

Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe

Silvia Saravia Matus
Marina Gil Sevilla
Diego Fernández
Alfredo Montañez
Elisa Blanco
Lisbeth Naranjo
Alba Llavona
Natalia Sarmanto



NACIONES UNIDAS

CEPAL

Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

Deseo registrarme



NACIONES UNIDAS

CEPAL



www.cepal.org/es/publications



www.instagram.com/publicacionesdelacepal



www.facebook.com/publicacionesdelacepal



www.issuu.com/publicacionescepal/stacks



www.cepal.org/es/publicaciones/apps

SERIE

RECURSOS NATURALES Y DESARROLLO

213

Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe

Silvia Saravia Matus

Marina Gil Sevilla

Diego Fernández

Alfredo Montañez

Elisa Blanco

Lisbeth Naranjo

Alba Llavona

Natalia Sarmanto



NACIONES UNIDAS

CEPAL

Este documento fue preparado por Silvia Saravia Matus, Oficial de Asuntos Económicos, Marina Gil Sevilla, Asistente Superior de Investigación, ambas de la Unidad de Agua y Energía de la División de Recursos Naturales de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), y Diego Fernández, Alfredo Montañez, Elisa Blanco, Lisbeth Naranjo, Alba Llavona y Natalia Sarmanto, Consultores de la misma Unidad. Los autores agradecen los comentarios de Laura Martínez Botia.

El financiamiento para la preparación de este material fue posible a través del proyecto "Potable water, sanitation and renewable energies to improve the health conditions of the population and promote productive uses in the most lagging behind municipalities of the countries of the northern subregion of Latin America and the Caribbean" (PDF-SDG-2021-07), liderado por la CEPAL y financiado por el subfondo para la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible del fondo fiduciario de las Naciones Unidas para la paz y el desarrollo.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización o las de los países que representa.

Publicación de las Naciones Unidas
ISSN: 2664-4541 (versión electrónica)
ISSN: 2664-4525 (versión impresa)
LC/TS.2022/193
Distribución: L
Copyright © Naciones Unidas, 2022
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.22-00923

Esta publicación debe citarse como: S. Saravia Matus y otros, "Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe", *serie Recursos Naturales y Desarrollo*, N° 213 (LC/TS.2022/193), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2022.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

Resumen.....	7
Introducción	9
I. La problemática de las aguas residuales en América Latina y el Caribe (ALC)	11
A. El tratamiento de aguas residuales en ALC: situación.....	11
B. Metas y acuerdos para el avance en el tratamiento de aguas residuales en ALC.....	14
II. De residuo a recursos: oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales municipales	17
A. Alcance de la Economía Circular	18
1. Economía circular y desarrollo sostenible.....	20
2. Economía circular y agua	21
B. Potencial tecnológico de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales.....	21
1. Reúso de las aguas.....	22
2. Generación de energía	23
3. Extracción de nutrientes	26
C. Beneficios esperados	27
1. Beneficios económicos directos	28
2. Ambientales.....	29
3. Sociales	30
D. Principales hallazgos.....	31
III. Potencial de aprovechamiento del metano para la generación de energía en las PTAR de América Latina y el Caribe	33
A. Caracterización de PTAR en países selectos de la región	34
B. Selección de PTAR para el desarrollo del análisis	40

C.	Metodología y parámetros empleados en la estimación de emisiones de metano según tipo de tecnología	42
D.	Estimación de emisiones de metano en las PTAR objetivo de los países seleccionados en un escenario base	45
E.	Estimación de emisiones de metano en las PTAR objetivo de los países seleccionados en un escenario modificado	47
IV.	Estimación de los costos y beneficios derivados del aprovechamiento del metano —emitido en las PTAR objetivo— para la cogeneración de energía	51
A.	Costos de inversión para el aprovechamiento de metano en la generación de energía en las PTAR objetivo.....	51
B.	Beneficios económicos.....	54
C.	Beneficios ambientales	59
D.	Beneficios macroeconómicos y sociales	61
V.	Conclusiones y recomendaciones	65
A.	Hallazgos y recomendaciones para la adopción de una política y plan de aprovechamiento del metano de PTAR en países de América Latina y el Caribe.....	65
B.	Aporte a la recuperación económica transformadora de la región	67
	Bibliografía	69
	Anexos	75
	Anexo 1	76
	Anexo 2	85
	Anexo 3	89
	Serie Recursos Naturales y Desarrollo: números publicados	97
	Cuadros	
Cuadro 1	Resumen de propuestas relacionadas con el tratamiento de aguas residuales de las NDC en ALC por país.....	15
Cuadro 2	Caracterización de los países seleccionados para el análisis	35
Cuadro 3	Estadísticas básicas de las PTAR existentes en los cinco países seleccionados.....	36
Cuadro 4	Número de PTAR (con capacidades entre 500 l/s – 4.000 l/s) en los países analizados.....	40
Cuadro 5	Clasificación de las PTAR (con capacidades entre 500 l/s – 4.000 l/s) según la tecnología empleada.....	41
Cuadro 6	Parámetros generales para la estimación del metano emitido en el tratamiento de las aguas residuales.....	44
Cuadro 7	Parámetros para la estimación del metano emitido en el tratamiento de las aguas residuales a partir de tecnologías anaerobias y anaerobias-aerobias.....	44
Cuadro 8	Emisiones de metano estimadas en el tratamiento de las aguas residuales domésticas en las PTAR objetivo	46
Cuadro 9	Emisiones de metano estimadas en cada país, producto del tratamiento de las aguas residuales domésticas en las PTAR objetivo	47
Cuadro 10	Emisiones de metano y potencial energético estimado, derivado del tratamiento de las aguas residuales domésticas en las PTAR objetivo	48
Cuadro 11	Emisiones de metano y potencial energético estimado en cada país, producto del tratamiento de las aguas residuales domésticas en las PTAR objetivo	49
Cuadro 12	Inversiones necesarias para aprovechar el metano generable en las PTAR objetivo	52

Cuadro 13	Costo de Inversión estimado para el aprovechamiento del metano generable en las PTAR objetivo, por tecnología	53
Cuadro 14	Costo de Inversión estimado para el aprovechamiento del metano generable en las PTAR objetivo, por país	53
Cuadro 15	Precios de energía eléctrica para el sector industrial en el segundo trimestre de 2019	55
Cuadro 16	Evaluación financiera del aprovechamiento de metano en las PTAR objetivo.....	55
Cuadro 17	Reducción de emisiones después de la realización de inversiones en la captación y el aprovechamiento del metano en las PTAR objetivo	60
Cuadro 18	Impacto de las inversiones sobre el PIB, el valor agregado y el empleo, por país.....	62
Cuadro A1	Resumen de las tecnologías empleadas en el tratamiento de aguas residuales en ALC.....	82
Cuadro A2	Clasificación de las PTAR contenidas en la base de datos según la tecnología empleada.....	83
Cuadro A3	Inversiones necesarias para aprovechar el metano generable en las PTAR que emplean tratamiento aerobio (compacto) y primario avanzado de las aguas residuales.....	89
Cuadro A4	Costo de inversión estimado para el aprovechamiento del metano generable en las PTAR que emplean tecnologías aerobias (compactas) en el tratamiento de las aguas residuales.....	90
Cuadro A5	Inversiones necesarias para aprovechar el metano generable en las PTAR que operan a partir de sistemas lagunares.....	91
Cuadro A6	Costo de inversión estimado para el aprovechamiento del metano generable en las PTAR que operan a partir de sistemas lagunares.....	91
Cuadro A7	Inversiones necesarias para aprovechar el metano generable en las PTAR que emplean tratamiento anaerobio y anaerobio - aerobio (compacto) de las aguas residuales.....	92
Cuadro A8	Costo de inversión estimado para el aprovechamiento del metano generable en las PTAR que emplean tecnologías anaerobias y anaerobias-aerobias (compactas)	93
Cuadro A9	Detalle de las inversiones a realizar en las PTAR que emplean tecnologías aerobias compactas.....	94
Cuadro A10	Detalle de las inversiones a realizar en las PTAR que emplean tecnologías anaerobias	96

Gráficos

Gráfico 1	Acceso a servicios de saneamiento y tratamiento de aguas en países seleccionados de ALC, 2020	12
Gráfico 2	Aguas residuales domésticas tratadas de manera segura en ALC, 2020	13
Gráfico 3	Distribución de las 3.336 PTAR según capacidad de tratamiento (l/s).....	37
Gráfico 4	Curva de Lorenz: Capacidad instalada en relación con el número de PTAR en los países evaluados	38
Gráfico 5	Número de plantas y capacidad de tratamiento total (l/s) según la capacidad de tratamiento de las PTAR	39
Gráfico 6	Participación de tecnologías aerobias y anaerobias en los caudales tratados en las PTAR objetivo.....	42

Gráfico 7	Emisiones de metano estimadas según el tipo de tratamiento aplicado a las aguas residuales.....	46
Gráfico 8	Costos de inversión por cada MWh de energía eléctrica generable al año	54
Gráfico 9	Costos de inversión p.e. vs. Ingresos proyectados p.e. a 20 años, producto del aprovechamiento del metano en la generación de energía eléctrica.....	56
Gráfico 10	Nivel de utilización de la capacidad instalada en las PTAR evaluadas, según el tipo de tecnología empleada en el tratamiento de las aguas residuales	57
Gráfico 11	Nivel de utilización de la capacidad instalada en las PTAR evaluadas de cada país	58
Gráfico 12	Costos de inversión vs. Ingresos proyectados a 20 años, producto del aprovechamiento del metano en la cogeneración de energía (suponiendo el uso del 85% de la capacidad instalada).....	58
Gráfico 13	Reducción de emisiones por país, en las PTAR objetivo	61
Gráfico 14	Impacto de las inversiones sobre el PIB y el valor agregado, por país	62
Gráfico 15	Impacto de las inversiones sobre la generación de empleos verdes, por país.....	63
Gráfico A1	Distribución de las PTAR que reportan información adecuada, según el tipo de tratamiento que emplean y la capacidad de tratamiento (l/s)	83

Diagramas

Diagrama 1	Diferencia entre economía lineal y economía circular	18
Diagrama 2	Economía circular y Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	20
Diagrama A1	Sistema de tratamiento mediante lodos activados convencionales	76
Diagrama A2	Sistema de tratamiento mediante aireación extendida.....	77
Diagrama A3	Sistema de tratamiento mediante lodos activados convencional con desnitrificación	77
Diagrama A4	Sistema de tratamiento mediante zanja de oxidación.....	78
Diagrama A5	Sistema de tratamiento mediante filtro biológico	78
Diagrama A6	Sistema de tratamiento mediante reactor anaerobio de flujo ascendente	79
Diagrama A7	Sistema de tratamiento mediante reactor anaerobio de flujo ascendente u otro tipo de reactor anaerobio + lodos activados	81
Diagrama A8	Sistema de tratamiento mediante reactor anaerobio de flujo ascendente u otro tipo de reactor anaerobio + filtro biológico o filtro percolador	81

Resumen

La adopción de principios de economía circular para la recuperación de metano en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) ya está muy extendida en la mayoría de las megaciudades de América Latina y el Caribe (ALC). Sin embargo, hay una amplia cantidad de población que reside en ciudades más pequeñas que carecen de este tipo de cobertura.

