y lagos (Zaidi, 2007c).

Los vertimientos en los cuerpos de agua, sin un previo tratamiento, generan un impacto sobre el recurso hídrico, como la disminución del oxígeno disuelto, aumento de la materia orgánica, la acumulación de los nutrientes generando eutrofización en los cuerpos de agua, por

lo que se deteriora enormemente la calidad del agua de estos, por consiguiente, conlleva a la pérdida de vida acuática (Zaidi, 2007d).

Las AR se pueden originar a partir de diferentes fuentes, y pueden tener diferentes características como se menciona a continuación (UN-Water, 2017a):

- ARD: compuestas por excrementos humanos que aportan microorganismos patógenos, nutrientes y materia orgánica a las aguas. Pueden contener también trazas de productos de metales pesados, farmacéuticos y/o fármacos.
- Escorrentía urbana: compuestas por una gran variedad de contaminantes, así como microorganismos patógenos, productos de combustión, caucho, aceite de motor, metales pesados, residuos sólidos orgánicos, material particulado, fertilizantes y pesticidas.
- Escorrentía agrícola: compuesta por microorganismos patógenos, nutrientes provenientes de la aplicación en los suelos, insecticidas y pesticidas.
- Acuicultura terrestre: compuestas por materia orgánica, sólidos suspendidos, nutrientes y metales pesados.
- Actividad minera: pueden contener sólidos suspendidos, acidez, cianuro, metales pesados, y dependiendo de la actividad minera, pueden contener elementos radiactivos.
- Generación de energía: las AR generadas en el sector energético se consideran una fuente de contaminación térmica (agua caliente), se componen por nitrógeno, sólidos disueltos, sulfatos y metales pesados.
- Lixiviados de vertedero: compuestas por contaminantes orgánicos e inorgánicos, metales pesados y sustancias químicas orgánicas que pueden ser potencialmente peligrosas para la salud humana y para el ambiente, entre los cuales cabe mencionar componentes como nitratos, fosfatos, sulfatos, nitrógeno amoniacal, aceites y grasas, cenizas y metales pesados (Torrez, Tejada, Alzate y Sanabria, 2018).

Las AR no tratadas pueden generar diversos impactos al ambiente y a la salud humana, y por estas razones, deben ser sometidas a tratamiento con el fin de reducir las enfermedades asociadas a excretas, la contaminación del agua y los impactos que esto genera. A menudo, la falta de tratamiento de AR se debe a razones financieras y al desconocimiento de los procesos de tratamientos de bajo costo y de los beneficios económicos del reúso de AR. En la actualidad, la carga global de enfermedades relacionadas con excretas es extremadamente alta, y más de la mitad de ríos, lagos y aguas costeras mundiales se encuentran contaminados de manera crítica por ARD y ARnD industriales y domésticas no tratadas, por lo cual, el tratamiento eficaz de las AR se debe tomar como una prioridad tanto para el ambiente como para la salud humana (Mara, 2004, pp. 304-310a).

Basados en una población de 250000 habitantes con un flujo constante de AR, contribución diaria entre 120 y 40 g/persona*día de DBO, número de *E. Coli* de 2×10^7 en 100 NMP/100 mL, las opciones más apropiadas para tratamiento de AR son los estanques de estabilización, los depósitos de almacenamiento y tratamiento de AR, humedales construidos, reactores de manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente, lagunas aireadas, zanjas de oxidación y biofiltros. El sistema más adecuado respecto a eficiencia y costos se considera, son las lagunas de estabilización. Estos sistemas de tratamiento pueden presentar ventajas como la simplicidad del funcionamiento, bajos costos y tratamiento eficiente de las AR. Si se realiza una comparación entre este sistema y otros de tratamiento de AR, los estanques casi siempre serán menos costosos (Mara, 2004, pp. 304-310b).

Las lagunas de estabilización pueden ser extremadamente eficientes y se pueden diseñar para lograr una remoción de DBO, amoníaco y sólidos suspendidos mayor al 90%. Estos sistemas son también muy eficientes para eliminar los patógenos asociados a excretas, mientras que los demás sistemas de tratamiento son ineficientes para esto y requieren proceso de cloración para destruir las bacterias asociadas a excretas. Las plantas de lodos activados, a pesar de que funcionan muy bien, logran una eliminación del 99% del *E. Coli*, lo cual puede

considerarse un porcentaje alto, pero sólo representa una reducción de 110^7 NMP/100 mL a 10^5 NMP/100 mL, mientras que los estanques de estabilización pueden reducir hasta 10^3 10^3 NMP/100 mL, alcanzado lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Mara, 2004, pp. 304-310c).

En la 0 se presentan brevemente algunos de los usos a los cuales se pueden destinar las AR, para poder mitigar los impactos que el estrés hídrico puede generar: Con base a la información presentada en la tabla, es posible evidenciar que la actividad en la que más se destinan las AR para reuso es la agricultura, debido a la variedad de usos que pueden demandar este tipo de aguas. El reuso directo en la agricultura puede contribuir a mitigar los impactos ambientales generados por estrés hídrico en diferentes regiones.

