

NUEVAS TENDENCIAS EN EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS. UNA REVISIÓN



AUTOR

DIANA RAQUEL CORTES LATORRE

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERIA CIVIL

Tutor:

CAROL EUGENIA AREVALO DAZA

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

BOGOTÁ, 04 FEBRERO 2022

Nuevas Tendencias en el Aprovechamiento de Aguas Servidas. Una Revisión

Diana Cortes Latorre

Ensayo final Opción de Grado Curso Internacional en Gerencia de Proyectos y Pensamiento Estratégico

Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Estudios a Distancia. Programa de Ingeniería Civil

Palabras Clave: Reúso aguas residuales, agua regenerada, aguas residuales tratadas, economía circular del agua, GIRH, gestión del recurso hídrico.

Resumen

En cuestión de medio ambiente una mega-tendencia identificada y globalmente aceptada es la futura escases de agua, que tendrá origen en el crecimiento demográfico y el aumento de la demanda de agua, latente ya en algunas regiones del planeta y que puede tener repercusiones negativas en el saneamiento básico, la economía y la producción de alimentos. Ante la necesidad urgente de cambiar este panorama se ha vuelto la atención hacia las aguas servidas y todos sus potenciales y también han surgido algunas nuevas tendencias para el aprovechamiento de las mismas que representan cambios de paradigmas: en primer lugar se ha dado un avance en el concepto de aguas servidas tratadas evolucionando a aguas Regeneradas, que implica también un avance en el concepto de tratamiento migrando de un tratamiento con fines de cumplimiento de vertimiento a regeneración de agua con fines de reúso seguro; también se ha empezado a valorar el potencial del aprovechamiento de las aguas regeneradas dentro de la economía circular del agua; se ha comenzado a apreciar su potencial como una valiosa fuente de recursos, y finalmente, se ha comenzado a percibir el aprovechamiento de este tipo de aguas como una herramienta fundamental dentro de la Gestión Integral de Recursos Hídricos. En este documento se realiza una breve revisión de las 4 tendencias mencionadas, con el fin de vislumbrar el escenario futuro en cuanto a aprovechamiento de aguas servidas, mediante revisión de fuentes secundarias documentales, abordándolas de manera individual, pero en el entendido que no son independientes, sino que están interrelacionadas.

Abstract

In terms of the environment, an identified and globally accepted mega-trend is future water scarcity, caused by population growth and increasing water demand, already present in some

regions of the world, and which may have negative repercussions on basic sanitation, economy and food production. In order to change this scenario, focus has turned to wastewater and how take advantage of them. Some new trends in water usage have emerged and represent paradigm shifts: A breakthrough in the concept of treated wastewater has evolved to Regenerated water, which also implies a breakthrough in the concept of treatment migrating from discharge compliance purposes treatment to water reclamation for safe reuse purposes; Potential of Regenerated water usage in circular water economy has begun to be appreciated, wastewater has begun to be appreciated as a valuable source of resources, and finally, Regenerated water has begun to be perceived as a fundamental tool within Integrated Water Resources Management. The purpose of this document is to briefly review the four trends mentioned above, in order to envisage the future in terms of wastewater use, through a review of secondary documentary sources, addressing them individually, but with the understanding that they are not independent, but interrelated.

Introducción

Las mega tendencias son grandes cambios que ya han dado inicio y que impactarán la sociedad, la economía y/o el medio ambiente de manera relevante y por ende nuestra manera y forma de vivir. Son reformas complejas que se presentan a gran escala en comparación con otros cambios, dentro de ámbitos tecnológicos, medioambientales, económicos, políticos y sociales entre otros. (Martínez A. & Arellano G., 2018). El análisis de mega tendencias se ha convertido en una herramienta para identificar no solo los posibles cambios inminentes que se presentarán o se están presentando en un ámbito determinado a nivel global, sino también cómo repercutirán a nivel local, junto con sus posibles oportunidades y amenazas. Por esta razón, organizaciones tanto públicas como privadas, realizan estudios y publican informes para identificación de mega tendencias junto con sus posibles impactos.

Dentro de las mega tendencias actualmente identificadas, varios autores coinciden en que, en el ámbito medioambiental, una mega tendencia clara es la futura escases de recursos (entre los que se encuentra especialmente el agua), que tendrá origen en el crecimiento demográfico y el aumento

de la demanda de agua y alimentos y que ya se percibe en algunas regiones del mundo. (Eagar et al., 2014). De hecho, La Organización Mundial de las Naciones Unidas estima que en los últimos 20 años la disponibilidad de agua potable per cápita a nivel mundial ha disminuido en un 20% debido al aumento de la población y que cerca del 60% de las zonas cultivables sufren de escases de agua; también estima que el número de habitantes de las zonas urbanas del planeta se duplicará para el año 2050 (ONU, 2020). Así mismo, la UNESCO afirma que alrededor de una quinta parte de la población mundial habita en zonas de escasez de agua la cual se presenta no solo debido al aumento en los niveles de uso doméstico, el uso en aplicaciones industriales y la producción de energía, sino también debido al deterioro de la calidad de las fuentes (Naciones Unidas, 2015). De otra parte, la Fundación Internacional AQUAE, manifiesta que para el año 2050, se aumentará en un 55% el nivel de uso de agua potable (comparado con el año 2000) y el 40% de la población mundial habitará en zonas con estrés hídrico (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental (FCEA), n.d.). En el mismo sentido, la FAO estima que el consumo de agua potable está en aumento no solo debido al aumento de la población sino a una mayor demanda per cápita debido a estilos de vida, generando en consecuencia estrés hídrico, el cual puede ser agravado por el calentamiento global, ya que de alcanzarse un aumento en la temperatura global de más de 2°C, hasta 400 millones de habitantes podrían padecer hambre y hasta 2000 millones no podrían satisfacer sus necesidades de agua básicas para consumo, higiene y producción de alimentos (Winpenney et al., 2013). Finalmente, el Banco Mundial, estima que la crisis del agua puede adicionalmente, representar uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo, más aún cuando el agua impacta el desarrollo económico mundial, es un factor determinante en la salud humana, e impacta casi todos los objetivos de desarrollo sostenible fijados por la Organización de las Naciones Unidas para el periodo 2015-2030. (Rodriguez et al., 2018).