Para promover la adopción de estas tecnologías en las PTAR de tamaño intermedio en la región, este trabajo estima las inversiones necesarias y los beneficios económicos, sociales y ambientales de la recuperación de metano y la generación eléctrica en 75 plantas con capacidades entre 500 l/s y 4.000 l/s que atienden a 33 millones de personas distribuidas en el Estado Plurinacional de Bolivia, Colombia, Costa Rica, México y Perú.

Los resultados indican que se requiere de una inversión estimada en USD \$251 millones, o bien, USD \$7,6 persona equivalente (p.e.). Esto permitiría obtener ingresos a 20 años de USD \$10,2 p.e., lo que representa una relación beneficio/costo de 1,34. A su vez, estas inversiones permitirían la creación de 11.383 nuevos empleos verdes, y una reducción del 88% de sus emisiones de metano a la atmósfera.

Así, este documento presenta evidencia de la factibilidad para el desarrollo de este tipo de inversiones en PTAR de capacidades intermedias. Esto es esencial para acelerar el logro de las metas de los ODS 6 y 7 de la Agenda de Desarrollo 2030. Sin embargo, requiere una gobernanza innovadora, así como acceso a financiamiento y apoyo tecnológico. Una de las principales conclusiones es que estos esfuerzos contribuyen a la recuperación transformadora de la región y están en el centro del establecimiento de estándares que permitan a las sociedades vivir dentro de los límites planetarios.

Introducción

En 2020, aproximadamente el 89% de la población de América Latina y el Caribe, 582 millones de personas, tenía acceso a alguna forma de saneamiento básico —55% con acceso a saneamiento básico, y 34,1% gestionado de forma segura—. El 67% de la población estaba conectada a un sistema de alcantarillado, 19% en áreas rurales y 78% en áreas urbanas, y únicamente el 34% contaba con conexión a un sistema de alcantarillado que incorpora el tratamiento de aguas residuales gestionadas de manera segura (JMP, 2021). Ello evidencia un atraso significativo en la materia por parte de los países de la región, pues ese mismo año, tan solo el 41% de las aguas residuales fueron tratadas (División de Estadística de las Naciones Unidas, 2021). Lo anterior, contrasta con la media de tratamiento a nivel mundial (55,5%) y se encuentra muy por debajo de los países de la OCDE (más del 80%) (División de Estadística de las Naciones Unidas, 2021). Estos bajos niveles de cobertura del tratamiento de las aguas residuales en la región conllevan afectaciones importantes en el plano ambiental, donde se destaca principalmente la contaminación de los cuerpos de agua, que desembocan a su vez en consecuencias para la salud, producto de patógenos que se transmiten por vía fecal-oral; y en el deterioro del ecosistema en el que habitan organismos como peces y aves. Si bien aumentar los niveles de tratamiento contrarresta estos efectos, dichas tecnologías aumentan el consumo energético y las emisiones de metano, lo cual conlleva a efectos climáticos que es necesario evitar. Por tal motivo, el objetivo de este informe es explorar las oportunidades que brindan los principios de economía circular para impulsar un tratamiento más sostenible de las aguas residuales, principalmente en ciudades intermedias (de entre 300.000 a 2,3 millones de habitantes) donde existe suficiente escala técnica para transformar residuos en recursos.

I. La problemática de las aguas residuales en América Latina y el Caribe (ALC)

En este capítulo¹ se presenta una descripción de la problemática de las aguas residuales en América Latina y el Caribe (ALC) (apartado A). A continuación, se realiza un análisis de las metas que los distintos países de la región pactaron y se fijaron para avanzar en el tratamiento de aguas residuales urbanas, en el marco de las contribuciones determinadas a nivel nacional (apartado B).

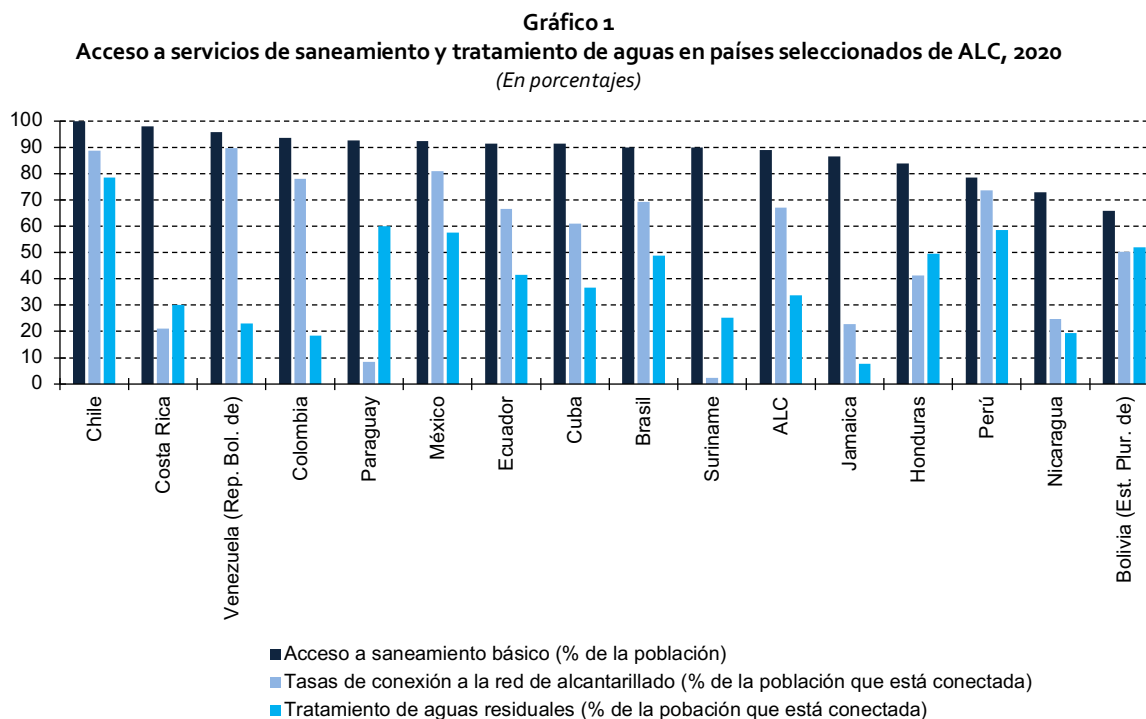
A. El tratamiento de aguas residuales en ALC: situación

En América Latina y el Caribe una de las principales fuentes de contaminación del agua es el inadecuado tratamiento de las aguas domésticas. Por lo común, en las poblaciones pequeñas y medianas no existe una regulación precisa a este respecto, y muchas plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se encuentran en mal estado o abandonadas debido a su insuficiencia tanto de recursos económicos como de capacidad operativa. En cuanto a las localidades rurales, solo una baja proporción dispone de sistemas de recolección de aguas residuales, y menos aún de PTAR (Peña, 2016).

En 2020, aproximadamente 7 personas de cada 10 no tenían acceso a saneamiento gestionado de manera segura en la región y hasta un cuarto de los tramos de los ríos se encuentran afectados por la contaminación patógena severa, con concentraciones mensuales de la bacteria coliforme fecal de más de 1000 unidades de estos coliformes por cada 100 ml, observándose un incremento sustancial de casi dos tercios entre 1990 y 2010. Esta contaminación del agua se origina mayormente en las aguas residuales domésticas de alcantarillas (PNUMA, 2016).

¹ Este capítulo está basado en el documento de consultoría "Informe de conclusiones sobre inversión en sistemas circulares de tratamiento de agua y energía renovable para América Latina y el Caribe con enfoque Nexo" elaborado en el marco del proyecto Nexo de la GIZ para apoyar la primera sesión de Foco en las Américas de la Semana Mundial del Agua de Estocolmo 2022 donde participó la CEPAL.

Como se muestra en el gráfico 1, los niveles de gestión y tratamiento del agua residual varían de forma importante entre los distintos países de ALC, y los promedios regionales enmascaran esta gran variación.

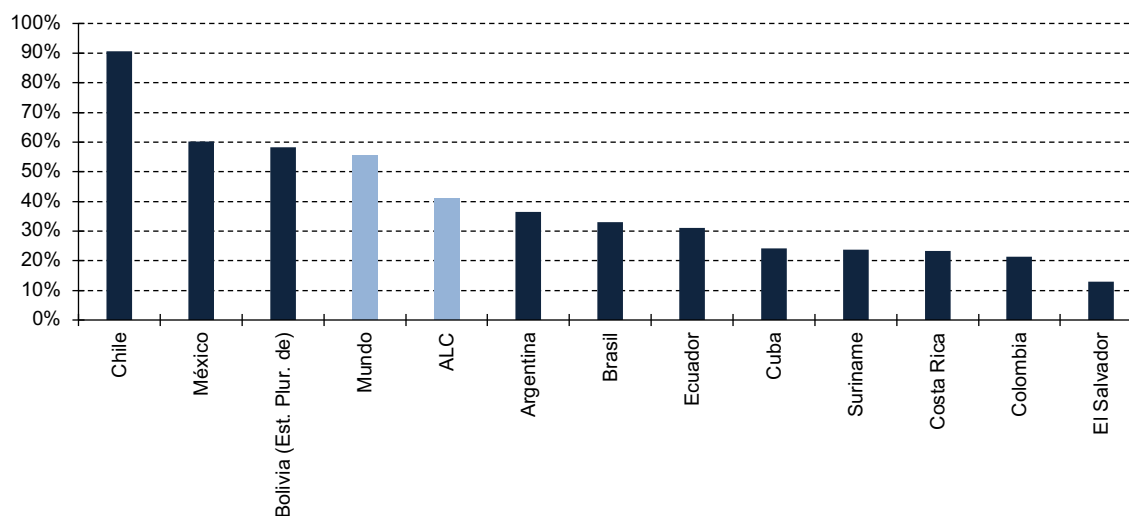


Fuente: Elaboración propia, sobre JMP (Programa Conjunto de Vigilancia del Abastecimiento de Agua y el Saneamiento), 2021.