Las AR que son destinadas para el riego en la actividad de agricultura proviene desde diversas fuentes y son aguas con diferentes calidades generadas por diversas actividades en áreas urbanas. Las características de los vertimientos van a variar dependiendo de cada lugar, población y sector, teniendo en cuenta los niveles de las aguas subterráneas, usos de la tierra, y la separación que se haga entre aguas pluviales y los residuos sanitarios. Los sistemas de alcantarillado nuevos permiten realizar la separación de AR sanitarias, aguas lluvia y AR que son empleadas para la agricultura en áreas urbanas las cuales clasifican de la siguiente manera (Younnos y Parece, 2016a, p.272):

- Uso de AR no tratadas directamente en las tierras donde se ubican los cultivos.
- Uso de AR tratadas específicamente para la agricultura, riego de cultivos y reciclaje de agua.
- Uso de AR de tipo urbanas domésticas, tratadas o no tratadas para la agricultura.
- Aguas AR y/o diluidas, con usos previamente planificados.

Tabla 3. *Alternativas de Reuso*

REÚSO INDUSTRIAL	Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas. Descarga de aparatos sanitarios. Limpieza mecánica de vías. Riego de vías para el control de material particulado. Sistemas de redes contraincendios.
REÚSO AGRÍCOLA	Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal. Cultivos no alimenticios para humanos o animales. Cultivos de fibras celulósicas y derivados. Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburante) incluidos lubricantes. Cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles. Cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos. Áreas verdes en parques y campos deportivos en actividades de ornato y mantenimiento.
USOS URBANOS	Riego de zonas públicas y zonas verdes de urbanizaciones. Limpieza vial. Redes contraincendios. Riego de zonas comerciales. Riego de campos de golf. Estanques y lagos artificiales.
ESPACIOS NATURALES	Jardines en áreas no domiciliarias.

Tomado y adaptado de Dueñas, Amaya, y Donado (2015).

Los requisitos normativos exigidos para reúso de las AR buscan que estas tengan las características adecuadas según el uso para el que se vayan a destinar, a través de la eliminación de contaminantes químicos y patógenos microbiológicos, con el fin de minimizar los riesgos en la salud humana y en los ecosistemas. En la salud humana, tanto los metales pesados como los microorganismos patógenos representan un riesgo para la salud, mientras que en los ecosistemas la acumulación de metales pesados en la cadena trófica puede generar diversos impactos ambientales. Químicamente, las AR se componen de compuestos orgánicos y orgánicos, además de diferentes gases, mientras que desde el aspecto microbiológico pueden transportar diversos organismos patogénicos, que normalmente se origina en humanos con alguna enfermedad en particular (Zaidi, 2007d).

En lo que respecta a la salud humana, se presentan numerosos riesgos al reusarse las AR, lo cual puede variar según la actividad que las origine y por diversos factores como el contacto directo con AR y por consumo, manifestados a través de brotes de enfermedades que se dan por la ingesta de alimentos y agua de mala calidad cuando los contaminantes ingresan a la cadena trófica, además de enfermedades no transmisibles como resultado a la exposición a los metales pesados. Los riesgos en la salud se pueden clasificar de la siguiente manera (Younnos y Parece, 2016b):

- Contaminación de cultivos con organismos patógenos adquiridos de AR no tratadas y/o tratadas parcialmente.
- Contaminación de cultivos y agua potable por contenido de metales pesados en AR.
- Contaminación de cultivos por metales pesados en suelos contaminados que hayan sido irrigados por AR no tratadas y/o tratadas parcialmente.

De acuerdo con la ONU (2017), las AR pueden ayudar para restaurar funciones ecosistémicas en humedales. En España y México se han utilizado AR que han generado beneficios a través de diversas dinámicas como la reducción de la demanda del recurso, reciclaje de nutrientes que ayudan a reducir el uso de fertilizantes y emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), y la recarga de acuíferos agotados para beneficios como reutilización potable indirecta.

Es importante mencionar los beneficios generados por el reúso de AR, ya que se pueden considerar un recurso económico en lugares en los que haya impactos ambientales, económicos y sociales generados por el estrés hídrico. En continentes como Asia, África en su región occidental, y Latinoamérica, según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), las AR ofrecen beneficios como el aumento en la productividad y la rentabilidad en la agricultura.

En regiones del mundo como el Medio Oriente y África del Norte, se considera que presenta estrés hídrico alto, y aproximadamente el 60% de la población de estas regiones sufre las consecuencias, mientras que en el resto del mundo es aproximadamente un 35% de la población que sufre las consecuencias del estrés hídrico. La escasez aguda, la hidrología variable y la inadecuada gobernabilidad han llevado a que se genere una sobreexplotación de los escasos recursos hídricos. Con el fin de suplir la necesidad básica de acceso y oferta al agua de la población que sufre las consecuencias del estrés hídrico, los Objetivos de Desarrollo del Milenio proponen 8 metas, de las cuales se mencionan las tres siguientes haciendo énfasis en el reúso del AR, como medida de adaptación al estrés hídrico (Grupo del Banco Mundial, 2018, p.19):

- Para 2030, mejorar la calidad del agua al reducir la contaminación, eliminar el vertido y minimizar la liberación de productos químicos y materiales peligrosos, reducir a la mitad la proporción de aguas residuales no tratadas y aumentar sustancialmente el reciclaje y la reutilización segura a nivel mundial.

