

5. Economía circular integrada del agua: soluciones para los problemas derivados de la escasez de agua*



JORGE ALEJANDRO SILVA RODRÍGUEZ DE SAN MIGUEL**

CHRISTIAN MUÑOZ-SÁNCHEZ***

ESTEBAN MARTÍNEZ DÍAZ****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.251.05>

Resumen

La disponibilidad de fuentes de agua dulce está disminuyendo debido a la sobre extracción, la contaminación y los impactos del cambio climático. El aumento de la demanda y la disminución de la oferta crean una situación en la que los recursos hídricos se vuelven escasos. Este artículo explora la Economía Circular Integrada del Agua como marco para abordar los desafíos de la escasez de agua. Se realizó una búsqueda sistemática, considerando artículos de 2004 a 2024 en bases de datos relevantes. La revisión enfatiza la importancia de la reutilización, el reciclaje y la eficiencia en la Economía Circular Integrada del Agua. Los hallazgos clave resaltan la importancia de tratar y recuperar las aguas residuales mediante filtración avanzada, procesos biológicos y métodos de desinfección. El enfoque de la Economía Circular Integrada del Agua proporciona información sobre cómo maximizar la utilización de los recursos hídricos, minimizar la des-

* Derivado del proyecto SIP 20240598: Responsabilidad Social Empresarial y Sostenibilidad en el Abastecimiento de Agua.

** Doctor en Ciencias Administrativas. Profesor de la ESCA-ST del Instituto Politécnico Nacional, México. Correspondencia: j.a.silva@outlook.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-4696>

*** Doctor en Ciencias Sociales en Economía, Gestión y Políticas de Innovación. Profesor-investigador de la ESCA-ST del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9088-0114>

**** Doctor en Ciencias Administrativas. Profesor-investigador de la ESCA-ST del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8692-4252>

carga de aguas residuales y promover un ciclo sostenible del agua. Investigaciones futuras evaluarán las implicaciones ambientales, económicas y sociales de la reutilización y el reciclaje del agua, la escalabilidad de las tecnologías de ahorro de agua, los aspectos del cambio de comportamiento y el impacto en los ecosistemas y la biodiversidad.

Palabras clave: *economía circular integrada, eficiencia hídrica, reciclaje de agua, reutilización del agua.*

1. Introducción

La escasez de agua es un desafío global crítico que plantea amenazas importantes al desarrollo sostenible y al bienestar social. La creciente demanda de recursos hídricos, combinada con los impactos del cambio climático y el crecimiento demográfico, subraya la necesidad urgente de enfoques innovadores para abordar la escasez de agua (Sgroi et al., 2018; Winans et al., 2017). Las prácticas tradicionales de gestión lineal del agua, centradas principalmente en la extracción, el consumo y la eliminación, ya no son suficientes para satisfacer las crecientes demandas de agua y proteger el medio ambiente.

En respuesta a este desafío, el concepto de Economía Circular Integrada del Agua ha surgido como un paradigma prometedor para la gestión sostenible del agua (Sgroi et al., 2018). Este enfoque enfatiza el uso eficiente y efectivo de los recursos hídricos a través de un sistema de circuito cerrado inspirado en los principios de la economía circular. Busca minimizar el desperdicio de agua, maximizar la recuperación de recursos y mejorar la resiliencia y sostenibilidad de los sistemas hídricos (Winans et al., 2017; Heshmati, 2017).

Se han llevado a cabo extensas investigaciones sobre la Economía Circular Integrada del Agua, incluida la reutilización y el reciclaje del agua, la eficiencia del agua y la gestión holística del ciclo del agua. Por ejemplo, Meneses et al. (2010) destacan la importancia del tratamiento y recuperación de aguas residuales para maximizar la utilización de los recursos hídricos. De forma similar, Chartzoulakis y Bertaki (2015) analizan las prác-

ticas sostenibles de gestión del agua en la agricultura bajo la influencia del cambio climático (Meneses et al., 2010).

Si bien estos estudios, junto con muchos otros, han proporcionado información valiosa sobre el potencial de la Economía Circular Integrada del Agua para abordar los desafíos de la escasez de agua, todavía es necesario realizar una revisión exhaustiva de la literatura para sintetizar los hallazgos, identificar brechas en la investigación y Proporcionar una comprensión holística del tema. Esta investigación aborda esta brecha mediante la realización de una revisión rigurosa de la literatura sobre la Economía Circular Integrada del Agua. La novedad y justificación de esta investigación radica en su enfoque integral y sistemático que proporciona una descripción general objetiva y basada en evidencia del tema utilizando una metodología que incluye búsqueda sistemática, selección y análisis crítico de la literatura.

Al adoptar un enfoque holístico, los gestores del agua pueden garantizar la sostenibilidad y la resiliencia a largo plazo de los sistemas hídricos. Los problemas ambientales como la crisis climática, entre otros, requieren solución, por lo cual la economía circular del agua coadyuva en esta tarea y es la forma como se vincula con la temática principal de este libro.

2. Metodología

Esta investigación empleó el enfoque de revisión de la literatura que es un método riguroso y sistemático para identificar, evaluar y sintetizar artículos de investigación relevantes y otras fuentes de información sobre un tema específico. La búsqueda se centró en identificar estrategias, tecnologías y enfoques que promuevan el uso eficiente y eficaz de los recursos hídricos, minimicen el desperdicio y mejoren la sostenibilidad dentro del sector hídrico.

Se realizaron búsquedas sistemáticas en múltiples bases de datos, incluidas Web of Science y Scopus, para garantizar una revisión exhaustiva de la literatura. Los términos de búsqueda y las palabras clave utilizados se seleccionaron cuidadosamente para capturar los conceptos centrales y el alcance del estudio. La búsqueda se limitó a artículos publicados entre 2004 y 2024 para incluir las investigaciones más recientes y relevantes. Los criterios de inclusión y exclusión se establecieron en función de factores predefinidos,

como la fecha de publicación, el idioma y la relevancia para las preguntas de investigación. El proceso de selección implicó múltiples etapas: selección de títulos, revisión de resúmenes y evaluación del texto completo.