Con respecto al indicador de la meta 6.3 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), relativo a la calidad de los cuerpos de agua, la mayoría de los países de ALC no han proporcionado información para su seguimiento y solo 11 de los 33 países miembros de la CEPAL han reportado datos sobre el porcentaje de aguas residuales tratadas de forma segura (indicador 6.3.1).

La marcada ausencia de información disponible pone de manifiesto un importante y claro atraso en la materia; sin embargo, al valorar las estadísticas de los países que sí reportan información, es posible apreciar el rezago de la región. En efecto, en 8 de los 11 países que suministran datos, el tratamiento de las aguas residuales de origen doméstico —de forma adecuada/segura—, no supera el 40% del total (véase el gráfico 2). El Salvador informó de la menor cobertura de tratamiento de forma segura: solo el 12,95%, por detrás de Colombia, Costa Rica, Surinam y Cuba, los cuales reportan coberturas por debajo del 25%.

Gráfico 2
Aguas residuales domésticas tratadas de manera segura en ALC, 2020
 (En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia, con base en UNSTAT (División de Estadística de las Naciones Unidas, 2021).

La situación es similar con respecto al indicador 6.3.2, referente a la proporción de cuerpos de agua que presentan buena calidad ambiental y no plantean riesgos para el medio ambiente o la salud humana. En este sentido, la falta de datos y de monitoreo cercano genera una preocupación adicional, puesto que la contaminación de los cuerpos de agua es una de las principales externalidades ambientales que pueden llegar a destruir ecosistemas completos, eliminar sus beneficios (provisión de agua dulce y alimentos, regulación del clima y servicios culturales) y dificultar su sostenibilidad (Saravia Matus y otros, 2020).

En la mayoría de los países de América Latina y el Caribe es una práctica común verter aguas residuales en lagos, ríos y arroyos sin tratamiento apropiado, lo que plantea graves problemas a los hogares que se encuentran a lo largo de estos cursos de agua y que dependen de ellas para el suministro de agua potable (Schady, 2015). Por tal motivo, muchos sistemas fluviales como el río Medellín en Colombia y el río Matanza Riachuelo en Argentina, responsables del abastecimiento de agua potable para la población de esas localidades y del riego para productos de consumo humano y animal, y que constituyen el medio de vida de muchas especies acuáticas animales y vegetales, se encuentran altamente contaminados.

La emisión de cargas de nutrientes con compuestos provenientes del nitrógeno y del fósforo es, además, precursora de los florecimientos de algales nocivos (FAN), que proliferan cuando existe gran radiación solar y altas temperaturas. Estas floraciones tienen muchas veces lamentables efectos tóxicos en organismos como peces y aves, y consecuentemente para las personas que los consumen. Ello puede implicar desde alergias hasta la muerte si la toxina es letal para tales organismos (por ejemplo, la marea roja) o para los humanos (cianotoxinas producidas por microalgas, un componente biológico microscópico del agua). Los FAN coinciden con el aumento poblacional en las zonas costeras, pues se vierten más aguas urbanas al mar (Guzmán, 2019).

Por otro lado, la falta de tratamiento de aguas residuales se correlaciona con brotes de enfermedades tan graves como la hepatitis A (González y otros, 2019). El virus de la hepatitis A (HAV) es un peligroso patógeno que se transmite por vía fecal-oral. La epidemiología de la infección está directamente relacionada con el acceso de la población al agua potable y con la infraestructura de alcantarillado (Báez y otros, 2016). Un estudio realizado en la Universidad de Concepción en Chile

concluye que en una zona de inundación marina analizada, muy contaminada con materia fecal humana, existía una concordancia espacio-temporal con un brote de hepatitis A entre la población costera (Ibid). Además, en otros países de Latinoamérica se ha evidenciado previamente la circulación del HAV en muestras ambientales en ciudades como Córdoba en Argentina, Caracas en Venezuela y Río de Janeiro en Brasil (Ibid). Es importante mencionar que la contaminación fecal humana es potencialmente más riesgosa que la de origen animal, ya que en esta proliferan todos los patógenos específicos del humano, como el mencionado virus de la hepatitis A (González y otros, 2019).

Todo lo anterior es aún más preocupante en el contexto del cambio climático. Según el informe IPCC 2021, ALC es una de las regiones del mundo más afectadas por los desastres relacionados con el clima. Los fenómenos hidrometeorológicos, como inundaciones, tormentas, sequías y olas de calor, representan el 93% de todos los desastres ocurridos en los últimos veinte años, e irán en aumento. En un escenario de escasez hídrica, en el que disminuyen los caudales, la capacidad de dilución de los sistemas fluviales se minimiza y con ello se afecta la resiliencia de los ecosistemas para amortiguar los cambios. Como consecuencia, disminuye su posibilidad de preservar la biodiversidad y aumentan las concentraciones de materias contaminantes. Igualmente, durante lluvias torrenciales se pueden llegar a inundar los fosos sépticos creando una situación de alto riesgo para la salud pública.

La retracción de los glaciares y la intrusión salina, junto con la distribución desigual de las precipitaciones, se reflejan en la disminución del agua disponible. Las sequías pueden tener graves impactos negativos en la calidad del agua necesaria para la agricultura de regadío (Peña-Guerrero y otros, 2020). En los periodos de sequía se intensifica el uso de aguas residuales sin tratamiento para el riego, práctica extensamente utilizada en algunos países de ALC. Esto conlleva el riesgo de que niños y adultos que trabajan en labores agrícolas, al igual que quienes consumen sus productos, contraigan diversas infecciones y enfermedades del tracto digestivo por bacterias, por virus o por el contacto con protozoos. De igual manera, esto puede causar enfermedades en el ganado, como la brucelosis por la ingesta de aguas residuales y alimentos regados con las aguas no tratadas, lo cual afecta, a su vez, a quienes consumen su carne (Cisneros, 2015).

B. Metas y acuerdos para el avance en el tratamiento de aguas residuales en ALC

Para conocer el avance en el tratamiento de aguas residuales en ALC, se revisaron las contribuciones nacionales determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) de los países de la región. Estas dan cuenta de los acuerdos y metas que los distintos países pactaron y se fijaron para avanzar en el tratamiento de aguas residuales. La información analizada se obtuvo del registro provisional de contribuciones nacionales determinadas [Secretaría de la CMNUCC (ONU Cambio Climático), 2021].

Es importante mencionar que todos los países de ALC ya han reportado sus primeras NDC y que apenas 3 (Argentina, Granada y Surinam) de 33 estados han reportado sus segundas NDC, y deben hacerlo antes de 2025 según el Acuerdo de París.

Luego de la revisión de los documentos, se pudo verificar que 12 de los 33 países (36%) incluían en sus NDC contribuciones relacionadas con el tratamiento de aguas residuales (domésticas e industriales). Por otro lado, 8 países (24%) reportaban en sus NDC previsiones relacionadas con el tratamiento de aguas residuales domésticas específicamente.

En el cuadro 1 se presenta un resumen de lo propuesto en las NDC de cada país. En los compromisos asumidos se destaca el rol del tratamiento de aguas residuales para reducir las emisiones de metano a la atmósfera y fortalecer la resiliencia en el sector.

Cuadro 1
Resumen de propuestas relacionadas con el tratamiento de aguas residuales de las NDC en ALC por país

País/año reporte ^a	Detalle
América del Sur	
Bolivia (Estado Plurinacional de) (2016)	Acciones para el logro de los resultados vinculados con el agua: plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales para reducir sus aportes de metano hacia la atmósfera.
Chile (2020)	Medidas consideradas en los escenarios proyectados en 2030 y 2050: uso de lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas, como bioestabilizador forestal. En un escenario de carbono neutral: nuevas plantas de tratamiento en la Gran Concepción y el Gran Valparaíso para 2035, con gestión del metano y uso de lodos.
Colombia (2020)	Objetivo: alcanzar 68% del tratamiento de aguas residuales urbanas domésticas en 2030. Objetivo: aumentar la cobertura y calidad en el tratamiento del caudal de aguas residuales a fin de proteger las cuencas y fuentes abastecedoras de acueductos más contaminadas y fortalecer, con criterios de adaptación al cambio climático, los procesos involucrados en la ejecución del programa Saneamiento de Vertimientos (SAVER). Uso previsto, impacto y resultados estimados: a partir de la priorización realizada por el programa SAVER, optimizar o construir infraestructura sostenible capaz de afrontar los retos del cambio climático; al igual que gestionar información sobre tecnología que facilite la adaptación.
México + América Central	
Costa Rica (2020)	La contribución de Costa Rica en el área temática de residuos está centrada en la gestión integral de residuos, en particular los orgánicos, y en la modernización de su sistema de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, en particular en áreas urbanas. Contribución: meta 8.4: en el año 2030, al menos el 50% de las aguas residuales en las áreas de alta densidad poblacional recibirán tratamiento, incorporando criterios de resiliencia al cambio climático. Meta 8.2: al 2026 se habrá actualizado el monto base del canon de aprovechamiento de agua, vertidos de aguas residuales y servicios ambientales, considerando el cambio climático y criterios de eficiencia en el uso.
Guatemala (2017)	Mitigación: implementación del Reglamento de Aguas Residuales (Acuerdo Gubernativo 236-2006), como un instrumento para el tratamiento de las emisiones producidas por este sector.
México (2020)	Línea de acción D3. Aumentar el tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas, asegurando la cantidad y buena calidad del agua en asentamientos humanos mayores que 500,000 habitantes.
Nicaragua (2020)	Acciones a mediano plazo a considerar en futuras NDC (2025-2030): biodigestores en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales. Desde 2007 los sistemas de tratamiento de aguas residuales han aumentado significativamente; en 2010, 13 cabeceras departamentales brindaban tratamiento a las aguas residuales. Desde el inicio de operaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Managua el porcentaje de tratamiento de las aguas residuales recolectadas en la ciudad mejoró significativamente, de 35.22% en 2007 a 98.19% para 2011, y el índice de tratamiento pasó de 19.66% a 57.63% a nivel nacional.
El Caribe	
Santa Lucía (2021)	Objetivo: reducir emisiones en todo el sector utilizando 2010 como año base, que abarquen el sector de energía. Co-beneficio: reducción de las emisiones de la gestión de aguas residuales e introducción de tecnologías de energía renovable en el sector del agua.