En cuanto a disponibilidad de agua a nivel mundial, solo cerca del 2.5% del total del agua del planeta es agua dulce y de ésta menos del 1% está disponible para el consumo humano y el medio ambiente (FCEA, n.d.). La FAO estima que solo entre 9 y 14 mega metros cúbicos a nivel mundial están disponibles para uso humano. De otra parte, en lo referente a usuarios y usos, los principales usuarios del agua son el hombre y de otra parte el medio ambiente y los ecosistemas; Los principales usos dados por el ser humano son en agricultura (69%), industria (19%) y usos

domésticos (12%), estos porcentajes son un promedio mundial, pero varían de un país a otro, existiendo países que tienen una muy alta demanda de agua (FCEA, n.d.). Estos usos y usuarios en un contexto de estrés hídrico y sobre explotación, a menudo compiten por el recurso, dándosele prioridad a los usos dados por el hombre, es así como se prevalece el uso doméstico e industrial de agua sobre el uso agrícola y a su vez se prevalece el uso agrícola sobre las necesidades de los ecosistemas. (Winpenny et al., 2013)

Teniendo en cuenta este escenario, contaminar agua mediante el uso de ésta, en procesos industriales o domésticos, para luego contaminar más agua mediante el vertimiento de la primera, es un proceso que se debe detener y replantear con la mayor prontitud posible. Es en este escenario, donde cobra gran importancia el aprovechamiento de las aguas servidas, especialmente las aguas servidas regeneradas.

El reúso de aguas servidas, entendiendo como reúso el aprovechamiento de las aguas previamente utilizadas, en actividades diferentes de las que fueron originadas, es una práctica utilizada desde hace siglos en diferentes lugares del planeta. Hay evidencia de esta actividad en Atenas y antigua Grecia 3 milenios antes de Cristo, a partir del siglo XVIII en países como Alemania, India, Francia, México e Inglaterra, y durante el siglo XX en otros lugares como África, Arabia, Estados Unidos, e Israel (Fundacion Chile, 2016; Silva et al., 2008). Sin embargo, este reúso se ha dado más comúnmente de forma indirecta y no planeada. Es decir, cuando aguas residuales que son vertidas a cuerpos de agua o al ambiente, se diluyen dentro de aguas que posteriormente son utilizadas por un nuevo usuario (reúso indirecto), y cuando un usuario utiliza aguas residuales diluidas (por ejemplo aguas superficiales o subterráneas contaminadas por aguas residuales) sin intención, sin conocimiento y sin control (reúso no planeado) (Da Silva Antunes de Souza & Pasold, 2019).

Ante la necesidad urgente de cambiar este panorama se ha vuelto la atención hacia las aguas servidas y su potencial y han surgido algunas nuevas tendencias para el aprovechamiento de las mismas que representan cambios de paradigmas: Se ha dado un avance en el concepto de aguas servidas tratadas evolucionando al concepto de aguas Regeneradas, que implica también un avance

en el concepto de tratamiento migrando de un tratamiento con fines del simple cumplimiento de normas de vertimiento a regeneración de agua con fines de reúso seguro a nivel de salud pública como medio ambiental; Se ha empezado a valorar el potencial del aprovechamiento de las aguas regeneradas dentro del modelo de economía circular del agua, se ha comenzado a apreciar su potencial como una valiosa fuente de recursos, y finalmente, se ha comenzado a percibir el aprovechamiento de este tipo de aguas como una herramienta fundamental dentro de la Gestión Integral de Recursos Hídricos.

El presente documento tiene como objetivo realizar una breve revisión de las 4 tendencias mencionadas, con el fin de vislumbrar el escenario futuro en cuanto a aprovechamiento de aguas servidas. Cada tendencia se aborda de manera individual, aunque no son independientes, sino que están interrelacionadas y hacen parte de una mega tendencia general en lo referente al aprovechamiento de aguas servidas: utilizar al máximo su potencial como herramienta y estrategia dentro de los planes y esfuerzos para la protección y conservación de los recursos hídricos de cara al futuro.

La revisión se realizó mediante una búsqueda y exploración de fuentes secundarias tales como publicaciones en bases virtuales confiables y repositorios de libre consulta en plataformas como ScienceDirect, Scielo, Researchgate y el Repositorio de la Universidad Militar Nueva Granada, así como publicaciones de organizaciones reconocidas.

1. Mas allá del tratamiento de Aguas Servidas: Aguas Regeneradas

El concepto de aguas regeneradas representa una evolución y avance en el entendimiento de lo que las aguas residuales tratadas deben ser.

Las aguas regeneradas son aguas servidas que han sido sometidas a un tratamiento específico, que a menudo incluyen tratamientos terciarios, para lograr una calidad mínima requerida para la

actividad a la que serán destinadas, de tal forma que no generen impactos negativos y sea viable su reutilización. La regeneración de las aguas comprende y envuelve todos los procesos de tratamiento que sean necesarios para que las aguas puedan reusarse. Las aguas residuales parcialmente tratadas no se consideran aguas regeneradas. (Fundacion Chile, 2016; Winpenny et al., 2013)

En la Legislación Española, el Real Decreto 1620/2007, que rige lo relacionado con el reúso de aguas depuradas, hace distinción entre el concepto aplicable a las aguas servidas tratadas y las aguas regeneradas, indicando que las primeras son aguas sometidas a un tratamiento suficiente para cumplir con la norma aplicable para vertimientos, mientras que las segundas son aguas sometidas a tratamientos adicionales que permitirán su uso en la aplicación a la que serán destinadas. (Ministerio de Sanidad y Consumo, 2007).

En Colombia no es común el uso del término agua Regenerada, pero la resolución 1207 de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible definió las aguas residuales tratadas como *“aquellas aguas residuales, que han sido sometidas a operaciones o procesos unitarios de tratamiento que permiten cumplir con los criterios de calidad requeridos para su reúso”* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014), concordando con la definición de aguas regeneradas de la legislación española. Sin embargo, en noviembre de 2021 se promulgó la Resolución 1256 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la cual derogó la resolución anterior y retiro de su regulación esta definición.

La definición de aguas regeneradas lleva el concepto de reúso más allá de simplemente el aprovechamiento de las aguas previamente utilizadas, adicionando la idea de que este aprovechamiento debe ser seguro, consciente y previsto, sin importar si el uso de las aguas regeneradas se realiza de forma directa o indirecta, e implicando que se conoce con anterioridad la actividad a la que serán destinadas las aguas y por lo tanto la calidad mínima requerida

Desde este punto de vista, el uso de aguas regeneradas involucra al menos, y de manera breve, los siguientes aspectos:

Planificación exhaustiva del uso y gestión del agua Regenerada: la cual envuelve una serie de aspectos, entre los que se encuentran, de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO: análisis del entorno, estudios de mercado, legales, técnicos y socio - económicos y por supuesto una evaluación financiera, para identificar y evaluar todos los factores relevantes (Winpenney et al., 2013). Esto sugiere una evaluación del proyecto de regeneración de agua completa y convencional.