- Para 2030, incrementar sustancialmente el uso eficiente del agua en todos los sectores, buscando que se garantice la extracción y aprovechamiento sostenible del agua dulce para reducir sustancialmente el número de personas que sufren escasez de agua.
- Para 2030, aumentar la cooperación internacional y mejorar la capacidad de los países en desarrollo para las actividades relacionadas al agua, saneamiento, recolección de agua, eficiencia del agua, tratamiento de AR, reciclaje y reutilización.

La situación hídrica de un territorio se puede clasificar con base a la disponibilidad de m³/habitante/día de agua. Si el territorio dispone de 1700 a 2500 m³/habitante/día, se considera vulnerable y se debe considerar establecer restricciones para disponer de estas aguas. Cuando el territorio dispone de 1000 a 1700 m³/habitante/día, se considera en condición de estrés, y se debe considerar limitar el consumo para algunos usos y actividades. Si el territorio dispone de 500 a 1000 m³/habitante/día, se considera que puede haber conflictos con los usos y actividades y es necesario recurrir a medidas como la reutilización de AR. Finalmente, si un territorio dispone de menos de 500 m³/habitante/día, se considera que se encuentra en escasez absoluta y puede poseer problemas sanitarios y un evidente déficit para todos los usos y actividades (Universidad de Jaén, 2016, p.11).

La actividad agrícola en áreas urbanas es una de las principales actividades que utilizan AR por los beneficios que presentan, y en épocas en las que hay poca oferta de agua en los cuerpos hídricos, aun así, las AR son abundantes. Para el sector agrícola se puede pensar en emplear AR, con el fin de compensar la escasez de agua, y de esta manera presentar beneficios asociados al aporte de materia orgánica y macronutrientes al recurso suelo, permitiendo en algunos casos, eliminar el uso de fertilizantes químicos y beneficiando la economía de los agricultores, sin embargo, no es recomendable reusarse directamente por diversas circunstancias, idea que será ampliada en la siguiente sección sin pasar por un tratamiento previo. Además, el ambiente se puede beneficiar al evitar el vertimiento directo de estas aguas y de manera indirecta se reducirían los costos de tratamiento de los cuerpos de agua superficiales que son objeto de vertimientos, conservando la calidad de agua y la recarga de las aguas subterráneas (Silva, Torres y Madera, 2007a).

3.4. Consideraciones para el reúso de AR

Para reusar AR, el factor que determina el grado de tratamiento que necesitan estas, suele ser el uso para el que serán destinadas; por ejemplo, para el reúso en agricultura, los factores pueden ser la permeabilidad, características del suelo y los cultivos objeto de riego (Silva et al, 2007b).

En la Tabla 4, se presentan otros parámetros normativos, establecidos por la OMS (1989) como parámetros de calidad microbiológica para las AR para uso en la agricultura.

Tabla 4. *Parámetros de calidad microbiológica para el uso en la agricultura*

Parámetro de calidad	Concentración
Cultivos que se consumen y no se procesan de manera comercial	
pH	6,5 - 8,4
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	<10 mg/L
Turbiedad	<2 UNF
Coliformes fecales	<14 NMP/100 mL
Cultivos que se consumen y se procesan de manera comercial	
pH	6,5 - 8,4
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	<30 mg/L
Sólidos Suspendidos (SS)	<30 mg/L
Coliformes fecales	<200 NMP/100 mL
Cultivos que no se consumen	
pH	6,5 - 8,4
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	<30 mg/L
Sólidos Suspendidos (SS)	<30 mg/L
Coliformes fecales	<200 NMP/100 mL

Tomado y adaptado de Ochoa, 2011

El reúso de AR para la industria se puede destinar para generación de energía, ya que son aptas para recibir estas aguas, en la medida en que se requiere gran cantidad de agua para el sistema de refrigeración interno. Entre otras aplicaciones que se pueden realizar en la industria, cabe mencionar el lavado de cenizas en procesos de combustión, y depuración de gases de combustión (Ochoa, 2011a).

Por otro lado, es posible que surjan inconvenientes con el uso de estas aguas. En los sistemas de circulación de aguas de enfriamiento, se puede generar corrosión de las redes debido a la gran cantidad de sólidos disueltos presentes en el agua. Además, desde los parámetros biológicos se pueden acumular microorganismos que aumentan la corrosión en el sistema y la presencia excesiva de nutrientes, puede contribuir a que se acumulen microorganismos como bacterias, hongos y algas (Ochoa, 2011b).

En aguas subterráneas, el reúso de AR puede tener diferentes propósitos, entre los cuales cabe mencionar el control y prevención del hundimiento del suelo, incrementar la cantidad de acuíferos de agua potable y no potable, servir como sitios de almacenamiento de agua reciclada para reutilización posteriormente (Ochoa, 2011c).

Por otra parte, los niveles de tratamiento de las AR se clasifican en primario, secundario y terciario, de acuerdo como se muestra en la 0. De manera general, en Colombia, y en los países latinoamericanos, el nivel de tratamiento que se emplea es el primario y secundario (remoción de sólidos y materia orgánica). A nivel mundial, el tratamiento que se realiza de manera general, es el nivel terciario con el fin de eliminar nutrientes o metales pesados que no logran ser removido por los tratamientos secundarios y terciarios (Silva et al, 2007c).