Fuente: Elaboración propia en base a NDC por país.

^a Para hacer el presente análisis se consideró la última actualización disponible.

La revisión de estas NDCs indica que muchos de estos países están planteando la inclusión de principios de economía circular en la mejora del tratamiento de sus aguas residuales. De este modo, el presente estudio pone valor económico, social y ambiental a los escenarios que se están planteando los países para contribuir al cumplimiento del Acuerdo de París.

II. De residuo a recursos: oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales municipales

La economía circular es una forma de concebir los procesos productivos como un sistema compatible con los recursos disponibles. Así, para asegurar la sostenibilidad de dicho sistema se pretende aprovechar al máximo los recursos y disminuir los desechos con base en la reutilización, la reparación y el reciclaje. La circularidad permite gestionar más eficazmente los recursos y disminuir la dependencia de la economía del uso de recursos finitos, e incluso mejora la productividad y brinda resiliencia a largo plazo.

Los procesos de economía circular pueden implementarse en los sistemas de aguas residuales municipales, dado que es factible reusar las aguas residuales tratadas para que vuelvan a formar parte del ciclo. Asimismo, en lugar de emplear energía proveniente de fuentes convencionales en su tratamiento, es posible implementar sistemas para la emisión y captación de biogás, y cogeneración de energía calórica y eléctrica, teniendo como efecto directo la limitación del uso de combustibles fósiles, al recuperar energía del proceso. Esto se alinea con uno de los principales llamados de la COP26, la "reducción del uso de carbón como fuente de energía y subsidios a los combustibles fósiles". Finalmente, a partir de la recuperación de nutrientes de estas aguas residuales se puede limitar tanto la emisión de gases de efecto invernadero como de desechos, y en su lugar generar beneficios a partir de su venta.

En los siguientes apartados se repasa el concepto de economía circular, su vínculo con los objetivos de desarrollo sostenible y su relevancia en materia de aguas (apartado A). Luego se revisa en detalle el potencial tecnológico para la implementación de esquemas de circularidad en el tratamiento de aguas residuales (apartado B), destacando las posibilidades que brinda i) el reúso de las aguas servidas, ii) el aprovechamiento del biogás para la generación de energía, entre otras opciones y iii) la extracción de nutrientes; identificando para cada una de estas categorías las principales ventajas y desafíos para su adopción. Finalmente, se evidencian los beneficios que representa adoptar estas

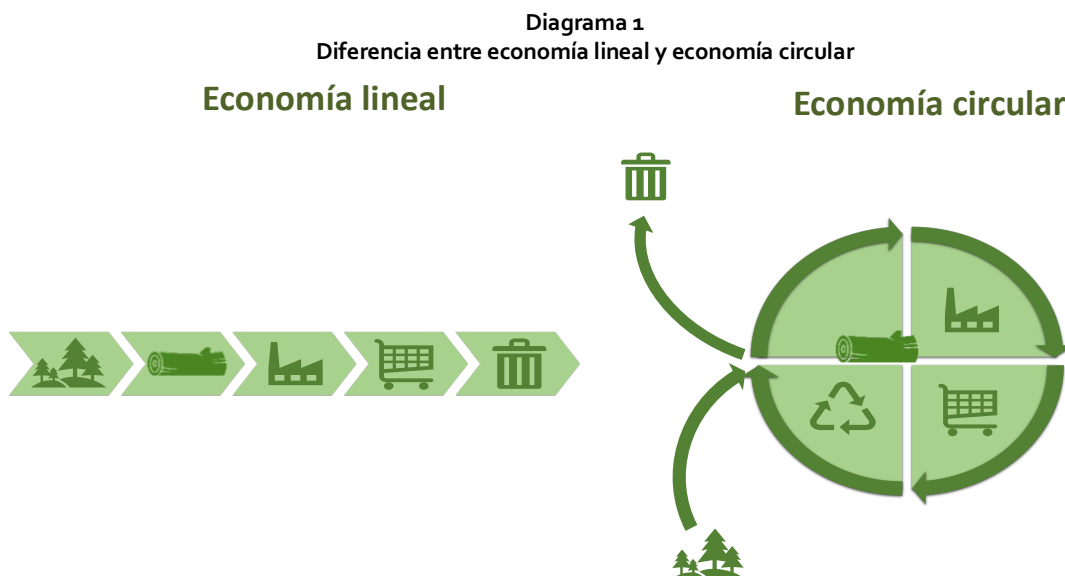
técnicas de economía circular en el tratamiento de aguas residuales municipales (apartado C), tanto en los ámbitos económico y social como en ambiental, para los países de América Latina y el Caribe.

A. Alcance de la Economía Circular

La economía circular se define como un nuevo paradigma que propone desacoplar el crecimiento económico de la explotación de recursos naturales finitos y del uso de energía, basado en la regeneración de los recursos y en el incremento de la eficiencia en su uso (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Mulder y Albaladejo, 2020).

La economía circular se contrapone al concepto de economía lineal, que define la corriente de producción tradicional como un proceso de "extraer-producir-desechar", de forma lineal, como su nombre lo indica (véase el diagrama 1). La economía lineal es el resultado de prácticas productivas, comerciales y de consumo que suponen un suministro constante de productos provenientes de los recursos naturales, lo que pone en peligro la provisión y sostenibilidad de servicios ecosistémicos esenciales. Aquí, la recolección de materias primas conduce a un alto consumo de energía y agua, a la emisión de sustancias tóxicas y a la alteración del capital natural. En términos de volumen, se estima que cerca de 82 mil millones de toneladas de materias primas ingresaron al sistema económico en 2020, y se espera que esta cifra continúe creciendo en el futuro (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Pese a que hay intentos de mejora, la economía lineal en sí misma es insostenible.

Con la economía circular se busca, entonces, minimizar el impacto en toda la cadena de valor del servicio o producción, de forma que sea sostenible ambiental, social y económicamente. Son sistemas de producción y consumo que promueven el uso eficiente de materiales, agua y energía (Quirós, 2021). Asimismo, tienen en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas y el uso circular de los flujos de materiales (Ibid.).



Fuente: EcoGreen Mundo (2015).

Los principios del sistema de economía circular son seis y se conocen como las 6R² (Quirós, 2021) porque incluyen:

- **Repensar y reducir:** referido a utilizar los recursos de manera más eficiente;
- **Rediseñar:** considerando opciones de reutilización, reparación y reciclaje antes de la producción;
- **Reutilizar:** fomentando el reuso de productos a lo largo de la cadena de producción;
- **Reparar y remanufacturar:** considerando opciones de mantenimiento y revisión de productos;
- **Reciclar:** procesamiento y reutilización de materiales a partir de los desechos; y
- **Recuperar:** enfocado principalmente en la obtención de energía a partir de los materiales.

Asimismo, se evita la eliminación e incineración de desechos antes de lograr su máximo aprovechamiento posible. Ello implica un nuevo enfoque en el diseño de productos que considere su durabilidad y refabricación, así como reutilizar productos y componentes, reciclar materiales e implementar sistemas de cultivo de tierra regenerativos.

Con la circularidad la economía realiza una gestión de recursos más eficaz que redundante en múltiples beneficios, entre los que cabe destacar la desvinculación gradual y sistémica de la actividad económica del consumo de recursos finitos y la mejora en productividad, lo cual brinda resiliencia a largo plazo a las ciudades y los países.

En cuanto a sus beneficios específicos, la economía circular conlleva mejoras ambientales al proponer la eliminación de los sistemas de producción que consumen mucha energía o agua, así como un cambio hacia el uso de materiales menos tóxicos (Ellen MacArthur Foundation, 2013; UNEP, 2012). Ambos factores se reflejarán en una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, en el uso correcto del agua y en la protección de la biodiversidad. Asimismo, este nuevo enfoque económico genera beneficios sociales como la creación de empleo y la disminución de los costos de alimentos y servicios, reduce las externalidades sociales y promueve la innovación (Ellen MacArthur Foundation, 2015; Gower y Schröder, 2016; Schröder y otros, 2019).

La adopción de los principios de economía circular se percibe como una vía para reducir la exposición a los choques en los precios de los recursos y mitigar la necesidad de absorber los costos de disposición de desechos (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Para la Unión Europea se estima que el cambio hacia una economía circular podría reducir el gasto neto en recursos en 700.000 millones de dólares anuales y generar un beneficio neto de 2,1 billones de dólares por año (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

Por tales razones, las prácticas de economía circular se consideran de significativa importancia para la transformación del enfoque tradicional de la economía hacia sistemas de consumo y producción sostenibles.

² El número de principios varía a lo largo de la literatura. Inicialmente se establecieron las llamadas 3R de la economía circular: Reducir, Reutilizar y Reciclar (King y otros, 2006; Brennan y otros, 2015; Ghisellini y otros, 2016). La Directiva Marco de Residuos de la Unión Europea introdujo 'Recuperar' como la cuarta R. A partir de entonces los académicos han propuesto ir más allá del marco de 4R, y postulan las 6R aquí expuestas (Sihvonen y Ritola, 2015), las 9R (Van Buren y otros, 2016; Potting y otros, 2017), e incluso las 38R (Srinivas, 2021).

1. Economía circular y desarrollo sostenible

Hay una fuerte relación entre la economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030. Aspectos como el reciclaje de residuos domésticos, de residuos electrónicos y de aguas residuales, el uso de energía renovable y la mayor eficiencia en la utilización de los recursos, son más que suficientes para apoyar varios de estos objetivos.