Inicialmente se requiere un análisis de la necesidad a solucionar y fijación de los objetivos del proyecto tanto específicos en el ámbito del reúso de aguas servidas, como generales en un ámbito más amplio de protección del medio ambiente, recursos hídricos y salud pública. También se debe incluir un análisis del entorno que incluya la zona geográfica que alcanzará e impactará el proyecto, junto con antecedentes, factores climáticos, impactos en las fuentes de agua y sus potenciales de reutilización. Será necesario un estudio de mercado que incluya los posibles usos del agua regenerada, posibles usuarios, balance de los flujos de aguas servidas y demandadas después de la regeneración, capacidad económica y disposición de los posibles usuarios a pagar por el agua regenerada entre otros; Se requiere de igual forma un estudio legal, que identifique y analice el marco normativo aplicable al proyecto, el cual incluye los requerimientos legales en cuanto a la calidad del agua regenerada requerida para el uso al que se destinará, aspectos de salud pública y las regulaciones en cuanto a intercambio de derechos de agua entre productores y usuarios de agua regenerada, así como regulaciones de autoridades gubernamentales competentes; Entre los aspectos técnicos a definir y evaluar se encuentran el periodo de vida útil del proyecto, la calidad inicial de las aguas residuales a regenerar, la calidad final del agua regenerada según el uso proyectado y los procesos, instalaciones y sistemas de tratamiento requeridos; La evaluación económica y financiera deberá incluir un análisis de retorno de la inversión y de costo – beneficio, que abarque no solo los aspectos de costo y precio del agua regenerada, sino del valor intrínseco del agua, evaluado teniendo en cuenta todos los aspectos implicados, como se aborda en el siguiente apartado No. 2. Dentro del estudio Socio - Económico es necesario tener en cuenta que un proyecto de agua regenerada debe contar con aceptación por parte de los posibles usuarios por lo que se debe incluir un análisis de derechos a agua de fuentes convencionales que tienen estos posibles usuarios, así como la disposición al uso del agua regenerada y los prejuicios alrededor de

la misma. Finalmente, la Evaluación ambiental debe ser aceptable para las autoridades medio ambientales, y las autoridades sanitarias deben estar de acuerdo en que el uso del agua regenerada no generará riesgos de salud pública. (Winpenny et al., 2013)

Marco Legal: Se requiere un marco legal que regule y ofrezca directrices y guías sobre los aspectos relacionados con la calidad del agua regenerada según el uso al que se destina, y que idealmente regule también el intercambio de derechos de agua y asigne los recursos necesarios para los proyectos de regeneración de aguas. En este sentido, dos de los países más avanzados son España y Estados Unidos. España cuenta con el Real Decreto 1620 expedido en el año 2007, el cual determina la calidad del agua regenerada según su destinación, junto con los controles, muestreos y criterios de aceptación y además regula el uso de aguas regeneradas, y establece las responsabilidades de los usuarios, concesionarios y administración pública (Da Silva Antunes de Souza & Pasold, 2019). Estados Unidos va un paso más allá ya que cuenta con una larga historia de normativa para el reúso planificado de aguas residuales, que data al menos de 1912, específicamente en los estados de Arizona y California (Martin, n.d.); De acuerdo con el Water World Journal, en agosto de 2020, cursaba en el congreso de los Estados Unidos la ley de Infraestructura de Agua y la Ley de Infraestructura de Agua Potable de 2020, que proyectan en conjunto una destinación de casi 20 billones de dólares y dentro de las cuales se reautoriza el programa de Subsidios de Fuentes Alternativas de Agua que consiste en proyectos de reutilización de agua (Maya, 2020).

Contar con un marco legal que regule el uso de aguas regeneradas es actualmente uno de los mayores retos. (Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável CEBDS, 2018), Las normativas son muy restrictivas e incompatibles, además de que se requiere coordinación legislativa interinstitucional e intersectorial, lo cual no existe en la mayoría de los países de Latinoamérica y el Caribe (Rodriguez et al., 2018). Solo un número reducido de países cuenta con una normativa reglamentada para la regeneración de las aguas servidas y el uso de agua regenerada (Winpenny et al., 2013), aun cuando las naciones que han avanzado ampliamente en esta área, comparten la cualidad de incluir la regeneración de agua dentro de sus agendas de gestión

integral de recursos hídricos GIRH, apoyados en normativas que no solo regulan el uso de agua regenerada sino que lo fomentan (Fundacion Chile, 2016).

En Colombia, en el año 2014, se promulgó la resolución 1207 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, mediante la cual se adoptaron disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. En noviembre de 2021 se promulgo la Resolución 1256 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la cual derogó la resolución anterior y adoptó disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales, retirando el concepto de aguas residuales tratadas. Esta nueva ley establece criterios mínimos de calidad únicamente para uso agrícola y uso industrial de aguas servidas y otorga la responsabilidad del cumplimiento normativo al usuario receptor (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

A nivel mundial y únicamente para uso de agua regenerada en riego agrícola, se cuenta con las Guías de uso de agua residuales, excretas y aguas grises de la OMS (2006) y las guías para uso seguro de aguas servidas de la FAO-PNUMA-OMS (2006), las cuales refieren los tratamientos requeridos, las restricciones en cultivos y métodos de aplicación, y controles en cuanto a la salud de los trabajadores. (Winpenny et al., 2013). Para otros usos se cuenta con las Guías y Manual para reúso de agua (1992) de la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos EPA.

Instalaciones y Facilidades para la Regeneración de Agua: Los sistemas e instalaciones de tratamiento contemplados dentro de los aspectos técnicos del proyecto de regeneración de agua a evaluar, desde el punto de vista técnico no representan uno de los grandes desafíos a superar, más aun teniendo en cuenta que actualmente existen las tecnologías necesarias para lograr la calidad requerida y para la recuperación de recursos (Fundacion Chile, 2016). El reto en este aspecto consiste en pasar del concepto de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), al concepto de Instalaciones de Recuperación de Recursos Hídricos (IRRH) (WRRF Water Resources Recovery Facility, en inglés).

Las IRRH representan el futuro de las empresas de agua y de los proyectos de regeneración de aguas servidas. La gestión de estas empresas estará enmarcada dentro de la economía circular, serán sostenibles y neutras en consumo de energía y generarán valor económico mediante la recuperación de recursos y la gestión de lodos. Las IRRH reconocerán el valor real del agua y estarán encaminadas a la recuperación de todos los recursos que proveen las aguas servidas.