De esta manera, es pertinente entonces detallar acerca de los niveles de tratamiento de las AR, los cuales se clasifican en primario, secundario y terciario, de acuerdo como se muestra en la 0. De manera general, en Colombia, y en los países latinoamericanos, el nivel de tratamiento que se emplea es el primario y secundario (remoción de sólidos y materia orgánica). A nivel mundial, el tratamiento que se realiza de manera general, es el nivel terciario con el fin de eliminar nutrientes o metales pesados que no logran ser removido por los tratamientos secundarios y terciarios (Silva et al, 2007c).

Tabla 5. Características de los principales niveles de tratamiento

Item	Nivel de tratamiento			
	Preliminar	Primario	Secundario	Terciario
Contaminante removidos	Sólidos gruesos (basuras, arenas) Grasas Acondicionamiento químico (pH)	Sólidos suspendidos sedimentables Materia orgánica suspendida (parcialmente)	Sólidos no sedimentables Materia orgánica suspendida fina/soluble (parcialmente) Nutrientes (parcialmente) Patógenos (parcialmente)	Contaminantes específicos Materia orgánica fina y soluble (pulimento) Nutrientes Patógenos (principalmente)
Eficiencia de remoción	BDO: 0-5% Coliformes ≈ 0% Nutrientes ≈ 0%	SS: 60-70% DBO: 30-40% Coliformes: 30-40% Nutrientes: <20%	SS: 60-99% DBO: 60-99% Coliformes: 60-90% Nutrientes: 10-50%	SS: >99% DBO: >99% Coliformes: >99% Nutrientes: >99%
Mecanismos predominante	Físico	Físico	Biológico o químico	Biológico o químico
Cumple patrón de vertimiento	NO	NO	SI	SI
Cumple patrón de reuso	NO	NO	SI	SI
Aplicación	Aguas arriba de estaciones de bombeo Etapa inicial del tratamiento indispensable. Independiente de la complejidad del tratamiento y del uso del efluente (vertimiento o reuso agrícola)	Tratamiento parcial Etapa intermedia de tratamiento Su uso depende del tipo de tratamiento posterior Recomendable en reuso para evitar obstrucción de los sistemas de riego	Tratamiento más complejo para remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos Para nutrientes con adaptaciones o inclusión de etapas específicas (parcialmente) Adecuada para la aplicación en riego (con desinfección)	Tratamiento completo para remoción de material no biodegradable y disuelto Remoción de nutrientes y coliformes Principalmente, para la remoción de patógenos Sin restricciones de uso para cualquier tipo de cultivo

Tomado y adaptado de Silva, Torres, y Madera (2007)

Los riesgos que surgen para la salud humana por el uso de AR se pueden minimizar y mitigar desde el momento en que estas se originan, y es por esto que la ONU, realiza un esquema acerca de cómo se puede dar un adecuado manejo a las AR, el cual se presenta en la Figura 3:

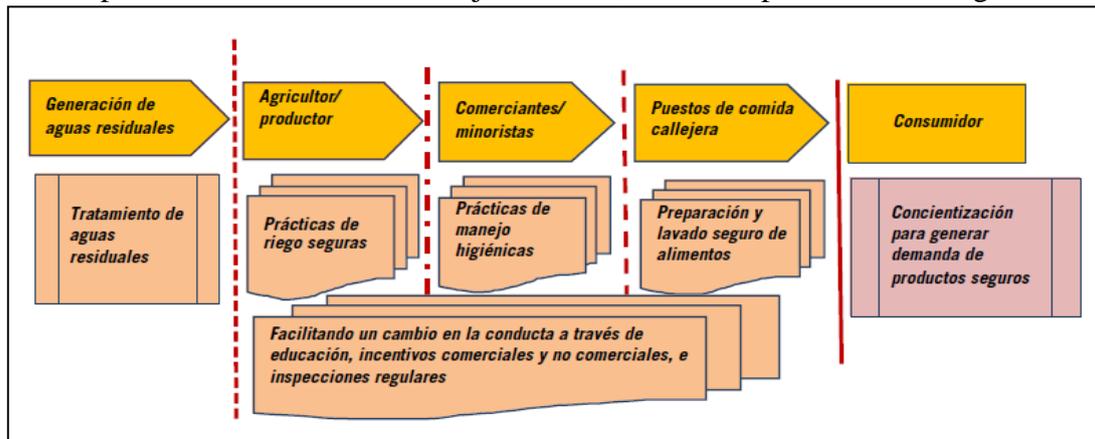


Figura 3. Esquema del enfoque para el manejo y mitigación de los riesgos que se generan por el uso de AR.

Tomado y adaptado de de Aguas residuales: el recurso desaprovechado. UN-Water (2017)

De acuerdo con la Figura 3, el enfoque está direccionado a las buenas prácticas en cada etapa del uso de las AR, siguiendo la recomendación de aplicar a estas cierto tratamiento, y dependiendo de su origen, el grado de tratamiento al que se vayan a someter según la actividad para la cual vayan a ser destinadas (UN-Water, 2017c).