3. Resultados y su discusión

3.1. Desafíos derivados de la escasez de agua

La escasez de agua presenta desafíos complejos con implicaciones importantes para las sociedades humanas, los ecosistemas y el desarrollo sostenible. A medida que la demanda de agua sigue aumentando debido al crecimiento demográfico, la urbanización y el desarrollo económico, la disponibilidad de fuentes de agua dulce está disminuyendo debido a la sobreextracción, la contaminación y los impactos del cambio climático (Calzadilla et al., 2011). El aumento de la demanda y la disminución de la oferta crean una situación en la que los recursos hídricos se vuelven escasos, lo que genera muchos desafíos. Uno de los desafíos más apremiantes de la escasez de agua es el acceso limitado a agua limpia y segura (Calzadilla et al., 2011).

El sector agrícola, uno de los principales consumidores de agua, enfrenta importantes desafíos debido a la escasez de agua. La disponibilidad insuficiente de agua afecta gravemente la producción de cultivos y la seguridad alimentaria. La reducción de la disponibilidad de agua conduce a menores rendimientos, pérdidas de cosechas y un cambio hacia cultivos que requieren menos agua, lo que afecta la diversidad de cultivos y la producción general de alimentos (Hanjra y Qureshi, 2010). Esto, a su vez, puede provocar volatilidad de los precios de los alimentos y una mayor vulnerabilidad a las crisis alimentarias, especialmente en regiones que dependen en gran medida de la agricultura de secano (Meneses et al., 2010).

En regiones donde la escasez de agua es grave, la competencia por los recursos hídricos puede generar tensiones y conflictos sociales. Pueden surgir conflictos entre comunidades o regiones que compiten por recursos hídricos limitados. La escasez de agua exacerba las desigualdades sociales existentes y puede alimentar el malestar y la migración, lo que resulta en

inestabilidad social y desplazamientos (Cosgrove y Loucks, 2015). En algunos casos, se ha identificado que la escasez de agua contribuye al malestar regional y a las tensiones geopolíticas. Las industrias que dependen en gran medida del agua para sus operaciones, como la agricultura, la manufactura y la producción de energía, también enfrentan desafíos económicos debido a la escasez de agua.

La disponibilidad limitada de agua puede generar mayores costos de producción, un menor crecimiento económico y menores oportunidades laborales en estos sectores (Rockstrom, 2013). Además, la escasez de agua plantea riesgos para la producción de energía, ya que muchas formas de generación de energía, incluidas las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas, dependen de la disponibilidad de agua para su refrigeración y funcionamiento. En tiempos de grave escasez de agua, el funcionamiento de las centrales eléctricas puede verse limitado, lo que afecta la generación y el suministro de energía (Shatat, 2014). La escasez de agua pone a prueba la infraestructura hídrica existente, especialmente en las zonas urbanas que experimentan un rápido crecimiento demográfico. La extracción excesiva de agua subterránea para satisfacer las crecientes demandas puede provocar el agotamiento de los acuíferos, provocando hundimientos del suelo y daños a la infraestructura (Hoekstra et al., 2018).

Los enfoques de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), que consideran la naturaleza interconectada de los recursos hídricos e incorporan consideraciones sociales, económicas y ambientales, son esenciales para la gestión de los recursos hídricos de forma sostenible y garantizar un acceso equitativo al agua para todos (Gherghel et al., 2019). La participación comunitaria y la cooperación internacional son vitales para una gestión eficaz de los recursos hídricos y abordar los desafíos de la escasez de agua a nivel mundial (Ahmed et al., 2022; Hernández-Chover et al., 2022; Becerra et al., 2020; Smol et al., 2020; Lekshmi et al., 2020).

3.2. Gestión sostenible del agua y reformas institucionales

La Economía Circular Integrada del Agua se basa en el entendimiento de que una gestión eficaz del agua es esencial para abordar los desafíos de la

escasez de agua y garantizar la disponibilidad de agua limpia y segura para las generaciones presentes y futuras. Saleth y Dinar (2004) destacan la necesidad de reformas institucionales para lograr una gestión sostenible del agua. Este análisis llama la atención sobre porque las reformas institucionales son cruciales para garantizar el uso eficiente y la conservación de los recursos hídricos. Dichas reformas implican el establecimiento de sistemas de gobernanza que fomenten la asignación, gestión y utilización responsable del agua (Saleth y Dinar, 2004). Barlow (2009) ejemplifica este enfoque, quien aboga por cambios de políticas y acciones colectivas para garantizar una gobernanza del agua equitativa y sostenible como un derecho humano fundamental.

Xu et al. (2009) señalan que se pueden emplear herramientas de apoyo a la toma de decisiones, como la dinámica de sistemas, para optimizar la planificación de la economía circular y el análisis de riesgos. Esto proporciona a los formuladores de políticas información valiosa sobre los posibles riesgos, compensaciones y beneficios asociados con las iniciativas de economía circular en la gestión del agua (Ahmed et al., 2022; Hernández-Chover et al., 2022; Becerra et al., 2020; Smol et al., 2020; Lekshmi et al., 2020).

La privatización del agua ha sido un tema de debate en las discusiones sobre gestión del agua, y sus implicaciones sociales, económicas y ambientales han llamado la atención. Bakker (2010) señala que los modelos alternativos de gobernanza del agua, como los sistemas inteligentes de gestión del agua y las redes de sensores, pueden abordar los desafíos de la escasez de agua mejorando la eficiencia hídrica y el monitoreo en tiempo real.