Este concepto es uno de los cuatro pilares de la Iniciativa del Banco Mundial “Aguas Residuales: de residuo a recurso” (2018) creada para generar conciencia sobre el potencial de las aguas servidas y para brindar un marco conceptual que facilite la migración hacia una económica circular en la gestión de estas aguas, a nivel de Latinoamérica y el Caribe. La iniciativa se basa en cuatro pilares: gestionar el agua a nivel de cuenca, innovar en cuestión de modelos financieros y de negocio, promover la generación de políticas públicas y normativas en el sector y migrar de PTAR a IRRH (Acción 2) (Rodriguez et al., 2018).

Generador y usuario de Agua Regenerada. Es decir, una persona, empresa, municipalidad o gobierno que tiene los derechos sobre las aguas regeneradas y que está dispuesta a cederle esos derechos a una persona, empresa, municipalidad o gobierno para que haga uso de esas aguas, en una transacción que debe generar beneficios para las dos partes, valorados económicamente. (Winpenny et al., 2013)

De lo anterior se desprende que la evolución de las aguas residuales tratadas con fines de vertimiento a aguas regeneradas con fines de reúso no solo conlleva el cambio de concepto hacia un tratamiento más completo y seguro, sino que también implica la estructuración de proyectos completos de regeneración que incluyan los estudios necesarios, pero que además requieren de la existencia de un marco legal para su viabilidad y factibilidad.

2. Aprovechamiento de las Aguas Servidas dentro de la Economía Circular

La economía circular es un modelo económico y de negocios orientado a mantener el crecimiento y desarrollo, pero con objetivos de sostenibilidad. Se aleja del modelo económico lineal donde los recursos se extraen, se consumen y luego se desechan, migrando a un modelo basado en políticas de reutilización y reciclaje, que reduce el consumo de recursos y convierte los residuos en nuevos recursos y donde los recursos mantienen utilidad y valor durante todo el ciclo productivo. La economía circular es una herramienta que puede mitigar o eliminar impactos en el medio ambiente (cambio climático, estrés hídrico, pérdida de recursos y biodiversidad) manteniendo el crecimiento y desarrollo actuales, sin comprometer los recursos futuros. (Arroyo, 2018)

La visión de economía circular es restaurativa en esencia. Busca preservar el medio ambiente controlando las existencias de recursos no renovables y equilibrando el uso de recursos renovables, optimizando la utilización de recursos mediante el tránsito de estos en ciclos no solo técnicos sino biológicos, compartiendo recursos, minimizando el uso de insumos que impidan la reutilización o reciclaje de recursos, reduciendo emisiones y manteniendo el valor de los recursos en todo el ciclo. (Cerdeira & Khalilova, 2016)

La urgencia de gestionar los recursos en un modelo de economía circular está ampliamente reconocida. La Organización de las Naciones Unidas cuenta con una plataforma lanzada en el año 2019 a través del programa para el medio ambiente PNUMA, mediante la cual busca facilitar a los líderes de todos los sectores el entendimiento de la economía circular, su alcance y el cómo se alinea con el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los objetivos del Acuerdo de París; También a través del programa para el desarrollo PNUD en el año 2020, la ONU emitió notas de orientación sobre mitigación del cambio climático y economía circular. Así mismo, la OCDE cuenta con un programa de economía circular para ciudades y regiones lanzado en el año 2019, la Unión Europea adoptó un plan de acción de economía circular (actualizado en 2020) y el Banco Mundial está lanzando un programa global para gestión de la contaminación y la economía circular. Todas estas entidades reconocen que la economía circular es una herramienta conveniente para preservar los ecosistemas, mejorar la competitividad, generar beneficios sociales y tiene alto potencial desde el punto de vista económico (Delgado et al., 2021). De otra parte, está

en vigencia la iniciativa del Banco Mundial “Aguas Residuales: de residuo a recurso” (2018), que se mencionó en el apartado anterior, orientada a fomentar la migración hacia una económica circular en la gestión de las aguas servidas, a nivel de Latinoamérica y el Caribe. En lo referente a Colombia, el país cuenta con una estrategia de economía circular que hace parte del Plan de Desarrollo 2018-2022.

Dentro de una economía circular, el agua se trata como un recurso y producto que puede ser modificado, mejorado y suministrado en un proceso cerrado y sucesivo, manteniéndolo en circulación el mayor tiempo posible, evitando su pérdida o desperdicio y favoreciendo el reúso y reciclado. Este modelo busca desligar el desarrollo económico del agotamiento de los recursos hídricos. (Da Silva Antunes de Souza & Pasold, 2019)

De esta forma la gestión del agua dentro de un modelo de economía circular, se puede definir por medio del modelo basado en las 5R de la sostenibilidad, generado por la International Water Association que consta de 5 principios base: Reducir la cantidad de agua utilizada y las pérdidas de agua, Reusar el agua cuantas veces sea posible, Recuperar especialmente la energía y recursos que están embebidos en las aguas residuales, Reciclar no solo el agua sino los nutrientes que se encuentran en las aguas residuales y Reabastecer el medio ambiente mediante la devolución de las aguas con el fin de regenerar el recurso que se está utilizando (CROSS, 2015).

El modelo de las 5Rs ofrece un marco conceptual que es reconocido ampliamente como una estrategia de gestión del agua en el ámbito de la economía circular y una herramienta para implementar este modelo y para la innovación en este campo (CEBDS, 2018; CROSS, 2015; Da Silva Antunes de Souza & Pasold, 2019).

Sin embargo, la implementación de la economía circular en el sector agua presenta algunos retos:

De una parte, el banco Mundial afirma que la agenda de economía circular de alto nivel se centra en los procesos productivos y la gestión de residuos, pero no incluye de fondo el sector agua. (Delgado et al., 2021). Se requiere entonces de acciones y políticas urgentes para implementar procesos y programas de tratamiento reciclaje y reutilización del agua, donde intervengan e

inviertan fuertemente tanto el sector público como el privado. (International Water Association IWA, 2018)

De otra parte, en la economía circular el recurso agua se trata como un bien capital natural al cual se le otorga un valor y el cual requiere de una infraestructura y operaciones de alto costo para ser aprovechado y recuperado después de su uso. Estos costos pueden ser superiores comparados con el costo de explotación de agua por medios habituales, lo que puede conllevar a favorecer los modelos económicos convencionales sobre la protección del recurso (Da Silva Antunes de Souza & Pasold, 2019). Por esta razón es necesario hacer distinción entre valor del agua versus precio y costo del agua, los cuales son diferentes y se evalúan desde perspectivas diferenciadas; es así como el suministro de agua potable para hogares tiene un alto valor económico y social, aunque el precio que paga el usuario muchas veces es menor que el costo económico de distribución y suministro.