Sin embargo, bajo las recomendaciones de la ONU, para la explotación agrícola, las medidas para mitigar y minimizar los riesgos ambientales, se debe evitar disponer de aquellas AR que tengan cargas de sales y metales pesados que excedan los niveles normativos. Si el problema que se presenta es el exceso de sales para las AR a usar en riego, los agricultores podrían escoger el tipo de cultivos que tengan una alta tasa de absorción de sales (entre las cuales se mencionan iones de sodio, cloruro, potasio, magnesio, sulfato, calcio y bicarbonato), que permitan reducir estas aguas en los drenajes. Entre los cultivos que se recomiendan para absorción de sales como cloruro, calcio, potasio y magnesio se encuentran *A. Thaliana*, *T. Halophila*, *S. lycopersicum* y *S. pennellii* (Guillén, 2009). Respecto a los metales pesados y otros microcontaminantes, lo más pertinente sería evitar que las AR que presentan estas características ingresen a los sistemas de riego y al ambiente, por ejemplo, controlando desde las diferentes instituciones territoriales el adecuado cumplimiento de los parámetros normativos en los vertimientos industriales, buscando que estos se sometan a un tratamiento terciario con el fin de eliminar los metales pesados y contaminantes tóxicos que se puedan presentar en este tipo de AR antes de ser usadas según la actividad para las que vayan a ser destinadas (UN-Water, 2017d).

El reúso de las AR conlleva diversos beneficios, costos, riesgos y/o desventajas asociadas a esta práctica, que se pueden resumir de manera general con base en lo que se menciona en las consideraciones de en la 0 (ONU, 2017).

A modo de resumen, en la Tabla 7 se pueden evidenciar las actividades, tipos de AR y los riesgos que representan tanto para los ecosistemas como para el ser humano, el grado de tratamiento y la inversión. Los costos de inversión se clasifican en alta, media o baja con base a los siguientes valores, tomando como base el costo de inversión inicial de un sistema de tratamiento secundario, siendo inversión baja un costo de 6 millones US\$, inversión media un costo entre 6 y 12 millones US\$, e inversión alta un costo superior a 12 millones US\$ (Jaramillo, 2011).

Tabla 6. *Beneficios, costos, riesgos y/o desventajas por reúso de AR*

Beneficios	Las AR provenientes de áreas urbanas tienen gran capacidad de fertilización; son una fuente de agua estable a lo largo del tiempo, ya que no son dependientes de la variabilidad climática. Para la agricultura pueden ser una importante alternativa, debido a que contienen nutrientes que aumentan el rendimiento de los cultivos.
	El uso de los efluentes urbanos permite disminuir los costos en bombeo y extracción de aguas subterráneas, además de prevenir la sobreexplotación de los acuíferos, y disminuir costos de transporte de alimentos.
	En las ciudades, el uso de las AR puede fortalecer la seguridad alimentaria y nutricional en las poblaciones urbanas, al ser introducidas en la cadena productiva de la agricultura; en esta actividad se pueden eliminar nutrientes que en exceso pueden contaminar las aguas subterráneas, los acuíferos y los suelos.
	Al destinar el uso de las AR para la agricultura, esta puede realizar un efecto de filtro natural en estas aguas, por la absorción de los nutrientes en las plantas, así evitando que se generen problemas como eutrofización en los cuerpos de agua y contaminación en los acuíferos.
Costos	Conlleva a que se generen costos que pueden ser altos, según el grado de tratamiento al que se deban someter, dependiendo de la actividad para la cual vayan a ser destinadas.
	Los costos de operación, mantenimiento y construcción de nueva infraestructura en las plantas de tratamiento pueden aumentar según el nivel de tratamiento que requieran las AR.
	El reúso de AR podría traer efectos e impactos negativos en los suelos a futuro, por lo que se deberán asumir los costos de remediación de estos impactos en el ecosistema.
Riesgos y/o desventajas	El reúso de AR para riego en agricultura podría generar a que se generen impactos ambientales negativos, causados por la desviación de aguas arriba de los caudales de los ríos, lo cual implica que a futuro deban ser planteadas diversas medidas para dar manejo a los impactos generados.
	Debido a la exposición y contacto de los seres humanos a los contaminantes presentes en estas aguas, tales como metales pesados, residuos de pesticidas, y microorganismos patogénicos se pueden generar problemas en la salud; si se trata de metales pesados, estos se pueden introducir en la cadena trófica.
	Puede generarse contaminación de las aguas subterráneas y la degradación de la calidad de las aguas superficiales por los vertimientos de AR en cuerpos de agua subterráneos, en muchas ocasiones, sin haber realizado un tratamiento previamente a realizar los vertimientos.
	Puede haber presencia excesiva de iones de Sodio que conlleva grandes desventajas económicas, al tener que tratarse las AR con tecnologías y procesos que consumen demasiada energía, y en muchas ocasiones, las sales continúan disueltas en las aguas después de haberse tratado, perjudicando el rendimiento de los cultivos.