La escasez de agua plantea desafíos importantes para la productividad agrícola y la seguridad alimentaria futura. Hanjra y Qureshi (2010) destacan la importancia de las prácticas sostenibles de gestión del agua, las tecnologías de riego eficientes y la agricultura resiliente al clima para garantizar la seguridad alimentaria futura en medio de la escasez de agua (Viles et al., 2020; Ward y Ruckstuhl, 2017; Neczaj y Grosser, 2018; Delgado et al., 2021). Al adoptar principios de economía circular en la gestión del agua, como la reutilización y la recuperación de recursos, el sector agrícola puede optimizar los recursos hídricos y reducir su dependencia del suministro de agua dulce (Nika et al., 2020; Sarrafzadeh, 2022; Clarke, 2013; Davies, 2011).

3.3. Gestión integrada de los recursos hídricos para la seguridad hídrica

La GIRH es un enfoque integral que garantiza la seguridad hídrica y el desarrollo sostenible mediante la gestión de los recursos hídricos de manera integrada y coordinada (Foster y Ait-Kadi, 2012). La GIRH aborda la escasez de agua y promueve la resiliencia frente a los crecientes desafíos hídricos (Giupponi y Gain, 2017). Su objetivo es optimizar la asignación y el uso de los recursos hídricos para satisfacer las necesidades de diversos sectores, incluidos la agricultura, la industria, el uso doméstico y el medio ambiente. Esto involucra a partes interesadas de diferentes sectores, incluidas agencias gubernamentales, comunidades locales, industrias y organizaciones ambientales, en la toma de decisiones.

Uno de los principios críticos de este enfoque es considerar el agua como un recurso económico, social y ambiental. bien mental. El agua tiene un valor que va más allá de su utilidad económica, y su gestión sostenible es fundamental para mantener los ecosistemas, la biodiversidad y la salud general del planeta (Foster y Ait-Kadi, 2012; Giupponi y Gain, 2017). La GIRH hace hincapié en la protección de las fuentes de agua, la prevención de la contaminación y la restauración de cuerpos de agua degradados (Foster y Ait-Kadi, 2012).

Estructuras de gobernanza efectivas, políticas transparentes y marcos regulatorios son esenciales para implementar con éxito la GIRH. Esto incluye descentralizar los procesos de toma de decisiones a niveles locales, empoderar a las comunidades para que administren sus recursos hídricos y fomentar la participación pública en la gestión del agua. Además, la GIRH enfatiza la necesidad de una gestión adaptativa. A medida que la disponibilidad y la demanda de agua cambian debido a la variabilidad climática y el crecimiento demográfico, los enfoques flexibles y dinámicos para la gestión del agua se vuelven cruciales. La gestión adaptativa implica revisar y ajustar las estrategias de gestión del agua en función de nueva información y condiciones cambiantes (Foster y Ait-Kadi, 2012; Giupponi y Gain, 2017).

La seguridad hídrica es un aspecto central de la GIRH. Al gestionar los recursos hídricos de manera sostenible, la GIRH tiene como objetivo garantizar un suministro de agua confiable y suficiente para todos los usuarios,

incluidas las comunidades marginadas y vulnerables. La GIRH contribuye a la reducción de la pobreza, la seguridad alimentaria y la salud pública al promover la seguridad hídrica. También mejora la resiliencia de los ecosistemas para resistir los desafíos relacionados con el agua. La GIRH ha sido respaldada a nivel mundial, y muchos países han incorporado sus principios en las políticas y legislaciones nacionales sobre el agua (Foster y Ait-Kadi, 2012; Giupponi y Gain, 2017). Las Naciones Unidas y otras organizaciones internacionales han promovido activamente la GIRH como una estrategia fundamental para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 6, que se centra en garantizar agua potable y saneamiento para todos. Sin embargo, implementar la GIRH puede ser un desafío, especialmente en regiones con recursos y capacidad institucional limitados. Requiere una fuerte voluntad política, inversiones financieras y experiencia técnica. Además, pueden surgir conflictos entre los usuarios y los sectores del agua, lo que requiere mecanismos eficaces de resolución de conflictos (Foster y Ait-Kadi, 2012; Giupponi y Gain, 2017).

3.4. Reutilización y reciclaje del agua

La reutilización y el reciclaje del agua son vitales en la Economía Circular Integrada del Agua y ofrecen importantes beneficios para la gestión sostenible del agua. Meneses et al. (2010) destacan la importancia de tratar y recuperar aguas residuales para optimizar la utilización de los recursos hídricos. Este enfoque implica el empleo de filtración avanzada, procesos biológicos y métodos de desinfección para garantizar la calidad y seguridad del agua recuperada. La reutilización y el reciclaje del agua reducen la presión sobre las fuentes de agua dulce. Al tratar y reutilizar las aguas residuales, se puede reducir significativamente la demanda de agua dulce (Voulvoulis, 2018; Gude, 2017). El tratamiento efectivo elimina los contaminantes de las aguas residuales, asegurando que el efluente vertido cumpla con los estándares regulatorios (Guo et al., 2019; Van Buren et al., 2016; Hanjra y Qureshi, 2010; Xu et al., 2009; Smith, 2017; Calzadilla et al., 2011; Mancosu et al., 2015); esto reduce el impacto ambiental de la descarga de aguas residuales, protege los recursos hídricos y promueve la salud del ecosistema.

La reutilización del agua para diversos fines apoya un ciclo sostenible del agua. En lugar de un modelo lineal de uso del agua, en el que el agua se extrae, se utiliza y se descarta, el enfoque de economía circular enfatiza cerrar el circuito y reutilizar los recursos hídricos (Hanjara y Qureshi, 2010; Geissdoerfer et al., 2017).

Los nutrientes del agua reciclada, como el nitrógeno y el fósforo, pueden servir como fertilizantes valiosos, reduciendo la necesidad de fertilizantes sintéticos y minimizando la escorrentía de nutrientes hacia los cuerpos de agua. Esto mejora las prácticas agrícolas sostenibles y reduce el impacto ambiental de los métodos agrícolas convencionales (Chartzoulakis y Bertaki, 2015; Tayebi-Khorami et al., 2019). Las prácticas exitosas de reutilización y reciclaje del agua dependen de la colaboración de diversas partes interesadas, incluidas agencias gubernamentales, empresas de servicios públicos de agua, industrias y el público. Se necesitan regulaciones y directrices para garantizar el uso seguro y apropiado del agua. La conciencia y la aceptación públicas son vitales para superar las posibles preocupaciones relacionadas con la escasez de agua (Greve et al., 2018; Barlow, 2009; Saleth y Dinar, 2004).