El valor del agua depende del uso que se le dé y los factores económicos ligados a ese uso, pero también de factores ligados al medio ambiente y a los riesgos de desabastecimiento y pérdida de productividad. Es así como el valor del agua llevado a términos monetarios no solo debe tener en cuenta los costos asociados a su explotación, reciclaje, tratamiento, o la utilidad marginal derivada de su uso, sino que debe incluir el valor según la función que cumple en su estado natural en relación con la ecología y el medio ambiente, así como los servicios que presta en navegación, recreación, práctica de deportes, esparcimiento, entre otros. Dado que el agua está incorporada en la mayoría de los aspectos de la relación economía - medio ambiente, esta debe hacer parte y ser valorada dentro de los bienes naturales de una nación, teniendo en cuenta su papel dentro de los ingresos de la nación. (Winpenny et al., 2013) Cuando en el análisis de retorno de inversión de alternativas de regeneración y reúso de aguas se consideran los costos de los riesgos asociados a la escasez de agua para saneamiento, uso industrial, agrícola o el costo de limitar la productividad y el crecimiento, el resultado no solo es positivo, sino que ofrece ventajas (Da Silva Antunes de Souza & Pasold, 2019). Tal es el caso de la ciudad de Aqaba en Jordania, la cual implementó un programa de vertimiento cero (basado en 3 pilares: reúso y venta de agua regenerada, reducción de costos mediante el aprovechamiento de energía generada en el tratamiento de las aguas servidas y obtención de financiación del sector privado sobre la base de intereses compartidos), donde si bien se generan más de 4 millones de dólares en ingresos al año por venta de agua regenerada, la

rentabilidad de la inversión en el tratamiento y la reutilización del agua se mide en términos de turismo, salud pública y bienestar general de los residentes (International Water Association IWA, 2018).

Entender el valor real del agua es fundamental en la economía circular, actualmente el agua está valorada por debajo de su valor real y potencial y a menos que se le otorgue al agua el valor real, no será posible generar alternativas de recuperación del recurso. (Rodriguez et al., 2018)

En el marco de la economía circular del agua, el aprovechamiento de las aguas servidas representa uno de los mayores potenciales para generar valor y ofrece amplias oportunidades en todos los aspectos del modelo de las 5Rs:

Contribuye a reducir la cantidad de agua utilizada al conformar una fuente de agua alternativa, que puede ser usada en todas las aplicaciones donde no se requiera agua dulce o potable, por lo cual el potencial para liberar la presión de explotación y disminuir el estrés hídrico del medio ambiente es muy amplio. Facilita el reúso de agua y otros elementos a través de los procesos de regeneración. Permite la recuperación de los recursos que están presentes en las aguas servidas, promueve el reciclaje de agua y nutrientes y representa una fuente de gran valor para reabastecer los sistemas hídricos.

Algunos de los potenciales del aprovechamiento de aguas servidas dentro de los aspectos mencionados anteriormente se abordan en el siguiente apartado.

3. Las aguas Servidas como Fuente Valiosa de Recursos

Como se mencionó anteriormente, en una economía circular se otorga al agua su valor real. En el caso de las aguas servidas, dado que el modelo de economía circular tiene una visión de regeneración de los ecosistemas naturales, evitando desperdicios y aprovechando al máximo cada recurso (Delgado et al., 2021), éstas cobran un gran valor y una gran importancia debido a su alto potencial de aprovechamiento.

A la luz de la estrategia de las 5Rs, el aprovechamiento de las aguas servidas se puede explotar en cada una de las cinco políticas: Contribuye a reducir la cantidad de agua utilizada al conformar una fuente de agua alternativa, facilita el reúso de agua como agua regenerada, permite la recuperación de recursos que están presentes en estas aguas, facilita el reciclaje de agua y nutrientes y pueden ser una fuente para reabastecer los sistemas hídricos.

Desde el punto de vista de sus funciones dentro de la economía, las aguas servidas pueden ser aprovechadas como insumo dentro de actividades agrícolas o industriales, como fuente de energía aprovechando el biogás generado durante el proceso de tratamiento y como fuente de nutrientes y productos químicos, es decir, tiene potencial en el ámbito de la energía, agua y materias primas (Delgado et al., 2021).

El potencial de aprovechamiento de las aguas servidas más explotado es el reúso, el cual presenta una gran ventaja medio ambiental al permitir el uso de aguas de calidad inferior en comparación con el agua potable, en actividades en que no se requiere la mayor calidad, reduciendo la presión de explotación sobre fuentes de agua naturales y reduciendo el vertimiento de aguas servidas.

El reúso de aguas servidas se da principalmente en riego agrícola, lo que no es de extrañar si se tiene en cuenta que las actividades agrícolas representan el 70% del consumo de agua dulce en el planeta (Winpenney et al., 2013) y que esta es una práctica ancestral. De hecho, el 32% de las aguas regeneradas usadas a nivel mundial se utilizan en riego agrícola y el 20% en riego urbano. (Fundacion Chile, 2016).

El reúso de aguas servidas en riego agrícola presenta una serie de ventajas adicionales a las medioambientales: Desde el punto de vista de la nutrición de cultivos, debido al aporte de elementos presentes en estas aguas tales como Nitrógeno, fosforo, sodio, potasio y materia orgánica, permite reducir sensiblemente la utilización de fertilizantes, aunque también puede producir problemas de salinidad en los suelos y representar riesgos para la salud de los trabajadores dependiendo del tratamiento; Desde el punto de vista del tratamiento no se requieren tratamientos terciarios para eliminación de los elementos mencionados anteriormente. Para el agricultor, ofrece

una fuente alternativa de agua disponible todo el año; finalmente una ventaja adicional es que se cuenta con amplios estudios y directrices para la utilización de aguas regeneradas, como las guías de uso de agua residuales, excretas y aguas grises de la OMS (2006) y las guías para uso seguro de aguas servidas de la FAO-PNUMA-OMS (2006), que tienen en cuenta los factores físicos, químicos y microbiológicos relevantes en la calidad de las aguas para este uso. (Silva et al., 2008; Winpenny et al., 2013)

Otras aplicaciones en reúso de agua regenerada son:

Usos urbanos de aguas no potables, donde se aprovecha aproximadamente el 8% del agua reutilizada a nivel mundial (Fundacion Chile, 2016) en actividades como lavado de calle, alcantarillados y vehículos, sanitarios, aire acondicionado. (Prats-Rico, 2016).

Usos industriales donde se aprovecha aproximadamente el 19% del agua reutilizada a nivel mundial (Fundacion Chile, 2016) en actividades como agua para procesamiento industrial, aguas de limpieza, torres de enfriamiento, fabricación de concreto, control y lavado de finos, cimentaciones. (Prats-Rico, 2016).