Tomado y adaptado de Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y el Caribe (ONU, 2017)

Tabla 7. *Actividades que generan AR, riesgos e inversiones.*

DESCRIPCIÓN				
ACTIVIDAD	Actividades domésticas como lavado de ropa, cocina y uso de baños.	Elaboración de alimentos, minería, fabricación de piezas plásticas, metálicas, industria maderera, curtumbre y automotriz.	Riego de agua para actividades de siembra y cosecha de diferentes productos destinados, desde la canasta familiar hasta ornamentos.	Aguas recolectadas en drenajes que pueden aportar contaminantes arrastrados por las lluvias, tanto en la atmósfera, como en los tejados.
TIPO DE AR	ARD	ARnD Industrial	ARnD	ARnD Pluviales
RIESGO EN ECOSISTEMAS	Eutrofización en cuerpos de agua.	Eutrofización en cuerpos de agua y acumulación de metales pesados en el ecosistema.	Eutrofización en cuerpos de agua.	Eutrofización de cuerpos de agua y presencia potencial de sustancias nocivas para el ambiente.
RIESGO EN SERES HUMANOS	Presencia de microorganismos patógenos perjudiciales para la salud.	Acumulación de metales pesados en el organismo a través de la cadena trófica.	Presencia de microorganismos patógenos perjudiciales para la salud.	Presencia de microorganismos patógenos perjudiciales para la salud y acumulación de sustancias potencialmente nocivas para el ser humano.
GRADO DE TRATAMIENTO	Primario	Terciario	Secundario	Secundario
INVERSIÓN	Baja	Alta	Media	Media
FUENTE	Tomado del estudio “Potencial del reúso de agua residual doméstica como estrategia para el control de la contaminación en el valle geográfico del río Cauca” Llorente, 2014.	Tomado de “Aprovechamiento y reúso de aguas residuales” RALCEA,2013.	Tomado de: “Reúso de aguas residuales: un recurso hídrico disponible” Manga et al, 2011.	Tomado de: “La reutilización de aguas depuradas regeneradas a escala mundial: análisis y prospectivas” Prats-Rico, 2016.

3.5. Marco normativo

En Colombia, se puede pensar en el reúso de AR, y por esta misma razón la normativa en esta cuestión presenta diversos vacíos y oportunidades, y a su vez toman gran relevancia para que se haga esta práctica de una manera responsable social y ambientalmente. En la Tabla 8, se presenta el marco normativo colombiano de AR aplicable como alternativa de adaptación frente al estrés hídrico aplicable al territorio colombiano.

Tabla 8. Marco normativo

NORMA	DESCRIPCIÓN	RELEVANCIA
Decreto – Ley 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.	Su importancia radica en la protección de los recursos naturales, en específico el recurso hídrico, en la medida en que se debe garantizar la calidad de este y su uso responsable.
Decreto 1541 de 1978	Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto - Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973, se califica las aguas utilizadas, servidas o negras, como aguas de dominio público.	Su importancia radica en que se permite el uso de las AR, brindando así el permiso para el uso de estas.
Ley 373 de 1997	Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua, se establece el reúso obligatorio de las aguas de origen superficial, subterráneo o lluvias utilizadas en actividades que generen afluentes líquido previo a un análisis técnico, socioeconómico y de las normas de calidad ambiental.	Su importancia radica en la eficiencia y ahorro del agua, que permite dar el enfoque a disminuir y mitigar los impactos generados por el estrés hídrico en las diferentes regiones donde se pueda presentar.
Decreto Nacional de Unificación 1076 de 2015	A través del Decreto 3930 de 2010 promueve el Reúso de las Aguas Residuales a través de los Planes de Reconversión a Tecnologías Limpias en Gestión de Vertimientos – PRTLGV y lo incluye en la gradualidad para el cumplimiento de la norma de vertimientos.	Su importancia radica en abarcar las diferentes normativas enfocadas a la protección de los recursos naturales y el ambiente, que se deben tener en cuenta en antes y después que se realice reúso de las AR.
Decreto 3930 de 2010	Por el cual se reglamentan los usos del agua y residuos líquidos, y se dictan otras disposiciones, se define el reúso y lo promueve a través de los Plan de Reconversión a Tecnologías Limpias en Gestión de Vertimientos.	Su importancia radica en que se establece el ordenamiento del recurso hídrico, lo que se vuelve esencial para un adecuado aprovechamiento de los cuerpos hídricos superficiales y subterráneos.
Resolución 1207 de 2014	Por la cual se adoptan disposiciones para el reúso de aguas residuales tratadas, estableciendo los usos permitidos los parámetros de cumplimiento y demás consideraciones.	Su importancia radica en que se establecen los límites permisivos de sustancias nocivas y microorganismos en las AR que serán objeto de aprovechamiento, según su actividad.

La normativa vigente en Colombia puede presentar diferentes vacíos que no se tienen en cuenta para el reúso de las AR. Específicamente en la Resolución 1207 de 2014 no se contemplan los riesgos que se pueden generar para la salud humana y para el ambiente. Estos riesgos, se puede considerar importante que se contemplen a través de la norma con el fin de que se planteen diversas medidas para su mitigación de una manera estricta. Como se menciona previamente en el documento, también es importante que entre las entidades territoriales, como alcaldía, autoridad ambiental y usuario, haya diversas alianzas con el fin de realizar una adecuada planificación y gestión del recurso hídrico, e idealmente se deberían buscar estrategias para que se realice una reconversión de las tecnologías utilizadas actualmente en las PTAR, para aumentar la eficiencia y la calidad de las aguas, con el fin de mitigar los impactos generados por la contaminación de los vertimientos, y en la medida de lo posible que las AR, sean aptas para el reúso en otras actividades que requiera de una demanda hídrica.