Las relaciones más sólidas entre las prácticas de la economía circular y las metas de los distintos objetivos de la Agenda se pueden identificar en el ODS 6, de Agua Limpia y Saneamiento; en el ODS 7, de Energía Asequible y No Contaminante; en el ODS 8, de Trabajo Decente y Crecimiento Económico; en el ODS 12, de Producción y Consumo Responsables y en el ODS 15, de Vida de Ecosistemas Terrestres (Schröder y otros, 2019). Particularmente, el reciclaje y la reutilización de aguas contribuye de forma directa a las metas 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 y 14.1; la reducción de residuos, a las metas 12.3 y 12.5; la simbiosis industrial que se crea a partir de la agrupación de las actividades en torno al aprovechamiento de la energía y los residuos desechados por otros, a las metas 3.9, 6.3, 7.3, 8.2, 12.4, 9.4 y 17.7 (Montesinos y Martín, 2020).

Asimismo, se han identificado varias sinergias indirectas que surgirían al adoptar la economía circular. Estas se refieren a los objetivos que promueven el crecimiento económico y el empleo (ODS 8), la eliminación de la pobreza (ODS 1), la erradicación del hambre y la producción sostenible de alimentos (ODS 2), y la protección de la biodiversidad en los océanos (ODS 14) (Schröder y otros, 2019; Velenturf y Purnell, 2021). Estas sinergias, en mayor o menor medida, se encuentran presentes en prácticamente todos los ODS (véase el diagrama 2).

Diagrama 2
Economía circular y Objetivos de Desarrollo Sostenible



Fuente: Velenturf y Purnell (2021).

Nota: Fracción de cada ODS que se habilitaría mediante la economía circular y tendría un impacto fuerte (rojo) o parcial (naranja).

Por consiguiente, las prácticas de la economía circular, además de tender a sistemas sostenibles, se pueden aplicar para lograr un número considerable de metas de los ODS. En tal sentido, este enfoque se plantea como una solución y una herramienta de apoyo para los gobiernos que pretenden alcanzar las metas de desarrollo comprometidas.

2. Economía circular y agua

Considerando que los impactos del cambio climático afectan directamente los recursos hídricos, para enfrentarlos es crucial realizar acciones circulares en el sector del agua. Por ejemplo, ante la escasez hídrica, la acción climática debería incluir la disminución de la demanda de agua, la reducción de sus pérdidas y la reutilización de aguas residuales tratadas, por nombrar solo algunos enfoques. El aumento de la resiliencia climática en el sector del agua va a menudo de la mano con posibles beneficios colaterales relacionados con la mitigación de los gases de efecto invernadero (GEI), el desarrollo sostenible y la protección de los ecosistemas, incluida su biodiversidad (Denton y otros, 2014). Los impactos climáticos relacionados con el agua también afectan otros sectores, como la agricultura (por ejemplo, por su efecto sobre el riego) y la energía (por ejemplo, el agua para refrigeración), lo que exige además considerar el nexo entre agua, energía y alimentación (Kerres y otros, 2020). Todo lo anterior puede lograrse adoptando las prácticas de la economía circular.

La economía circular reconoce que el agua es un recurso finito. Dicho reconocimiento implica de plano, la búsqueda de la disminución del uso de recursos finitos como materia prima, motivo por el cual se evitará utilizar agua siempre que sea posible; es más: bajo este enfoque se pretenderá reutilizar al máximo el agua para superar las externalidades negativas generadas por su escasez o por su mala calidad. En una economía con este enfoque se minimiza el impacto de los sistemas productivos sobre las fuentes naturales, lo cual propicia la restauración de las cuencas y de los ecosistemas.

La economía circular apoya la seguridad hídrica y la resiliencia (Quirós, 2021) porque:

- Mejora la capacidad de almacenamiento del agua y su conservación;
- Incorpora un gran potencial de soluciones basadas en la naturaleza, promoviendo enfoques integrados y flexibles;
- Apoya la exploración del uso de recursos hídricos alternativos, incluida la reutilización de las aguas residuales tratadas.

En cuanto a aguas residuales, los beneficios de la economía circular son aún más evidentes. La recuperación de recursos de las instalaciones de aguas residuales se da en la forma de agua reutilizable, energía, biosólidos y nutrientes. Estos representan un beneficio económico y financiero que contribuye a la sostenibilidad de los sistemas de suministro de agua y saneamiento, así como de las empresas que los operan (Rodríguez y otros, 2020). De tal manera, al aplicar los principios de la economía circular en la gestión de aguas residuales, la recuperación y reutilización de recursos transforma el saneamiento, que pasa de ser un servicio costoso a uno autosostenible y que agrega valor a la economía (Ibid.).

A continuación, se revisan las distintas técnicas y oportunidades para recuperar recursos a partir del tratamiento de aguas residuales municipales, incluido el reúso de las mismas aguas, el aprovechamiento de esos desechos en forma de energía y la extracción de nutrientes.

B. Potencial tecnológico de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales

Al adoptar el enfoque de la economía circular en el saneamiento de aguas se logra, por una parte, redefinir el agua residual, que deja de ser un desecho para considerarse un recurso reutilizable. Con ello, además de disminuir el desecho de aguas residuales en las ciudades, se generan nuevas fuentes de agua, lo que aumenta su oferta. Por otra parte, al aprovechar los desechos para la generación energética —en forma de calor, gas y electricidad—, se remplazan otras fuentes de energía, se mejora el resultado y la sostenibilidad económica del tratamiento de las aguas residuales y se disminuyen las emisiones de metano, una fuente importante de gases de efecto invernadero, en línea con los postulados de la COP26.

El suministro, el transporte y el tratamiento del agua son procesos intensivos en energía, que contribuyen a las emisiones de carbono cuando son alimentados por combustibles fósiles. El uso de energía en las actividades relacionadas con el agua y las aguas residuales representa aproximadamente el 4% del consumo internacional de electricidad y podría duplicarse para 2040 (Kerres y otros, 2020). Asimismo, el tratamiento de aguas residuales puede generar emisiones de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), con un potencial de calentamiento global entre 80 y 300 veces más fuerte que el CO₂, respectivamente (EPA, 2021; Kerres y otros, 2020). Por consiguiente, en lugar de generar desechos en forma de aguas sucias, derivados energéticos y emisiones de gases, es posible recuperar estas aguas, producir energía y obtener nutrientes.

Se estima que más del 80% de las aguas residuales globales no reciben ningún tipo de tratamiento (Kerres y otros, 2020), debido principalmente a que las necesidades de inversión en el sector de abastecimiento de agua y saneamiento son muy grandes y se encuentran en la mayoría de los casos muy rezagadas. Dado que las ciudades continúan creciendo, es imperativo garantizar que las inversiones en el sector se realicen de la manera más sostenible y eficiente, incorporando para ello tecnologías de economía circular como parte de los sistemas de gestión de sus desechos. En este contexto, las aguas residuales son y deben considerarse un recurso valioso del que se puede extraer energía y nutrientes, además de que se constituyen en una fuente adicional de agua (Rodríguez y otros, 2020).

Los procesos de economía circular pueden estar presentes en distintas etapas y dinámicas de los sistemas de aguas residuales. Como se mencionaba, pueden fomentar el reúso de las aguas residuales, la obtención de energía en forma de calor, de biogás o de electricidad, y la recuperación de nutrientes. El detalle de cada uno de estos procesos se explica a continuación, y se resaltan los beneficios y oportunidades derivados de adoptar estas técnicas de economía circular en el tratamiento de aguas residuales municipales.

1. Reúso de las aguas

El agua residual municipal está compuesta en un 99,8% por agua (López y otros, 2017). Una vez tratadas, estas aguas pueden ser utilizadas con distintos fines, los más comunes son el riego, para uso en procesos industriales y en reposición de aguas subterráneas. En cuanto a su uso con fines domésticos, y en especial para la descarga de inodoros, ya se cuenta con varias tecnologías y sistemas que lo permiten (Ibid).

En materia urbana, la principal reutilización de las aguas residuales tratadas es el riego residencial. Dado que en estos procesos la exposición humana es alta, se debe tener especial cuidado para evitar posibles problemas de salud. Por lo anterior, los países están elaborando e implementando cuerpos normativos específicos al respecto (Mo y Zhang, 2013). Siguiendo estos protocolos, las aguas pueden ser utilizadas para el riego de jardines, la descarga de inodoros, el lavado de vehículos, e incluso para su consumo directo. Se estima que en Estados Unidos se reutilizan alrededor de 64.000 millones de litros diarios de aguas residuales, y esta tasa aumenta 15% cada año (Mo y Zhang, 2013).

La reutilización del agua de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) tiene el potencial de brindar múltiples ventajas. Al instaurar estos sistemas es posible disminuir la incertidumbre que genera el cambio climático en el suministro y aumentar la oferta de agua disponible. Lo anterior se traduce en los consiguientes ahorros energéticos, al disminuir los requerimientos de energía utilizados en la obtención y distribución del agua. Además, la cantidad de agua que se puede reutilizar es proporcional a la demanda inicial o primaria, y el sistema es sostenible en el tiempo. Finalmente, reduce la necesidad de explorar fuentes de agua que consuman más energía, como la desalación.

El principal limitante para la adopción generalizada de sistemas de reúso de las aguas residuales es el costo asociado a la inversión inicial en la infraestructura de tratamiento, y la variabilidad de la

calidad del efluente. Además, las preocupaciones por la salud y la seguridad ambiental siguen siendo factores de peso para una aplicación más amplia de esta práctica.

Cuando el agua tiene fines domésticos, puede reutilizarse en el sistema o red de agua potable directamente (Leverenz y otros, 2011). Entre los aspectos positivos que tal decisión conlleva, se indica que puede mejorar la confiabilidad general del suministro de agua, por lo que no se requiere de un sistema dual —conectado también a la red—, ni de sistemas de inyección o esparcimiento del agua, como sí lo precisan los sistemas indirectos (Ibid.). Sin embargo, el tratamiento del agua para su reutilización potable exige altos requisitos, los que pueden incrementar el costo operativo, además de que persiste la gran barrera de su baja aceptación pública (Mo y Zhang, 2013).