Los análisis de costo-beneficio deben considerar aspectos financieros y las ganancias económicas potenciales asociadas con la recuperación de recursos y la generación de ingresos a partir del agua reutilizada o sus subproductos. Al optimizar la viabilidad económica de las iniciativas de reutilización de aguas residuales, los tomadores de decisiones pueden incentivar las inversiones públicas y privadas en prácticas de economía circular (Srinivasan et al., 2012; Gohari et al., 2013; Shatat y Rittaf, 2014; Davies y Simonovic, 2011; Waraich et al., 2011; Zhao et al., 2010). La aceptación social es un factor crítico que determina el éxito de los proyectos de reutilización de aguas residuales. Es esencial involucrar e involucrar a las comunidades locales, las partes interesadas y los usuarios finales en el proceso de toma de decisiones. Las campañas de sensibilización y divulgación pública pueden ayudar a abordar conceptos erróneos y crear conciencia sobre la seguridad y los beneficios de la reutilización de aguas residuales tratadas (Herrera-León et al., 2019). La comunicación efectiva sobre los impactos positivos de la reutilización de aguas residuales, como la reducción de la presión sobre las fuentes de agua dulce y la mejora de la seguridad hídrica pueden

fomentar el apoyo público y generar confianza en el enfoque de la economía circular (Calow et al., 2010; Scott et al., 2011; Rockstrom, 2013; Herrera-León et al., 2019).

3.5. Conservación y eficiencia del agua

Los esfuerzos para conservar y mejorar la eficiencia hídrica son aspectos críticos de la Economía Circular Integrada del Agua. Chartzoulakis y Bertakí (2015) destacan la importancia de la gestión sostenible del agua en la agricultura, particularmente en el cambio climático (Durán-Romero et al., 2020). Destacan la adopción de tecnologías y prácticas de ahorro de agua para minimizar el consumo de agua y al mismo tiempo mantener la productividad agrícola (Scott et al., 2011). Mejorar la eficiencia hídrica en la agricultura puede implicar la implementación de sistemas de riego por goteo para llevar agua directamente a la zona de las raíces de las plantas, minimizando la pérdida de agua debido a la evaporación y la escorrentía. Esto garantiza que el agua se utilice de manera eficiente y eficaz, optimizando el rendimiento de los cultivos y reduciendo el consumo de agua (Scott et al., 2011).

La agricultura de precisión, que combina sensores remotos, monitoreo de la humedad del suelo y programación de riego computarizada, mejora aún más la eficiencia del agua al permitir a los agricultores adaptar las prácticas de riego basadas en datos en tiempo real y requisitos específicos de los cultivos (Schroeder et al., 2019; Esposito et al., 2020; Greve et al., 2018; Velenturf y Purnell, 2021); por lo tanto, las prácticas de riego sostenible desempeñan un papel fundamental a la hora de abordar los desafíos de la escasez de agua en la agricultura, donde el consumo de agua es significativamente alto, lo que la hace vulnerable a la escasez de agua.

Como importante consumidor de recursos hídricos, la agricultura necesita adoptar técnicas de ahorro de agua y prácticas de riego eficientes para reducir los impactos de la escasez de agua y mejorar la productividad agrícola (Calzadilla et al., 2011). La implementación de estas prácticas requiere un enfoque integrado para la gestión de los recursos hídricos e intervenciones políticas que promuevan la sostenibilidad y la resiliencia en el uso circular del agua (Calzadilla et al., 2011).

Los sistemas eficientes de gestión del agua en hogares, industrias y edificios comerciales desempeñan un papel importante en la conservación del agua. El consumo de agua se puede reducir significativamente sin comprometer la comodidad o la funcionalidad mediante la adopción de accesorios que ahorren agua, como inodoros, grifos y cabezales de ducha de bajo flujo. Los sistemas de detección de fugas y las prácticas de mantenimiento regular ayudan a identificar y abordar rápidamente las fugas de agua, minimizando el desperdicio de agua (Gherghel et al., 2019; Bakker, 2010; Ward y Ruckstuhl, 2017; Clarke, 2013; Smith, 2017; Kummu et al., 2016; Qin, 2010). Además, las campañas de cambio de comportamiento y los programas educativos crean conciencia sobre la importancia de la conservación del agua y alientan a individuos y organizaciones a adoptar prácticas responsables de uso del agua (Shatat y Riffat, 2014; Waraich et al., 2011; Zhao et al., 2010; Zwarteveen y Boelens, 2014).

La implementación de prácticas eficientes de gestión del agua reduce el desperdicio de agua y conserva valiosos recursos de agua dulce. La utilización eficiente del agua permite aumentar el suministro de agua para satisfacer las demandas de diversos sectores y uso doméstico. La gestión eficiente del agua también contribuye al ahorro de energía. La energía necesaria para bombear, tratar y distribuir agua puede ser sustancial (Zyoud et al., 2016). Reducir el consumo de agua requiere menos energía para estos procesos, lo que resulta en menores emisiones de carbono y menores costos de energía. La interdependencia entre agua y energía, conocida como nexo agua-energía, resalta la importancia de adoptar estrategias integradas que optimicen los recursos hídricos y energéticos (Ma et al., 2017; Zyoud et al., 2016). Las prácticas eficientes de gestión del agua respaldan la salud de los ecosistemas y la biodiversidad. Reducir la extracción de agua de los ecosistemas naturales mantiene flujos de agua adecuados para sostener los hábitats acuáticos y apoyar la salud de los ríos, humedales y otros ecosistemas de agua dulce (Lieder y Rashid, 2016; Lambooy, 2011; Maliva y Missimer 2012; Rockstrom, 2013; Karabulut et al., 2016; Baleta et al., 2019). Preservar estos ecosistemas es esencial para mantener la biodiversidad, ya que sirven como hábitats críticos para muchas especies.