Usos recreacionales donde se aprovecha aproximadamente el 6% del agua reutilizada a nivel mundial (Fundacion Chile, 2016) en actividades como aguas decorativas, aguas recreativas destinadas a navegación, pesca, deportes, nieve artificial. (Prats-Rico, 2016).

Una gestión adecuada del reúso de aguas servidas puede llevar a vertimiento cero, tal es el caso de la ciudad de Aqaba, citado en el apartado anterior, donde el programa de vertimiento cero, permite tratar y reusar el 90% de las aguas residuales, generando más de 4 millones de dólares en ingresos al año por venta de agua regenerada y valiosos beneficios a nivel de turismo, salud pública y bienestar general de los residentes (International Water Association IWA, 2018). En Colombia una experiencia exitosa de reúso de aguas residuales y vertimiento cero a pequeña escala, es la Agrupación de Vivienda Campestre Bosques Granada y Cayunda, localizada cerca de la ciudad de Bogotá en el Municipio de la Calera, donde se capta y se trata la totalidad de las aguas residuales generadas las cuales son almacenadas para ser utilizadas en el riego de amplias zonas verdes. La agrupación cuenta con dos redes de suministro de agua: agua potable y agua regenerada, que entregan agua de diferentes calidades a los usuarios, quienes escogen de manera consciente y de

acuerdo a sus necesidades de uso el suministro a utilizar (Agrupación de Vivienda Campestre Bosques Granada y Cayunda, 2010).

No obstante, las amplias aplicaciones en cuanto a reuso de aguas regeneradas, las aguas servidas siguen siendo uno de los recursos de mayor potencial, pero menos explotados con los que cuenta el hombre. Estas aguas son fuente de nutrientes, celulosa, papel, plástico, metales, biogás y por supuesto agua (International Water Association IWA, 2018). La FAO estima, por ejemplo, que el 22% de la demanda global de fosforo, podría ser suplida a través del aprovechamiento de las aguas servidas (FAO, 2017). Ciertamente la reutilización del agua añade valor al agua al pasar del tratamiento con fines de cumplimiento de normas de vertimiento, al tratamiento confines de utilización del producto final (Prats-Rico, 2016), pero el aprovechamiento de sus demás potenciales genera valor adicional de cara a los objetivos de recuperación, reciclaje, reducción y recarga, así como la nueva visión de empresas de agua como Instalaciones de Recuperación de Recursos Hídricos.

La obtención de productos de valor añadido a partir del aprovechamiento de las aguas servidas es un cambio de paradigma, que ya se está haciendo visible. De hecho, un estudio de tendencias en el aprovechamiento de aguas residuales, realizado en el 2018 y que evaluó mediante análisis estadísticos las patentes registradas en esta materia entre los años 2000 y 2017, identificó una tendencia creciente hacia la obtención de productos de valor agregado y generación de tecnologías a partir de las aguas servidas. Entre los productos a recuperar se encuentran elementos como Ti, Pd, Zn, S, Cu, Ni, Cd, tintas, metales pesados, fluoruros, y estruvita, entre otros. (Hernandez et al., 2019).

Los subproductos del tratamiento de agua constituyen otros elementos que generan valor añadido al agua. El biogás producido en los sistemas de regeneración que incorporan tratamientos anaerobios representa una fuente de energía aprovechable tanto al interior de la Instalación, como un posible producto a ofertar. Este biogás puede ser utilizado como combustible, en la generación de energía eléctrica, en procesos de calefacción o en procesos de secado. Un ejemplo del aprovechamiento de este potencial se da en la empresa de agua de Distrito Municipal de Servicios

Públicos de East Bay donde se genera electricidad a partir del biogás para sus requerimientos internos, vendiendo el excedente a la red de energía local. (Rodríguez et al., 2018)

Los lodos que se generan durante el tratamiento, convertidos en biosólidos, es decir tratados o compostados, pueden ser ofertados para su uso como fuente de nutrientes, mejorador de suelos, combustible y material de construcción. (Rodríguez et al., 2018). El aprovechamiento de lodos provenientes de sistemas de tratamiento de aguas residuales ha sido una experiencia exitosa en la ciudad de Bangkok, donde la municipalidad recoge y trata los lodos sépticos, para utilizarlos como abono en parques públicos, zonas verdes circundantes y agricultura, actividad alrededor de la cual se han generado nuevas economías, además de reducir la contaminación. (International Water Association IWA, 2018)

Finalmente, otro aprovechamiento potencial y de altísimo valor de las aguas regeneradas es el uso en rehabilitación ambiental, mediante la recarga de acuíferos y otras aguas naturales. En el caso de los acuíferos, la sobreexplotación de los mismos debido al excesivo bombeo a través de pozos profundos construidos puede provocar la disminución de la napa de agua al existir un desbalance entre la recarga por medio de aguas lluvias. La recarga de estos acuíferos consiste en tomar aguas de fuentes alternativas como las aguas regeneradas e introducirlas dentro del acuífero (Fundacion Chile, 2016) Esta práctica es un ejemplo del reúso directo y planeado de aguas regeneradas, que luego tendrá un nuevo uso indirecto al ser utilizadas en forma diluida en la explotación de pozos. (Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua - Universidad de Salamanca, 2018). Sin embargo, en esta práctica es difícil de evaluar desde el punto de vista económico, ya que se genera un costo de tratamiento, pero puede no producir flujo de ingresos, requiriendo para su funcionamiento de subsidios o subvenciones. (Rodríguez et al., 2018). Este es el principal aprovechamiento donde la valoración del agua se debe abordar desde el punto de vista de bienes de la Nación, y el beneficio del aprovechamiento se debe evaluar teniendo en cuenta los riesgos asociados a la escasez y desabastecimiento.

4. El Aprovechamiento de Aguas Servidas Dentro de la GIRH

La Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH), es una estrategia para la administración del agua, el suelo y los otros recursos naturales de forma coordinada, con el fin de alcanzar los mayores resultados en el ámbito económico y de bienestar social, sin comprometer la sostenibilidad del medio ambiente (Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, n.d.).