La recarga de napas subterráneas como parte del reuso de estas aguas sería la última de sus aplicaciones, y genera múltiples beneficios. Gracias a ella, es posible aliviar el hundimiento de la tierra, apaciguar la intrusión de agua de mar en las áreas costeras, proporcionar almacenamiento natural sin necesidad de recurrir a obras de infraestructura, con las pérdidas por evaporación que conllevan, además de funcionar como un filtro natural en donde las aguas reciben un tratamiento adicional que facilita su posterior recuperación y reutilización (Mo y Zhang, 2013). Representa, sin embargo, ciertos desafíos, entre los que se incluyen requerimientos de monitoreo de la calidad del agua y de la operación de las instalaciones. Además, la recarga de aguas residuales poco tratadas puede aumentar el peligro de contaminación del acuífero. Finalmente, no toda el agua recargada puede recuperarse, debido a los movimientos del agua subterránea más allá del lugar de extracción o a la potencial contaminación que ocurra con agua subterránea de mala calidad.

2. Generación de energía

Otro de los componentes de las aguas residuales que puede ser recuperado o regenerado es la energía. Aprovechando los residuos de las PTAR es posible obtener energía en diferentes formas: como calor, como biogás o como electricidad. A continuación, se revisa cada una de estas tecnologías, sus beneficios y sus desafíos para lograr su aplicación extendida.

a) Generación de calor (y frío)

La extracción de energía calorífica de las aguas residuales de las PTAR suele realizarse mediante una bomba de calor, un equipo mecánico que transfiere aguas de un lugar a otro. Así, se aprovecha la temperatura del agua para calentar o enfriar un ambiente (GIZ, 2020). El sistema recupera el calor/frío de las aguas residuales haciéndolas pasar por tuberías, y emplea ese calor en calentar/refrigerar el mismo proceso de tratamiento o también instalaciones industriales, departamentos o casas particulares en la vecindad de la planta de tratamiento de aguas residuales. Las bombas de calor son una tecnología eficiente para el autoconsumo energético renovable, que cumple con los principios de la economía circular.

Estos sistemas tienen especial potencial de uso en el sector doméstico, para lo cual se encuentran ampliamente disponibles y cuentan con diversos diseños. Aprovechan la temperatura de las aguas residuales que se mantiene constante a lo largo del año en torno a los 20 grados (Pistonesi y otros, 2010). Estas tecnologías permiten su implementación tanto en edificios residenciales que requieren de 5 kW a 30 kW, como en grandes edificios y esquemas de calefacción urbana de 100 kW a 1.000 kW o más (GIZ, 2020), y la perspectiva de su demanda es enorme si se considera que las proyecciones de demanda de energía en refrigeración de espacios estiman un crecimiento de más del doble para 2030 (IEA, 2016). Como se ve, estos equipos son altamente versátiles en cuanto a su aplicación en el sector municipal en el presente, pero lo serán aún más en el futuro.

Uno de los principales beneficios de las bombas de calor a partir de las PTAR es que son equipos altamente eficientes en términos energéticos: entregan entre 2 y 4 unidades de energía térmica por cada unidad de energía eléctrica consumida (GIZ, 2020). De hecho, la Agencia Internacional de Energía

considera que es esta la mejor tecnología de climatización disponible, y estima que la reducción de emisiones de CO₂ de la bomba de calor es de un 6%, con potencial de llegar a un 16% en el futuro (IEA, 2016). Además de ello, son aparatos duraderos que requieren poco mantenimiento. En cuanto al ahorro energético para abastecer de agua caliente y calefacción un bloque de edificios domiciliario, se estima un beneficio de USD \$990 anuales en comparación con el uso de una caldera de gas (Arnabat, 2017). Como se ve, sus ventajas son múltiples y representan ahorros económicos significativos.

En cuanto a las desventajas, la principal es que la inversión inicial para su implementación sigue siendo más elevada que la de los equipos convencionales de climatización. Sin embargo, esto se compensa con costos de operación considerablemente menores. De otra parte, las bombas suelen emitir un nivel de ruido que en algunos casos puede ser molesto³. Además, en zonas climáticas muy frías o muy calientes las bombas pueden presentar reducciones considerables en su rendimiento, debido a que la temperatura de las aguas residuales se pierde antes de entrar al sistema (GIZ, 2020). Asimismo, los lugares que se quiere climatizar deben encontrarse aislados térmicamente, pues de lo contrario los sistemas consumirán más energía de lo esperado (Ibid.). En tal sentido, además de la inversión inicial del equipo se debe considerar la habilitación de los espacios y del sistema completo.

b) Aprovechamiento del metano y cogeneración de energía eléctrica

Es posible aprovechar los desechos de las PTAR para generar energía en forma de gas. Esto ocurre al llevar a cabo la digestión anaeróbica (sin oxígeno) del agua residual municipal, en lugar de utilizar un tratamiento aeróbico. También se pueden utilizar los gases generados en la digestión de los lodos tanto en plantas de tratamiento anaeróbicas como aeróbicas. El proceso anaeróbico de las aguas residuales y de los lodos genera como subproducto gas metano (CH₄). Este gas puede ser utilizado *in situ* para distintos procesos dentro de la planta de tratamiento, como calentar el digestor de lodos y elevar la eficiencia misma del proceso de digestión anaeróbica, así como para secar y reducir el volumen de los lodos antes de su disposición final (López y otros, 2017). Así mismo, este biogás, previa su limpieza de impurezas, puede luego ser utilizado directamente como combustible para fines vehiculares, industriales o residenciales.

La producción total de metano por unidad de tiempo (m³/día o similar) en una PTAR municipal depende principalmente de la tecnología de tratamiento, además de la concentración y composición de la materia orgánica presente en el agua residual, las cuales varían de acuerdo con la disponibilidad de agua potable, el nivel socioeconómico de la población, las infiltraciones de agua de lluvia en la red de alcantarillado, el tipo de instalación sanitaria y las actividades desarrolladas en la zona donde se recolectó el agua residual (Von Sperling, 2005). Asimismo, influyen en ello la temperatura del proceso y las características y eficiencia de la tecnología (López y otros, 2017).

La obtención de energía en forma de biogás tiene una serie de impactos positivos. El principal es la reducción de los requerimientos energéticos a nivel local. Por ejemplo, una PTAR anaeróbica que recibe 100 kg de DQO (Demanda Química de Oxígeno) a lo largo del año puede llegar a obtener una producción cercana a los 285 KW/h con un sistema de aprovechamiento de metano⁴. Asimismo, estos procesos disminuyen significativamente los desechos en la forma de lodos. Mientras que en los procesos aeróbicos comunes se generan entre 30-60 kg de lodos por cada 100 kg de material susceptible a oxidar, al implementar procesos anaeróbicos estos desechos podrían disminuir de manera significativa, llegando a los 5 kg de lodos (Hernández, 2021). Esto significa que estas tecnologías están especialmente

³ Hay equipos que utilizan suelo radiante o radiadores que generan niveles de ruido prácticamente imperceptibles; no así los que cuentan con ventiladores (GIZ, 2020).

⁴ Este dato es solamente un ejemplo referencial, ya que la eficiencia y la producción dependen del tamaño/capacidad de la planta, su ubicación geográfica y otras características ya mencionadas.

alineadas con los conceptos de economía circular, pues reducen y reconvierten los residuos de un proceso productivo y los transforman en recursos disponibles para otros procesos.

Asimismo, es posible recuperar la energía proveniente de los lodos resultantes del tratamiento aerobio de las aguas residuales mediante la digestión anaerobia de los mismos, por cuanto permite la emisión, captación y el posterior aprovechamiento del metano en la generación o cogeneración de energía. Esta técnica ha probado que disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en las plantas de tratamiento en un 21%, y que es posible aportar hasta el 14% de la energía requerida por la planta, además de los beneficios ambientales que ello comporta (Aguilar y Blanco, 2018).

El principal desafío para su implementación a escala masiva son los altos costos iniciales, en comparación con los procedimientos aeróbicos actualmente utilizados. Adoptar esta tecnología de manera industrial requiere además de la compra del reactor o de los digestores anaeróbicos, habilitar el sistema para el procesamiento del gas. Estos equipos incluyen gasómetros, compresores, desulfadores y generadores a motor⁵, entre otros (Linares, 2020). En resumen, pese a que este sistema representa innegables beneficios energéticos y la posibilidad de obtener beneficios, exige una alta inversión inicial si se realiza sin contar con una infraestructura previa o mínima desde el inicio.

Finalmente, los sistemas combinados de calor y energía utilizan el metano de las aguas residuales y de los lodos para obtener calor y electricidad. El biogás es el combustible que mueve una turbina y genera aproximadamente 1.300 kW/h de energía eléctrica por millón de litros de aguas residuales tratadas (Burton, 1996 en Mo y Zhang, 2013). Un estudio a este respecto indica que si todas las PTAR de Texas utilizaran estos sistemas, se podría lograr una reducción del 26% del uso de electricidad en todo el estado (Stillwell y otros, 2010). La electricidad así producida es confiable y consistente, pero la instalación requiere costos de capital relativamente altos, unos USD \$4.500 /kW (Mo y Zhang, 2013). Por otra parte, estos sistemas requieren de altos volúmenes de gas, por lo cual son viables únicamente para PTAR con un caudal superior a 231 l/s, o sea, 20 millones de litros diarios (Ibid.), lo que genera una población cercana a los 135.000 habitantes⁶; aunque estudios más recientes que emplean información de países de la región, se refieren a la existencia de una viabilidad financiera de estos esquemas de aprovechamiento de metano, en plantas que atienden poblaciones superiores a 300.000 habitantes (Silva y otros, 2016; Nolasco, 2010). Finalmente, se requiere contar con la capacidad técnica y profesional para operar estos sistemas. Por tanto, pese a que estos sistemas son altamente eficientes, tienen como limitantes los altos costos de inversión inicial, los mencionados altos volúmenes de aguas tratadas y el requerimiento de profesionales capacitados.

c) Otras formas de generación de energía eléctrica

El tratamiento anaerobio de las aguas residuales, y la digestión anaerobia de los lodos puede arrojar como subproducto la generación de energía eléctrica y calórica, para lo cual existen distintos procesos, el más común de ellos utilizando el mismo biogás en la forma de metano. Otros métodos incluyen sistemas bioelectroquímicos, microalgas, hidroelectricidad y el proceso de incineración. A continuación, se resume cada uno de ellos y se evalúa su potencial para adoptarlos en una economía circular.