3.6. Cambio de paradigma en la gestión del agua

La Economía Circular Integrada del Agua requiere un cambio de paradigma en la percepción y el valor del agua. Lambooy (2011) explora la responsabilidad social corporativa y el uso sostenible del agua, enfatizando el papel de las empresas en la promoción de la gestión sostenible del agua y las prácticas de gestión responsable. Las empresas contribuyen a la conservación del agua, mejoran el desempeño ambiental y logran objetivos sociales y económicos adoptando prácticas hídricas sostenibles (Foster y Ait-Kadi, 2012; Giupponi y Gain, 2017). Este cambio de paradigma implica reconocer el agua como un recurso valioso y finito, valorar los servicios ecosistémicos proporcionados por las fuentes de agua y mejorar los principios de la economía circular del agua (Pedro-Monzonis et al., 2015; Veldkamp et al., 2017; Baleta et al., 2019).

3.7. Reconocer el agua como un recurso valioso y finito

La escasez de agua afecta a numerosas personas y ecosistemas en todo el mundo. La Economía Circular Integrada del Agua exige un cambio en la percepción del agua de un bien abundante e inagotable a un recurso finito y esencial. Los estudios de Misra (2014) y Karabulut et al. (2016) resaltan las implicaciones de la disponibilidad de agua y los desafíos interconectados del agua y la seguridad alimentaria. Esto exige un cambio hacia prácticas sostenibles de gestión del agua para garantizar el acceso equitativo a los recursos hídricos y satisfacer las necesidades de las generaciones presentes y futuras.

Los servicios de suministro de agua, como el agua potable para el consumo humano y la agricultura, sustentan la vida y las actividades económicas. Además, las fuentes de agua proporcionan numerosos servicios ecosistémicos, como la preservación del hábitat, la regulación de inundaciones y el ciclo de nutrientes, que contribuyen al bienestar de los sistemas humanos y naturales. Mapear y comprender estos servicios ecosistémicos, como lo argumenta Rockstrom (2013), puede guiar la toma de decisiones en la gestión del agua, asegurando que el uso humano del agua permanezca en armonía con la naturaleza y contribuya a la salud de los ecosistemas.

3.8. Adoptar principios circulares para una utilización óptima de los recursos

Un enfoque de economía circular del agua implica repensar cómo interactuamos con el agua, alejándonos del modelo lineal de extracción, consumo y eliminación. Los principios circulares tienen como objetivo cerrar ciclos en el ciclo del agua, tratando el agua como un recurso valioso que debe preservarse, reutilizarse y reciclarse. Ma et al. (2017) proponen materiales funcionales a base de carbono derivados de desechos para la remediación del agua y el almacenamiento de energía, mostrando enfoques innovadores para abordar los desafíos del agua.

Al adoptar prácticas circulares, podemos minimizar la generación de residuos y maximizar la utilidad de los recursos hídricos. La responsabilidad social corporativa y el uso sostenible del agua son cruciales para promover la Economía Circular Integrada del Agua. Como destaca Lambooy (2011), las empresas pueden tener un impacto significativo en los recursos hídricos a través de sus operaciones, cadenas de suministro y procesos de producción. Al incorporar prácticas hídricas sostenibles en sus modelos de negocio, las empresas pueden contribuir activamente a la conservación del agua, la protección del medio ambiente y el desarrollo comunitario. Las iniciativas de gestión sostenible del agua, como el reciclaje del agua, la gestión eficiente del agua y la participación comunitaria, se encuentran entre las formas en que las empresas pueden impulsar cambios positivos en el sector del agua (Foster y Ait-Kadi, 2012; Giupponi y Gain, 2017).

3.9. Fomentando una cultura de uso responsable del agua

La educación y la participación pública son componentes esenciales de este cambio de paradigma. Crear conciencia sobre el valor del agua y los beneficios de la gestión sostenible del agua puede fomentar una cultura de uso responsable del agua. Kirchherr y Piscicelli (2019) abogan por una economía circular integrada y un modelo educativo para abordar el nexo energía-agua-alimentos, enfatizando la importancia de enfoques multidisciplinarios para los desafíos hídricos. Educar a las comunidades, las empresas y

los formuladores de políticas sobre la importancia de la conservación del agua y las prácticas circulares es fundamental para impulsar un cambio positivo (Griffin, 2016; Zhao et al., 2019; Sauve et al., 2021).

4. Conclusiones

La escasez de agua presenta desafíos complejos con impactos de gran alcance en las sociedades, las economías y los ecosistemas. La Economía Circular Integrada del Agua ha surgido como un marco apropiado para abordar estas cuestiones de manera integral. Al adoptar principios circulares, como la reutilización y el reciclaje del agua, la conservación del agua, la gobernanza colaborativa, los avances tecnológicos y un cambio de paradigma en las prácticas de gestión del agua, la Economía Circular Integrada del Agua proporciona un marco integral para mitigar los desafíos de escasez de agua. Los desafíos de la escasez de agua son multifacéticos y están interconectados y afectan diversos aspectos de la vida humana. El acceso limitado al agua limpia y segura compromete la salud pública, particularmente en regiones con escasez de agua donde las comunidades luchan por satisfacer sus necesidades básicas. Debido a la insuficiente disponibilidad de agua, el sector agrícola enfrenta desafíos importantes, incluida la reducción de la productividad de los cultivos, la seguridad alimentaria y los impactos derivados del cambio climático. Los ecosistemas y la biodiversidad sufren degradación y alteración, lo que afecta la salud ambiental en general. La escasez de agua también desencadena tensiones sociales y conflictos por los recursos hídricos limitados, lo que genera inestabilidad social y migración. Las industrias que dependen en gran medida del agua enfrentan desafíos económicos y las áreas urbanas con un suministro inadecuado de agua experimentan presión sobre la infraestructura hídrica existente.