El concepto de GIRH se acuñó y debatió por primera vez en La Cumbre Mundial Sobre Desarrollo Sostenible de 1992; la cumbre de 2002, insto al mundo a desarrollar políticas de GIRH, con un enfoque orientado a evaluar las necesidades de agua, evaluar la disponibilidad de fuentes de agua y ajustar los suministros de agua. (Winpenny et al., 2013)

La GIRH ofrece un camino hacia una gestión eficiente, equitativa y sostenible, de los recursos hídricos, también ofrece un marco conceptual para el diseño de políticas públicas de administración de recursos hídricos. La GIRC cubre entre otros aspectos, la ordenación y administración de cuencas incluyendo aguas superficiales y subterráneas, análisis y gestión de riesgos, educación y participación ciudadana en la administración del agua, monitoreo de recursos hídricos. (Hernández Pasichana & Posada Arrubla, 2018)

El aprovechamiento de las aguas servidas, especialmente en reúso y reabastecimiento, y como herramienta para aliviar el estrés hídrico, es una estrategia importante en la GIRH. Sin embargo, sus beneficios potenciales no pueden ser evaluados sin considerar todos los usuarios y fuentes de agua, disponibilidad y demanda y por supuesto el medio ambiente. En este sentido es claro que la unidad de evaluación debe ser a nivel de cuenca. (Winpenny et al., 2013). Esto se ejemplifica con la definición de índice de estrés hídrico que corresponde a la relación entre la demanda total y la disponibilidad de agua en una cuenca (Prats-Rico, 2016), el cual tiene implícito de forma indirecta una evaluación cuantitativa de masas de agua, requiriendo de una frontera natural para su evaluación.

En la Unión Europea, la Directiva Marco del Agua, ordena la planificación hidrológica por unidad de cuenca, lo que se convierte en un herramienta técnica que brinda la oportunidad de gestionar

eficientemente las masas de agua, logrando decidir sobre el mejor uso del agua, con el menor impacto y con una orientación hacia el reciclaje y el reúso (Perero, 2019). Esto coincide con la iniciativa lanzada en el 2018 por El Banco Mundial, la cual se basa en cuatro pilares entre los que se encuentra gestionar el agua a nivel de cuenca (Rodriguez et al., 2018).

En Colombia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible cuenta con una dirección de GIRH, que trabaja en incorporar los conceptos generales de la GIRH en la gestión de recursos naturales, desde una perspectiva de cuenca hidrográfica, enfocándose en la formulación de la Política Hídrica Nacional y el plan Hídrico Nacional, así como en las políticas de conservación, uso eficiente y ahorro del agua y administración de cuencas, entre otros (Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, n.d.).

Es claro entonces que la economía circular del agua y la GIRH están íntimamente ligadas, la primera se basa en los conceptos establecidos en la segunda y comparten lógicas sistémicas para identificar las oportunidades y debilidades dentro del sector agua a nivel de cuenca. La economía circular del agua (al igual que la GIRH) reconoce la importancia de las fuentes de agua, busca la restauración de la cuencas hidrográfica y propende acciones para la conservación y mejoramiento del capital natural (Delgado et al., 2021)

De esta forma se puede destacar el potencial del aprovechamiento de las aguas servidas dentro de la GIRH, en cuanto a la reducción de la explotación de agua mediante el reúso, y la restauración mediante el reabastecimiento de acuíferos y otros cuerpos de agua, bondades ya descritas en apartados anteriores.

Un ejemplo de este enfoque, que muestra sus múltiples beneficios ambientales, sociales y financieros, se materializó en el Plan de cuenca para el Río Bogotá, generado dentro del marco del Megaproyecto Río Bogotá, en el cual inicialmente se caracterizó y delimitó la cuenca, para luego fijar objetivos de gestión. El plan se enfoca en todo lo referente a saneamiento, calidad de agua del río y posibles inundaciones estudiados mediante herramientas computacionales de modelamiento, pero también en demandas de agua para consumo doméstico, ecosistemas y otros usos, así como conservación del medio ambiente, e inventario de recursos. Como resultado, se

generó un marco de coordinación que enfoca las acciones y recursos de los sectores público y privado, un plan de inversión y un plan de control de metas, para abordar en zonas geográficas definidas hidrológicamente, las prioridades definidas teniendo en cuenta todas las fuentes y usos de agua (World Bank Group, 2018).

Conclusiones

El futuro del aprovechamiento de aguas servidas está encaminado al máximo aprovechamiento de este tipo de aguas, como herramienta y estrategia dentro de los planes de conservación del recurso hídrico a nivel local, regional y global, con el fin de detener y mitigar la sobreexplotación de agua y asegurar su disponibilidad para las generaciones futuras. El avance hacia el concepto de aguas Regeneradas, introduce un cambio de paradigma no solo a nivel de gestión de recursos hídricos, sino también en la percepción del público de las aguas residuales tratadas, ya que ésta denominación las presenta de una forma positiva, que puede facilitar la aceptación de actividades de reúso, al eliminar la connotación de peligrosidad de las aguas e introducir un concepto de seguridad para la salud pública. En este sentido y teniendo en cuenta las crecientes preocupaciones del público en temas medioambientales, esto puede ofrecer una oportunidad para presionar una agenda política que promueva acciones encaminadas al aprovechamiento de aguas servidas.

El aprovechamiento de las aguas servidas dentro de un modelo de economía circular, en especial en lo referente a reutilización y reabastecimiento, se alinea con los objetivos y enfoques de la GIRH. Si se integran los dos modelos, al aplicar los postulados de la economía circular dentro de la estrategia de la GIRH, como parte de planes de gestión de zonas geográficas delimitadas como cuencas y enfocando los sistemas de tratamiento de agua hacia Instalaciones de Recuperación de Recursos Hídricos (IRRH) para producir agua regenerada, se podrían obtener los mayores beneficios del aprovechamiento de aguas servidas, con valores agregados de la recuperación de los recursos presentes en estas aguas. Para esto se requiere de la creación de proyectos de regeneración de agua adecuadamente evaluados, además de un marco regulatorio que ofrezca dirección en cuanto a calidades de agua, interacción de partes interesadas y obtención de recursos y también de modelos económicos que permita valorar el agua como un bien capital natural y que

tenga en cuenta no solo los costos asociados a su explotación, reciclaje, tratamiento, sino también los costos de los riesgos asociados a la escasez de agua y del riesgo de limitar el crecimiento y la productividad.

En el ámbito colombiano, el concepto de Agua Regenerada fue indirectamente introducido en la resolución 1207 de 2014 del MADS, dando un paso en la misma dirección que las tendencias analizadas en el presente documento. Sin embargo, con la promulgación de la nueva Resolución 1256 de 2021, se retiró de la regulación esta definición, dando un paso atrás no solo en la comprensión del potencial y futuro del aprovechamiento de aguas servidas, sino también de cara a las políticas de economía circular y GIRH Colombianas. Este nuevo marco normativo, no está enfocado al uso de aguas tratadas, sino en la simple transferencia de derechos de agua de la Nación a un usuario sobre el cual recae toda la responsabilidad en cuanto a permisos, licencias y cumplimiento de calidad, es decir sobre el tratamiento. Desde esta perspectiva, el futuro de la regeneración de agua en Colombia no es muy alentador, ya que, aunque existen políticas de economía circular y GIRH, la regulación de reúso de aguas servidas no ofrece incentivos a los posibles usuarios.