Sistemas bioelectroquímicos: los sistemas bioelectroquímicos utilizan catalizadores biológicos para producir reacciones químicas a partir de enzimas o microorganismos contenidos en las aguas residuales. Estos pueden almacenar la energía en celdas de combustible microbiana o de electrólisis microbiana. En el primer caso la energía enzimática o microbiana se convierte directamente en electricidad (McCarty y otros, 2011; Mo y Zhang, 2013). La energía así obtenida varía entre 10-100 MW/m² (Liu y otros, 2004). Estos sistemas, además de producir energía de forma más eficiente, incluso más que en el caso del enfoque anaeróbico, reducen el exceso de lodos en alrededor de un 20%

⁵ El uso de motores es 1,5 veces más eficiente que el de turbinas (Felca y otros, 2018).

⁶ Para una descarga media de 150 l/h/d.

en comparación con el tratamiento convencional (Foley, 2010; McCarty y otros, 2011). Sus desventajas más notorias son la pérdida de energía durante el proceso de generación de electricidad, bajas tasas de utilización orgánica y costos de capital 800 veces mayores que un sistema anaeróbico (Liu y otros, 2004; McCarty y otros, 2011). En cuanto a los tratamientos de electrólisis microbiana, en ellos se recupera energía en la forma de bioquímicos, especialmente hidrógeno y metano. Es un sistema más reciente y cuenta con menos estudios que corroboren su eficiencia (Mo y Zhang, 2013).

Microalgas: la tecnología de microalgas recupera energía mediante el cultivo de estas pequeñas algas en el agua residual y su posterior conversión en productos energéticos. Esta técnica tiene un potencial de generación de energía de 2.600 kWh por tonelada de algas secas (Aresta y otros, 2005). Durante el cultivo, las microalgas absorben carbono y nutrientes de las aguas residuales, lo cual reduce la carga de desechos para su tratamiento. De otra parte, las microalgas utilizan el dióxido de carbono más rápido que los cultivos biológicos convencionales, lo que se traduce en una emisión negativa de gases de efecto invernadero de 51 kg CO₂ equivalentes por cada kWh generado, con la consiguiente reducción y mitigación de las emisiones de dióxido de carbono (Groom y otros, 2008; Kumar y otros, 2010). Entre los desafíos para su mayor integración están los costos de cultivar las algas; los altos niveles de energía requeridos para la recolección, deshidratación y extracción de lípidos; y la identificación de las especies de microalgas con rendimientos óptimos (Kumar y otros, 2010; Mo y Zhang, 2013).

Energía hidroeléctrica efluente: la energía hidroeléctrica efluente utiliza turbinas u otros dispositivos instalados en tuberías, canales y ductos para generar electricidad a partir de aguas en movimiento. En el caso de las PTAR, estas tecnologías aprovechan los sistemas de conducción y el efluente de las aguas residuales mismas. Además de generar energía, los sistemas hidroeléctricos de este tipo pueden aumentar la concentración de oxígeno disuelto en las aguas residuales tratadas, favoreciendo con ello los procesos de tratamiento aeróbicos (Gaius-Obaseki, 2010). Su principal limitación es que requieren que el efluente tenga suficiente energía cinética o movimiento, lo que demanda una altura o caudal significativos (Ibid.).

Incineración para obtención de energía eléctrica: una forma de obtener este tipo de energía es la incineración, asociada a una planta de combustión que limite los desechos atmosféricos. El proceso consiste en transportar los lodos a un horno para que sirvan como combustible para generar energía eléctrica, lo cual al mismo tiempo reduce los desechos al mínimo (Mo y Zhang, 2013). Estos lodos se someten a un tratamiento de secado previo, ya que necesitan estar deshidratados para que sea más sencillo su almacenamiento y uso como combustible (Linares, 2020; Mo y Zhang, 2013). Una gran ventaja de esta técnica, que demanda poca inversión inicial, es que además de recuperar energía en lugar de utilizarla, permite extraer minerales de las cenizas: aproximadamente el 90% de fosfatos y otros metales (Hao y otros, 2020). Se calcula que al incinerar los biosólidos en todas las plantas de tratamiento de aguas residuales en Texas se reduciría alrededor del 57% del consumo eléctrico del sector de aguas residuales de todo el estado (Stillwell y otros, 2010). Sin embargo, este procedimiento tiene un impacto negativo relevante pues aparece la emisión de compuestos orgánicos volátiles, tales como el dióxido de azufre (SO₂) y el dióxido de carbono (CO₂), compuestos derivados del dióxido de nitrógeno (NO₂) y metales pesados (Linares, 2020). Por lo anterior, pese a que constituye una tecnología de reutilización de desechos, estas desventajas ambientales deben ser resueltas para responder a los principios de la economía circular.

3. Extracción de nutrientes

Un proceso que está tomando fuerza recientemente en el propósito de aprovechar las aguas residuales en línea con los principios de la economía circular, consiste en aprovechar los nutrientes que portan. Esto puede ser hecho directa y simplemente vertiendo a los suelos los lodos de las PTAR, o a través de sanitarios no convencionales que permiten la separación de la orina para su aplicación sobre el suelo, o bien con tecnologías de tratamiento de aguas residuales más sofisticadas, que permiten la recuperación

del fosfato que contienen, o a través de la cristalización de estruvita para obtener el valioso fosfato. A continuación, se revisa cada una de estas técnicas y se exponen sus ventajas y desventajas para lograr su uso extendido.

Una primera forma de extraer los nutrientes de las aguas residuales consiste en esparcir los biosólidos en el suelo, previo su tratamiento por digestión, tratamiento alcalino, compostaje o secado. Su uso en tal forma es principalmente como fertilizante, lo cual reduce la dependencia de fertilizantes fósiles, aunque también pueden ser utilizados para el acondicionamiento del suelo y la cobertura de vertederos (Mo y Zhang, 2013). El uso de los biosólidos de esta forma representa una vía simple y rápida de obtener nutrientes, pero conlleva algunas inquietudes sociales y ambientales importantes, relacionadas con la salud y el olor que despiden (Ibid.).

Una segunda vía para recuperar nutrientes de las aguas residuales implica separar la orina, lo cual ya se realiza en algunas zonas rurales a baja escala. Este procedimiento disminuye, consecuentemente, la carga residual de las aguas en las PTAR, dado que la orina contiene alrededor del 75% del nitrógeno y 50% del fósforo de las aguas residuales domésticas. Se calcula que se podría recuperar cerca del 70% de estos nutrientes mediante inodoros recolectores (Mo y Zhang, 2013). La separación de la orina es altamente eficiente desde el punto de vista energético en comparación con otras tecnologías de reciclaje de nutrientes, además de que ofrece la posibilidad de recuperar los costos a través de su venta directa (Benetto y otros, 2009; Flores y otros, 2009; Larsen y otros, 2009). Dado que la separación suele ocurrir en el hábitat doméstico, estos sistemas se instalan en los hogares, lo que requiere el apoyo y participación de las comunidades locales, además de implicar el desafío de evitar la contaminación cruzada con heces (Mo y Zhang, 2013; Verstraete y otros, 2009). La recuperación de nitrógeno y fósforo a partir de la orina se reflejaría, entonces, en la merma de la labor y de los recursos de las PTAR, pero requiere de una coordinación y un sistema comunitario local sólidos.

Una tercera vía para recuperar nutrientes de las aguas residuales es la cristalización controlada de estruvita, que permite reciclar nutrientes de los licores del digestor de lodos. Esta técnica muestra altas tasas de recuperación de nutrientes, especialmente fosfato (Mo y Zhang, 2013), pues su concentración en los líquidos de digestión de lodos suele ser bastante alta, al punto que el potencial teórico de cristalización puede ser hasta de 67.000 toneladas de fertilizante por año solo en el Reino Unido (Gaterell y otros, 2011). Ahora bien, debido a que las fuentes de fosfato son acotadas y muchas están localizadas en países en constante conflicto político y social⁷, se ha registrado un aumento de más del 30% en sus precios a partir del año 2011 (y especialmente en 2022 con la guerra en Ucrania), lo que hace que la perspectiva de una recuperación rentable de este nutriente a partir de las aguas residuales sea atractiva económicamente (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Kerres y otros, 2020; Rodríguez y otros, 2020), pues pese a que obtener fosfato de las aguas residuales es entre 2 y 8 veces más costoso que extraerlo de la roca, y a que la inversión en esta tecnología es alta, las tasas de recuperación a través de la venta del material pueden equilibrar tales costos, y a ello se sumarían los beneficios sociales y ambientales de reducirlos en forma de desechos.

C. Beneficios esperados

Con base en las distintas tecnologías presentadas, es evidente que hay que considerar las aguas residuales como un recurso y no como un desperdicio. Vistas así, y al adoptar los principios de la

⁷ Marruecos, Sahara Occidental, China, Egipto, Argelia, Siria, Brasil, Sudáfrica y Arabia Saudí concentran el 91% de las reservas mundiales (U.S. Geological Survey, 2021).

economía circular en lo que respecta al tratamiento de las aguas residuales municipales, es posible percibir múltiples beneficios, los cuales se detallan a continuación, clasificados por su carácter económico, ambiental o social.