Abordar la escasez de agua requiere una combinación de soluciones a corto y largo plazo. Las prácticas sostenibles de gestión del agua, la eficiencia, la conservación y la reutilización del agua son esenciales para aliviar los desafíos inmediatos de escasez de agua. Los enfoques de GIRH, que consideran factores sociales, económicos y ambientales, son cruciales para gestionar los recursos hídricos de manera sostenible y garantizar un acceso

equitativo para todos. Se necesitan reformas institucionales y estructuras de gobernanza para fomentar la acción colectiva y la asignación responsable del agua. La reutilización y el reciclaje del agua son vitales para optimizar los recursos hídricos, reducir la demanda de agua dulce y conservar los ecosistemas. La implementación exitosa de proyectos de reutilización de aguas residuales requiere considerar factores económicos, sociales y ambientales. La aceptación pública, la educación y las regulaciones son cruciales para asegurar el éxito de tales iniciativas. Las medidas de conservación y eficiencia del agua en la agricultura y los hogares ayudan a reducir el desperdicio de agua, conservar los recursos de agua dulce y minimizar el consumo de energía.

La Economía Circular Integrada del Agua exige un cambio de paradigma, reconociendo el agua como un recurso finito y valioso. Al adoptar principios circulares y valorar los servicios ecosistémicos proporcionados por el agua, podemos alinear el uso del agua con los objetivos de sostenibilidad. La responsabilidad social corporativa de las empresas y las prácticas hídricas sostenibles contribuyen aún más a la conservación del agua y la protección del medio ambiente. Por lo tanto, abordar la escasez de agua requiere esfuerzos de colaboración, toma de decisiones informada y cooperación global. Al adoptar la Economía Circular Integrada del Agua e implementar prácticas sostenibles de gestión del agua, podemos trabajar para garantizar la seguridad hídrica, preservar los ecosistemas y construir un futuro resiliente para los recursos hídricos y las sociedades humanas.

Las conclusiones extraídas de la revisión de la literatura tienen varias implicaciones para futuras investigaciones. Es necesario realizar más estudios para evaluar los impactos ambientales, económicos y sociales de las prácticas de reutilización y reciclaje del agua. Comprender los riesgos y beneficios potenciales asociados con el agua recuperada en diferentes contextos puede contribuir al desarrollo de directrices y políticas sólidas. La investigación debería centrarse en la escalabilidad y viabilidad de tecnologías y prácticas de ahorro de agua en la agricultura. Evaluar las barreras y oportunidades para su adopción, evaluar la viabilidad económica y considerar la aceptación social de estas tecnologías impulsará su implementación generalizada.

Es necesaria más investigación sobre los aspectos del cambio de comportamiento en la gestión del agua. Comprender los factores que influyen en los comportamientos de uso del agua de individuos y organizaciones y desarrollar estrategias efectivas para promover comportamientos de ahorro de agua puede contribuir significativamente a la gestión sostenible del agua. Los estudios futuros deberían explorar las implicaciones más amplias de la Economía Circular Integrada del Agua en la salud de los ecosistemas, la biodiversidad y la resiliencia general de los sistemas hídricos. La evaluación de los impactos a largo plazo de las prácticas de eficiencia, reciclaje y reutilización del agua en los ecosistemas de agua dulce y su biodiversidad asociada ayudará a desarrollar estrategias integrales que equilibren las necesidades humanas de agua con la sostenibilidad ambiental.

5. Referencias

- Ahmed, M., Mavukkandy, M.O., Giwa, A., Elektorowicz, M., Katsou, E., Khelifi, O., Nadeo, V., y Hasan, S.W. (2022). Recent developments in hazardous pollutants removal from wastewater and water reuse within a circular economy. *NPJ Clean Water*, 5(1), 12. <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00154-5>
- Baleta, J., Mikulčić, H., Klemeš, J.J., Urbaniec, K., y Duić, N. (2019). Integration of energy, water and environmental systems for a sustainable development. *Journal of cleaner production*, 215, 1424-1436. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.035>
- Barlow, M. (2009). Blue covenant: The global water crisis and the coming battle for the right to water. McClelland & Stewart.
- Bakker, K. (2010). Privatizing water: governance failure and the world's urban water crisis. Cornell University Press.
- Becerra, L., Carenzo, S., y Juárez, P. (2020). When circular economy meets inclusive development. Insights from urban recycling and rural water access in Argentina. *Sustainability*, 12(23), 9809. <https://doi.org/10.3390/su12239809>
- Calow, R.C., MacDonald, A.M., Nicol, A.L., y Robins, N.S. (2010). Ground water security and drought in Africa: linking availability, access, and demand. *Groundwater*, 48(2), 246-256. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00558.x>
- Calzadilla, A., Rehdanz, K., y Tol, R.S. (2011). Water scarcity and the impact of improved irrigation management: a computable general equilibrium analysis. *Agricultural Economics*, 42(3), 305-323. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2010.00516.x>
- Chartzoulakis, K., y Bertaki, M. (2015). Sustainable water management in agriculture under climate change. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.011>