Referencias

- Agrupación de Vivienda Campestre Bosques Granada y Cayunda. (2010). *Manual de Cosntruccion y Arquitectura Bosques Granada y Cayunda*.
- Arroyo, F. (2018). La Economía Circular Como Factor De Desarrollo Sustentable Del Sector Productivo. *INNOVA Research Journal*, 3(12), 78–98.
<https://doi.org/10.33890/innova.v3.n12.2018.786%0A>
- Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua - Universidad de Salamanca. (2018). Recarga de Acuíferos con Agua Residual Tratada. *CIDTA*, 1–10.
- Cerda, E., & Khalilova, A. (2016). Economía Circular. *Economía Industrial*, 401(3), 11–20.
<https://doi.org/10.14488/1676-1901.v21i3.4354>
- Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável CEBDS. (2018). Guia Sobre Economía Circular de Água. In *CEBDS.org*. <https://cebds.org/publicacoes/guia-sobre-economia-circular-de-agua/#.Yew-x9XMKM8>
- CROSS, K. (2015). *Cities are the Future for Humanity, Making them Livable and Resilient is Critical*. Iwa-Network.Org/. <https://iwa-network.org/cities-are-the-future-for-humanity-making-them-livable-and-resilient-is-critical/>
- Da Silva Antunes de Souza, M. C., & Pasold, C. L. (2019). La reutilización del agua en el ámbito de la economía circular y sostenibilidad. *Revista Chilena de Derecho y Ciencia Política*, 10, 155–172. <https://doi.org/10.7770/rchdcp-v10n2-art2024>
- Delgado, A., Rodriguez, D. J., Amadei, C. A., & Makino, M. (2021). Water in Circular Economy and Resilience (WICER). *The Wolrd Bank*, 68.
- Eagar, R., Boulton, C., & Demyttenaere, C. (2014). The Trends in Megatrends The most important megatrends and how to monitor them. *Prism*, 2.
https://www.adlittle.com/sites/default/files/prism/The_Trends_in_Megatrends_9.pdf
- FAO. (2017). *Las aguas residuales, una oportunidad desaprovechada*. Fao.Org.
<https://www.fao.org/news/story/es/item/853653/icode/>
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental (FCEA). (n.d.). *¿Cuánta agua hay en el planeta?* Agua.Org.Mx. Retrieved January 4, 2022, from <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>
- Fundacion Chile. (2016). Aguas residuales Como Nueva Fuente de Agua. In *fch.cl* (pp. 1–100).

- <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/12/aguas-residuales-como-fuente-de-agua.pdf>
- Hernandez, J., Villanueva, S., & Henriquez, M. (2019). Trend study: technologies for the recycling of wastewater. *Ingenieria Uc*, 26(2), 223–232.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.4065053>
- Hernández Pasichana, S., & Posada Arrubla, A. (2018). Avances de la investigación sobre la gestión integral del recurso hídrico en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 553–563. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1079>
- International Water Association IWA. (2018). The Reuse Opportunity. In *The International Water Association* (pp. 1–26). <https://doi.org/10.5194/acp-2016-176>
- Martin, I. (n.d.). *La reutilización planificada del agua empezó en 1912 en Estados Unidos*. IAGUA. Retrieved January 19, 2022, from <https://www.iagua.es/noticias/espana/redaccion-iagua/14/11/28/iaguadyr-isabel-martin-tecnico-proyectos-tratamiento-y>
- Martínez A., C. L., & Arellano G., A. (2018). Las megatendencias y su impacto en el comportamiento de las organizaciones. *Revista San Gregorio*, 0(28), 146–153.
<http://www.revista.sangregorio.edu.ec/index.php/REVISTASANGREGORIO/article/view/789>
- Maya, A. (2020). *What's on Tap for Water Reuse*. WaterWorld.
[https://www.waterworld.com/wastewater/reuse-recycling/article/14180932/whats-on-tap-for-water-reuse?utm_source=WW Weekly Video&utm_medium=email&utm_campaign=CPS201013092&o_eid=1106G3581289A2V&rdx.ident%5Bpull%5D=omeda%7C1106G3581289A2V&oly_enc_id=1106G358](https://www.waterworld.com/wastewater/reuse-recycling/article/14180932/whats-on-tap-for-water-reuse?utm_source=WW+Weekly+Video&utm_medium=email&utm_campaign=CPS201013092&o_eid=1106G3581289A2V&rdx.ident%5Bpull%5D=omeda%7C1106G3581289A2V&oly_enc_id=1106G358)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Resolución 1207 de 2014. In *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS* (Vol. 1).
<https://www.leyex.info/leyes/Resolucionmads1207de2014.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Resolución 1256 de 2021. In *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS* (pp. 1–6).
<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf>
- Ministerio de Sanidad y Consumo. (2007). Real Decreto 1620/2007. In *Boletín Oficial del Estado Gobierno de España*. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-21092-consolidado.pdf>

- Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (n.d.). *Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Minambiente.Gov.Co. Retrieved January 20, 2022, from <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/#:~:text=La GIRH se define como,sustentabilidad de los ecosistemas vitales.>
- Naciones Unidas. (2015). Agua para un Mundo Sostenible. *Informe de Las Naciones Unidas Sobre Los Recursos Hídricos En El Mundo 2015*, 1–8.
- ONU. (2020). *El agua, un recurso que se agota por el crecimiento de la población y el cambio climático*. Noticias ONU. <https://news.un.org/es/story/2020/11/1484732>
- Perero, E. (2019). Agua y Economía Circular. In *Fundacion Conama* (p. 58). <http://www.fundacionconama.org/wp-content/uploads/2019/09/Agua-y-Economía-Circular.pdf>
- Prats-Rico, D. (2016). La reutilización de aguas depuradas regeneradas a escala mundial: análisis y prospectivas. *Agua y Territorio*, 8, 10–21. <https://doi.org/10.17561/at.v0i8.3292>
- Rodriguez, D., Serrano, H., Delgado, A., Nolasco, D., & Saltiel, G. (2018). De residuo a recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe. In *Bancomundial.org*. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/33436/146823SP.pdf>
- Silva, J., Torres, P., & Madera, C. (2008). Domestic Wastewater Reuse in Agriculture. A review. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 347–359. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/13521/14204>
- Winpenny, J., Heinz, I., Koo-Oshima, S., Salgot, M., Collado, J., Hernandez, F., & Roberta, T. (2013). *Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?* <https://www.fao.org/3/i1629s/i1629s.pdf>
- World Bank Group. (2018). From Waste to Resource Background Paper II. *Openknowledge Worldbank*. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/33381/146318.pdf?sequence=4&isAllowed=y>