4. CONCLUSIONES

El reúso de AR se puede considerar una alternativa importante para satisfacer la demanda hídrica de diferentes sectores como el energético, pecuario, piscícola, doméstico, industrial, minería, hidrocarburos, servicios, construcción y en especial el sector agrícola, el cual es el que mayor recurso hídrico demanda, debido a la vocación agrícola que presenta Colombia por condiciones como su ubicación geográfica y la gran oferta hídrica que propician las condiciones adecuadas para todo tipo de cultivos. Es de tener como prioridad realizar el tratamiento adecuado a las AR según el reúso para el cual se vayan a destinar.

Independiente si una región sufre o no los impactos del estrés hídrico, y que a futuro puedan sufrir las consecuencias del cambio climático, se hace necesario conocer las características de las AR que se pretendan destinar para reúso, la actividad que las genera y el tipo de tratamiento que requieren. Además, se debe realizar el tratamiento previo con el fin de evitar que los elementos nocivos para el ambiente y la salud, como lo son los metales pesados y microorganismos nocivos, se introduzcan en la cadena trófica y puedan generar impactos ambientales.

El estrés hídrico sólo genera y es generado por tensiones ambientales, sociales, y otras razones como la expansión de la frontera agrícola, la urbanización, el incremento de la población. Debido a esto, se hace necesario que haya un incremento en la oferta de agua potable para satisfacer las necesidades básicas de la población. Una manera de aumentar la disponibilidad del recurso hídrico es utilizando fuentes alternas de agua para los diferentes sectores y procesos productivos que se tengan en las grandes áreas urbanas.

La gestión del recurso hídrico se vuelve esenciales para administrar de forma adecuada los cuerpos hídricos disponibles. Entre los diferentes actores institucionales debe haber administración y planificación enfocadas a la prevención de la contaminación de los recursos hídricos, y a su adecuado uso, por ejemplo, desde los planes de ordenamiento territorial y los planes de ordenamiento del recurso hídrico y debe haber articulación de los instrumentos de planificación y ordenación en territorio junto con los Planes de Desarrollo Departamental, donde se puede empezar a incentivar el reúso de las AR.

Respecto a la Resolución 1207 de 2014 que regula el reúso de las AR, se plantea la necesidad de establecer una clasificación de las características de las AR, con la finalidad que se formule el tipo de tratamiento requerido y los usos posibles de acuerdo con sus orígenes y tratamiento. Adicionalmente surge una oportunidad en la cual sería pertinente implementar incentivos en el tema económico, para promover el reúso responsable de AR teniendo en cuenta la Resolución 0549 de 2015, la cual regula los parámetros y lineamientos de construcción sostenible con enfoque de ahorro de agua y energía en edificaciones, y por parte de los entes territoriales, se podrían establecer políticas públicas de ahorro y uso eficiente del agua.

La recolección y tratamiento de las AR, así como de los lodos residuales generados a partir del tratamiento de AR, se trata de un enorme desafío desde el punto de vista ambiental. El uso de AR no tratadas en la agricultura no se puede permitir bajo ninguna circunstancia debido a la contaminación que puede producir en el suelo y en las aguas subterráneas teniendo en cuenta que los requerimientos mencionados anteriormente para su reúso en la agricultura son estrictos respecto a la Resolución 0631 de 2015. En construcciones y edificaciones nuevas sería pertinente contemplar el diseño de redes de plomería para reutilizar las aguas, como las de lavadoras y pocetas de cocina, para descargar sanitarios y regar el césped. Es ideal generar programas educativos, con el fin de que la población conozca los beneficios económicos y ambientales del reúso de AR, teniendo en cuenta los impactos ambientales que se pueden generar.

Se hace necesario buscar alternativas de tratamiento de AR que permitan obtener un efluente de adecuadas características, por ejemplo las lagunas de estabilización; estos sistemas se presentan como un método muy eficiente para la remoción de contaminantes y microorganismos que representan riesgos para la salud humana y las AR resultantes de los procesos de tratamiento en este sistema se pueden considerar ideales para el aprovechamiento en la agricultura, debido a que se minimizan en gran proporción los riesgos asociados al ambiente.