- Clarke, R. (2013). *Water: the international crisis*. Routledge.
- Cosgrove, W.J., y Loucks, D.P. (2015). Water management: Current and future challenges and research directions. *Water Resources Research*, 51(6), 4823-4839. <https://doi.org/10.1002/2014WR016869>
- Davies, E.G., y Simonovic, S.P. (2011). Global water resources modeling with an integrated model of the social-economic-environmental system. *Advances in water resources*, 34(6), 684-700. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.02.010>
- Delgado, A., Rodriguez, D.J., Amadei, C.A., y Makino, M. (2021). Water in Circular Economy and Resilience. <https://doi.org/10.1596/36254>
- Durán-Romero, G., López, A.M., Beliaeva T., Ferasso M., Garonne, C., y Jones, P. (2020). Bridging the gap between circular economy and climate change mitigation policies through eco-innovations and Quintuple Helix Model. *Technological Forecasting and Social Change*, 160, 120246. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120246>
- Esposito, B., Sessa, M.R., Sica, D., y Malandrino, O. (2020). Towards circular economy in the agrifood sector. A systematic literature review. *Sustainability*, 12(18), 7401. <https://doi.org/10.3390/su12187401>
- Foster, S., y Ait-Kadi, M. (2012). Integrated Water Resources Management (IWRM): how does groundwater fit in? *Hydrogeology Journal*, 20(3), 415-418. <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0831-9>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N.M., y Hultink, E.J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm? *Journal of cleaner production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Gherghel, A., Teodosiu, C., y De Gisi, S. (2019). A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *Journal of cleaner production*, 228, 244-263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.240>
- Giupponi, C., y Gain, A.K. (2017). Integrated water resources management (IWRM) for climate change adaptation. *Regional Environmental Change*, 17(7), 1865-1867. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1173-x>
- Gohari, A., Eslamian, S., Mirchi, A., Abedi-Koupaei, J., Bavani, A.M., y Madani, K. (2013). Water transfer as a solution to water shortage: a fix that can backfire. *Journal of Hydrology*, 491, 23-39. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.021>
- Greve, P., Kahil, T., Mochizuki, J., Schinko, T., Satoh, Y., Burek, P., Fischer, G., Tramberend, S., Burtscher, R., Langan, S., y Wada, Y. (2018). Global assessment of water challenges under uncertainty in water scarcity projections. *Nature Sustainability*, 1(9), 486-494. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0134-9>
- Griffin, R.C. (2016). *Water resource economics: The analysis of scarcity, policies, and projects*. MIT press.
- Gude, V.G. (2017). Desalination and water reuse to address global water scarcity. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 16(4), 591-609. <https://doi.org/10.1007/s11157-017-9449-7>
- Guo, Z., Yan, N., y Lapkin, A.A. (2019). Towards circular economy: integration of bio-waste into chemical supply chain. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 26, 148-156. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2019.09.010>

- Hanjra, M.A., y Qureshi, M.E. (2010). Global water crisis and future food security in an era of climate change. *Food policy*, 35(5), 365-377. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.05.006>
- Herrera-León, S., Lucay, F.A., Cisternas, L.A., y Kraslawski, A. (2019). Applying a multi-objective optimization approach in designing water supply systems for mining industries. The case of Chile. *Journal of Cleaner Production*, 210, 994-1004. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.081>
- Hernández-Chover, V., Castellet-Viciano, L., Bellver-Domingo, Á, y Hernández-Sancho, F. (2022). The Potential of Digitalization to Promote a Circular Economy in the Water Sector. *Water*, 14(22), 3722. <https://doi.org/10.3390/w14223722>
- Heshmati, A. A. (2017). Review of the Circular Economy and its Implementation. *International Journal of Green Economics*, 11(3-4), 251-288.
- Hoekstra, A.Y., Buurman, J., y Van Ginkel, K.C. (2018). Urban water security: A review. *Environmental research letters*, 13(5), 053002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaba52>
- Karabulut, A., Egoh, B.N., Lanzaova, D., Grizzetti, B., Bidoglio, G., Pagliero, L., Bouraoui, F., Aloe, A., Reynaud, A., Maes, J., y Vandecasteele, I. (2016). Mapping water provisioning services to support the ecosystem–water–food–energy nexus in the Danube river basin. *Ecosystem services*, 17, 278-292. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.08.002>
- Kirchherr, J., y Piscicelli, L. (2019). Towards an education for the circular economy (ECE): five teaching principles and a case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 150, 104406. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104406>
- Kummu, M., Guillaume, J.H., de Moel, H., Eisner, S., Flörke, M., Porkka, M., Siebert, S., Veldkamp, T.I., y Ward, P.J. (2016). The world's road to water scarcity: shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability. *Scientific reports*, 6(1), 38495. <https://doi.org/10.1038/srep38495>
- Lambooy, T. (2011). Corporate social responsibility: sustainable water use. *Journal of Cleaner Production*, 19(8), 852-866. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.09.009>
- Lekshmi, B., Sharma, S., Sutar, R.S., Parikh, Y.J., Ranade, D.R., y Asolekar, S.R. (2020). Circular economy approach to women empowerment through reusing treated rural wastewater using constructed wetlands. En S. Ghosh (ed.), *Waste Management as Economic Industry Towards Circular Economy* (1-10). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1620-7_1
- Lieder, M., y Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of cleaner production*, 115, 36-51. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>
- Ma, Q., Yu, Y., Sindoro, M., Fane, A.G., Wang, R., y Zhang, H. (2017). Carbon-based functional materials derived from waste for water remediation and energy storage. *Advanced materials*, 29(13), 1605361. <https://doi.org/10.1002/adma.201605361>
- Maliva, R., y Missimer, T. (2012). Arid lands water evaluation and management. Springer Science & Business Media.
- Mancosu, N., Snyder, R.L., Kyriakakis, G., y Spano, D. (2015). Water scarcity and future