La sensibilización acerca de los impactos que genera el estrés hídrico y la importancia del reúso de las AR para su mitigación, toman importancia, respecto a que deben comenzar a implementarse desde los colegios, instituciones de educación superior, y a la comunidad en general, con el fin de que haya un adecuado conocimiento, en vista que a futuro, las consecuencias del cambio climático se empezarán a manifestar de manera más contundente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Becerra, A. T., Bravo, X. B., & Membrive, V. J. (2013). *Huella hídrica y sostenibilidad del uso de los recursos hídricos*.
- CETA. (2013). *Aprovechamiento y Reuso de Aguas Residuales Tecnologías de tratamiento de Aguas Residuales para Reuso*. Buenos Aires.
- Delgado, C. (2003). *Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas*.
- Delgado, E. (2013). *Reúso de Aguas Residuales*.
- Dueñas, C., Amaya, L., & Donado, L. (2015). *Reúso del agua residual tratada: Una propuesta de regulación para el uso seguro*. Bogotá.
- Escobedo, F. L. (11 de mayo de 2007). *Adaptación del concepto de Hiperzonización a una hidrolavadora y construcción del prototipo*. Obtenido de http://caterina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/martinez_e_fl/
- FAO. (2018). *Progresos en el nivel de estrés hídrico*. Roma.
- Filho, L. (1988). *Contribuição para o entendimento do reuso planejado da água e algumas considerações sobre suas possibilidades no Brasil*.
- García, M. A. (2016). *Estudio y análisis de factibilidad para reutilización del agua en enjuagador de botellas en una línea de producción en empresa envasadora de bebidas*.
- Gordillo, D. G., Gordillo, L. F., Molano, E. G., Oviedo, A. P., & Aparicio, A. J. (2014). *Soberanía hídrica: repercusión social del fenómeno de estrés hídrico en Colombia*.
- Grupo del Banco Mundial. (2018). *Más allá de la escasez*.
- Guillén, F. A. (2009). *Absorción de K⁺ en plantas con diferente tolerancia a la salinidad*. Murcia.
- Hettiarachchi, H. (2016). *Safe use of wastewater in agriculture: Good practice examples*.
- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá.

- IDEAM. (2018). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá.
- IPCC. (2007). *Analysis of polarizing properties of birefringent negative indexed materials at optical frequencies. Proceedings of the Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON*. <https://doi.org/10.1109/MELCON.2008.4618473>
- Jaramillo, M. F. (2011). *Potencial de reuso de agua residual doméstica como estrategia para el control de la contaminación por agua residual en el valle geográfico del río Cauca*. Santiago de Cali.
- Lasso, J., & Ramírez, J. L. (2011). *Perspectivas generales del efecto del reúso de aguas residuales para riego en cultivos para la producción de biocombustibles en Colombia*.
- Madera, C. (s.f.). Carlos Madera. s.f. *Las aguas residuales y su uso en la piscicultura: normas de calidad y tecnologías de tratamiento*. Cali.
- Manga, Logreira, & Serralt. (2001). *Reúso de Aguas Residuales: Un Recurso Hídrico Disponible*. Barranquilla.
- Mara, D. (2004). *Domestic wastewater treatment in developing countries*. Londres.
- Megdal, S. B. (2007). *Uso de Aguas residuales en Tucson, Arizona*.
- Miranda, D., Carranza, C., Rojas, C. A., Jerez, C. M., Fischer, G., & Zurita, J. (2008). *Acumulación de metales pesados en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogotá*. Bogotá.
- Ochoa, L. M. (2011). *Estudio de alternativas de reuso y reciclaje de aguas residuales en aplicaciones industriales y municipales*. Bucaramanga.
- ONU. (2003). *Cambio climático y salud humana - Riesgos y respuestas*. Ginebra.
- ONU. (2007). *Informe de síntesis del cambio climático*. Ginebra.
- ONU. (2009). *Resumen del 2º informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo*.
- ONU. (2017). *Aguas residuales: el recurso desaprovechado*.
- ONU. (2017). *Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y en el Caribe: Estado, principios y necesidades*.
- ONU. (2018). *Agua limpia y Saneamiento: Progresos en el nivel de estrés hídrico*.
- Onuhabitat.org. *Estrés hídrico puede afectar 18 millones de personas hasta el 2020 [Internet]. Oficina regional para América Latina y el Caribe*. 2011 [fecha de consulta: junio 01 de 2013]. Disponible en: http://www.onuhabitat.org/index.php?option=com_content&view=article&id=422:embargo-3-de-octubre-de-2011-estres-hidricopuede-afectar-18-millones-de-persona%E2%80%A6
- Prats-Rico, D. (2016). *La reutilización de aguas depuradas regeneradas a escala mundial: análisis y prospectivas*. Alicante.
- Red Latinoamericana de Centros de Conocimiento en Gestión de Recursos hídricos [RALCEA]. (2013). *Aprovechamiento y reúso de aguas residuales*.
- Shalhevet, S. (2007). *Reúso de aguas residuales en Israel*.
- Silva, J., Torres, P., & Madera, C. (2007). *Reúso de aguas residuales domésticas en la agricultura: una revisión*.
- Universidad de Jaén. (julio-diciembre de 2016). *Agua y sostenibilidad: Depuración y reutilización de aguas regeneradas*. *Agua y Territorio*. Obtenido de <http://revistaselectronicas.ujaen.es/index.php/atma>
- UN-Water. (2015). *Wastewater Management: A UN-Water Analytical Brief*.
- WWAP. (2017). *Aguas Residuales El Recurso Desaprovechado*. *El Abreguense* (Vol. 3). Retrieved from http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf

- WWAP, P. M. de E. de los R. H. de la U. (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019 - NO DEJAR A NADIE ATRÁS.*
- Westerhoff, P. (1984). *Wastewater-impacted drinking water sources.*
- Younnos, T., & Parece, T. E. (2016). *Manejo sostenible del agua en ambientes urbanos.*
- Zaidi, M. K. (2007). *Environmental aspects of wastewater reuse.*