- challenges for food production. *Water*, 7(3), 975-992. <https://doi.org/10.3390/w7030975>
- Meneses, M., Pasqualino, J.C., y Castells, F. (2010). Environmental assessment of urban wastewater reuse: Treatment alternatives and applications. *Chemosphere*, 81(2), 266-272. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.05.053>
- Misra, A.K. Climate change and challenges of water and food security. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), 153-165. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2014.04.006>
- Neczaj, E., y Grosser, A. (2018). Circular economy in wastewater treatment plant—challenges and barriers. *Proceedings*, 2(11), 614. <https://doi.org/10.3390/proceedings2110614>
- Nika, C.E., Vasilaki, V., Expósito, A., y Katsou, E. (2020). Water cycle and circular economy: developing a circularity assessment framework for complex water systems. *Water Research*, 187, 116423. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116423>
- Pedro-Monzonis, M., Solera, A., Ferrer, J., Estrela, T., y Paredes-Arquiola, J. A (2015). Review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management. *Journal of Hydrology*, 527, 482-493. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.003>
- Qin, B., Zhu, G., Gao, G., Zhang, Y., Li, W., Paerl, H.W., y Carmichael, W.W. (2010). A drinking water crisis in Lake Taihu, China: linkage to climatic variability and lake management. *Environmental management*, 45, 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.003>
- Rockstrom, J. (2013). Balancing water for humans and nature: the new approach in ecohydrology. Routledge.
- Sauve, S., Lamontagne, S., Dupras, J., y Stahel, W. (2021). Circular economy of water: Tackling quantity, quality and footprint of water. *Environmental Development*, 39, 100651. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2021.100651>
- Saleth, R.M., Dinar, A. (2004). The institutional economics of water: a cross-country analysis of institutions and performance. World Bank Publications.
- Sarrafzadeh, M.H. (2022). Circular economy in petroleum industries: implementing Water Closed Loop System. En H. Muftah, El-Naas y Banerjee, A. (Eds.), *Petroleum Industry Wastewater* (249-262). Elsevier.
- Schroeder, P., Anggraeni, K., y Weber, U. (2019). The relevance of circular economy practices to the sustainable development goals. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 77-95. <https://doi.org/10.1111/jiec.12732>
- Scott, C.A., Pierce, S.A., Pasqualetti, M.J., Jones, A.L., Montz, B.E., y Hoover, J.H. (2011). Policy and institutional dimensions of the water-energy nexus. *Energy Policy*, 39(10), 6622-6630. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.013>
- Sgroi, M., Vagliasindi, F.G., y Roccaro, P. (2018). Feasibility, sustainability and circular economy concepts in water reuse. *Current opinion in environmental Science & Health*, 2, 20-25. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.01.004>
- Shatat, M., y Riffat, S.B. (2014). Water desalination technologies utilizing conventional

- and renewable energy sources. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 9(1), 1-19. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>
- Smith, R. (2017). The water scarcity-conflict Nexus: The case of Darfur (Doctoral dissertation). Stellenbosch University.
- Smol, M., Adam, C., y Preisner, M. (2020). Circular economy model framework in the European water and wastewater sector. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, 682-697. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00960-z>
- Srinivasan, V., Lambin, E.F., Gorelick, S.M., Thompson, B.H., y Rozelle, S. (2012). The nature and causes of the global water crisis: Syndromes from a meta-analysis of coupled human-water studies. *Water resources research*, 48(10), 1-16. <https://doi.org/10.1029/2011WR011087>
- Tayebi-Khorami, M., Edraki, M., Corder, G., y Golev, A. (2019). Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations. *Minerals*, 9(5), 286. <https://doi.org/10.3390/min9050286>
- Van Buren, N., Demmers, M., Van der Heijden, R., y Witlox, F. (2016). Towards a circular economy: The role of Dutch logistics industries and governments. *Sustainability*, 8(7), 647. <https://doi.org/10.3390/su8070647>
- Viles, E., Santos, J., Arévalo, T.F., Tanco, M., y Kalemkerian, F. (2020). A new mindset for circular economy strategies: Case studies of circularity in the use of water. *Sustainability*, 12(22), 9781. <https://doi.org/10.3390/su12229781>
- Velenturf, A.P., y Purnell, P. (2021). Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1437-1457. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.018>
- Veldkamp, T.I.E., Wada, Y., Aerts, J.C.J.H., Döll, P., Gosling, S.N., Liu, J., Masaki, Y., Oki, T., Ostberg, S., Pokhrel, Y., y Satoh, Y. (2017). Water scarcity hotspots travel downstream due to human interventions in the 20th and 21st century. *Nature communications*, 8(1), 15697. <https://doi.org/10.1038/ncomms15697>
- Voulvoulis, N. (2018). Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2, 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.01.005>
- Waraich, E.A., Ahmad, R., Ashraf, M.Y., Saifullah, y Ahmad, M. (2011). Improving agricultural water use efficiency by nutrient management in crop plants. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 61(4), 291-304. <https://doi.org/10.1080/09064710.2010.491954>
- Ward, C., y Ruckstuhl, S. (2017). Water scarcity, climate change and conflict in the Middle East: securing livelihoods, building peace. *Bloomsbury Publishing*.
- Winans, K., Kendall, A., y Deng, H. (2017). The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 825-833. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.123>
- Xu, J., Li, X., y Wu, D.D. (2009). Optimizing circular economy planning and risk analysis using system dynamics. *Human and Ecological Risk Assessment*, 15(2), 316-331. <https://doi.org/10.1080/10807030902761361>
- Zhao, H., Qu, S., Guo, S., Zhao, H., Liang, S., y Xu, M. (2019). Virtual water scarcity risk to

- global trade under climate change. *Journal of cleaner production*, 230, 1013-1026. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.114>
- Zhao, X.U., Yang, H., Yang, Z., Chen, B., y Qin, Y. (2010). Applying the input-output method to account for water footprint and virtual water trade in the Haihe River basin in China. *Environmental Science & Technology*, 44(23), 9150-9156. <https://doi.org/10.1021/es100886r>
- Zyoud, S.H., Kaufmann, L.G., Shaheen, H., Samhan, S., y Fuchs-Hanusch, D. (2016). A framework for water loss management in developing countries under fuzzy environment: Integration of Fuzzy AHP with Fuzzy TOPSIS. *Expert Systems with Applications*, 61, 86-105. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.05.016>
- Zwarteveen, M.Z, y Boelens, R. (2014). Defining, researching and struggling for water justice: some conceptual building blocks for research and action. *Water international*, 39(2), 143-158. <https://doi.org/10.1080/02508060.2014.891168>