1. Beneficios económicos directos

Se pueden listar los siguientes beneficios económicos:

- **Venta de aguas tratadas.** Es posible vender directamente las aguas residuales parcialmente tratadas, a un valor menor que el de las aguas totalmente tratadas. Y si bien los bajos costos del agua dulce hacen difícil que se pueda cobrar un precio adecuado por las aguas recuperadas, hay un ejemplo de práctica exitosa en este sentido llevada a cabo en Honolulu, Hawái (Lazarova y Asano, 2013). Allí se vende agua de dos tipos, según el usuario al que van dirigidas. Un primer tipo se deriva al sector industrial de la isla, que incluye refinerías, fábricas y empresas de energía, todas ubicadas cerca de las instalaciones donde se trata. Estos usuarios reciben el agua tratada y luego procesada por ósmosis inversa, con lo cual se logra un agua de alta pureza y calidad. Un segundo tipo se deriva hacia campos de golf, jardinería y riego, y se vende más barato ya que no es sometida al proceso de ósmosis inversa. Los volúmenes de agua producidos por este sistema y comercializados desde su creación en el 2000 han aumentado continuamente, al punto que en 2012 su volumen fue de 11,5 millones de m³, de los cuales el 17% era agua de alta pureza para fines industriales y un 83% se destinó al riego. Como es de suponer, considerando la creciente escasez de agua y la incertidumbre sobre su disponibilidad, el requerimiento de estas aguas y su valor tienen un potencial creciente.
- **Swaps, o transferencias intersectoriales de agua.** A diferencia de la venta, aquí se lleva a cabo un intercambio comercial de fuentes de abastecimiento de agua, lo cual se traduce en un ahorro o beneficio económico directo. Por ejemplo, es posible pactar acuerdos entre los productores de agua tratada para el riego y los productores de agua dulce para usos domésticos e industriales (Winpenny y otros, 2010). Este modelo puede aplicarse en intercambios de agua entre usuarios con baja demanda de calidad hídrica y usuarios de mayor consumo, con requerimientos específicos, que paguen por ella un mayor valor (WWAP, 2017). Con tal esquema, pese a que estos *swaps* no aumentan la disponibilidad total del recurso, permiten un ahorro en comparación con el costo de acudir a otras fuentes hídricas como el tratamiento y filtrado de aguas superficiales escasas, así como el profundizar pozos, con todo el gasto energético que entraña el uso de fuentes subterráneas.
- **Venta de biogás.** Es posible comercializar biocombustibles obtenidos a partir de las microalgas y de los procesos bioquímicos, o bien en forma de biogás. Estos biocombustibles pueden ser utilizados para el transporte, el desarrollo de bioplásticos y bioquímicos, como complementos nutricionales para humanos y animales, y como antioxidantes e ingredientes cosméticos (WWAP, 2017). En cuanto al metano, en la planta de tratamiento de aguas residuales de La Farfana en Santiago, Chile, se han generado beneficios de USD \$1 millón anuales por su venta directa (Rodríguez y otros, 2020). La planta trata anualmente entre 222 y 289 millones de metros cúbicos de aguas residuales y produce un promedio de 25 millones de metros cúbicos de biogás (World Bank, 2020b). Únicamente a través de su venta, se estima que en menos de tres años lograrán recuperar la inversión realizada de USD \$2,7 millones para modernizar la planta e incorporar esta tecnología (Rodríguez y otros, 2020). A lo anterior se suma la reducción de emisiones de GEI. Aquí se calcula que el sistema reduce en 19.788 toneladas la emisión de CO₂ equivalente al año, una fuente potencial de ingresos adicionales si se considera la venta de bonos de carbono (World Bank, 2020b). Asimismo, la compañía de gas con la cual se suscribieron los contratos de compraventa ahorró un estimado de USD \$1,6 millones al comprar este biogás en lugar de sus fuentes convencionales (Ibid.).

- **Venta de fertilizantes y ahorro en desechos.** La comercialización de subproductos es la vía que por lo común utilizan las PTAR para recuperar sus costos, y ello incluye fertilizantes como el fósforo, el nitrógeno y los biosólidos. La empresa de agua de Nuevo Cairo, Egipto, vende los lodos a la industria del cemento y a la agricultura, con lo cual obtiene un flujo de ingresos adicional (World Bank, 2020a). Por su parte, la planta de La Farfana, en Chile, con una producción de 800 ton/día de lodos, entrega estos biosólidos a los agricultores de forma gratuita, con lo cual se ahorra los costos por el depósito de biosólidos en vertederos, que asciende a USD \$40/ton, lo que sumaría anualmente USD \$11,6 millones (World Bank, 2020b).
- **Venta de fosfato.** La extracción y venta del fosfato tiene un creciente potencial económico, debido a que de los próximos cincuenta a cien años las fuentes minerales de donde se extrae el mineral serán escasas o se habrán agotado (Van Vuuren y otros, 2010). La empresa Ostara Company de Canadá recupera el fosfato como gránulos, llamados *crystal green*, y los ingresos obtenidos por la venta de este fertilizante son compartidos con la ciudad para compensar los costos de las instalaciones.
- **Reducción de costos.** Primeramente, y como ya se ha mencionado, el impulsar la economía circular en las PTAR se traduce en una reducción de costos debido a la disminución de desechos y la consecuente minimización de los costos de su disposición. Asimismo, los tratamientos anaeróbicos, además de utilizar menos energía, la generan, permitiendo también el consecuente ahorro energético. Finalmente, merman los costos vinculados al uso de aguas de fuentes naturales. En un sistema sanitario rural de San Pedro de Potosí, en México, se estimó una reducción de un 33% de los costos por reutilización de las aguas, lo que representó un ahorro de USD \$3 millones anuales en energía y ayudó a cubrir los costos de operación y mantenimiento de la empresa de agua (Rodríguez y otros, 2020).
- **PIB y comercio.** El agua contaminada puede afectar directamente a las actividades económicas que utilizan el agua, como la producción industrial, la pesca, la acuicultura y el turismo (PNUMA, 2016). Además, puede limitar indirectamente la exportación de ciertas mercancías debido a las restricciones, e incluso a la prohibición, de comercializar productos contaminados (WWAP, 2017). Se calcula que por cada USD \$1 gastado en saneamiento el retorno es de USD \$5,5 (Hutton y Haller, 2004, en WAAP, 2017). En tal sentido, además de motivar el comercio, la inversión en sistemas de tratamiento de aguas que se basen en los principios de la economía circular puede generar beneficios en el PIB y el desarrollo de los países.

2. Ambientales

Además de los beneficios económicos mencionados, el impulsar una economía circular en el tratamiento de aguas residuales conlleva beneficios ambientales. Entre los más significativos se encuentran:

- **Mitigación del cambio climático.** Cuando se desechan las aguas residuales en cuerpos de agua superficiales aumenta la cantidad de nutrientes y materia orgánica en su caudal, lo cual propicia aún más la emisión de GEI (Kerres y otros, 2020). La aplicación de la economía circular en su tratamiento disminuye estas emisiones. En igual sentido, al remplazar el uso de gas licuado por el metano y reducir el uso de leña como combustible es posible disminuir sustancialmente estas emisiones (Cornejo y Wilkie, 2010). En suma, la ampliación de la capacidad de tratamiento del agua con el enfoque de la economía circular se traduce en un efecto positivo en las emisiones de GEI, en especial del metano, porque se reducen las aportaciones de materia orgánica y nutrientes a los cuerpos de agua superficiales y de GEI a la atmósfera. Ello representa una eficaz contribución a los esfuerzos nacionales de mitigación del cambio climático.

- **Protección de la calidad del agua.** El vertido de aguas residuales no tratadas en el medio ambiente tiene un impacto negativo en la calidad del agua. Esto, a su vez, afecta la cantidad de recursos hídricos de calidad disponibles para uso directo.
- **Salvaguarda de los ecosistemas acuáticos.** Al tratar las aguas residuales con base en el paradigma de la economía circular, se minimizan los desechos emitidos a los cuerpos de agua. La eutrofización⁸, impulsada por el exceso de nitrógeno y fósforo, puede provocar floraciones de algas potencialmente tóxicas, así como la disminución de la biodiversidad (WWAP, 2017). Al reducir el desecho de estos nutrientes a fuentes naturales y en su lugar reinsertarlo en los procesos agrícolas, se reduce el riesgo de que afloren estas formaciones de algas. En cuanto a los vertidos en mares y océanos, se estima que ya se han afectado 245.000 km² de ecosistemas marinos, con repercusiones en la industria pesquera, en los medios de vida y en las cadenas alimenticias (Ibid.). Al extraer estos nutrientes de las aguas tratadas se minimizan los efectos inmediatos de esta contaminación y el consecuente deterioro de los ecosistemas acuáticos.
- **Incremento de la sostenibilidad energética.** Al incrementar el uso de metano de las aguas residuales, y dado que su disponibilidad es proporcional al crecimiento poblacional, se refuerza la sostenibilidad del sistema. Asimismo, se diversifica la matriz energética y disminuye la participación de energías ambientalmente dañinas, como la derivada del carbón y la leña.

3. Sociales

Los efectos favorables de adoptar un enfoque de economía circular en el tratamiento de aguas servidas se reflejan relevantemente en la sociedad. Entre los principales beneficios de este tipo destacan:

- **Mejoras en la salud pública.** La gestión eficiente de los residuos humanos aporta indudables beneficios a la sociedad, en especial en materia de salud pública. Al disminuir los desechos emitidos a los cuerpos de agua disminuyen consecuentemente las enfermedades transmitidas por el suministro de agua dulce contaminada (WWAP, 2017), como el cólera, diversas diarreas, la disentería, la hepatitis A, la fiebre tifoidea y la poliomielitis. De hecho, se estima que unas 842.000 personas mueren cada año de diarrea como consecuencia de la insalubridad del agua (Mills y Cumming, 2016).

En 2014 se estimó que en la región se habían perdido 5,7 millones de años de vida ajustados en función de discapacidad debido a dichas enfermedades, los cuales fueron valorados en 1.800 millones de dólares (DalalSvanström, 2015). Por supuesto, esto repercute a largo plazo en el bienestar de las comunidades y en sus medios de subsistencia.

- **Generación de empleos verdes.** Se produce un efecto inicial benéfico en la generación de empleo cuando se inician las actividades para implementar la economía circular en el tratamiento de las aguas residuales. En países de distintos niveles de desarrollo siempre hay una relación entre la gestión del agua en general y las oportunidades de empleo. En otras palabras, el agua desempeña un papel clave en la generación y el mantenimiento de empleos directos en una amplia gama de sectores, y todos aquellos que surgen por su efecto multiplicador (WWAP, 2017).

⁸ En la región, hay 31 áreas con eutrofización y 19 áreas con hipoxia (llamadas "muertas", porque el déficit de oxígeno ha terminado con la biodiversidad local), con una mayor concentración en el Atlántico que en el Pacífico (CEPAL, 2022).

D. Principales hallazgos

La revisión de literatura propuesta en este capítulo, y las múltiples opciones que se han documentado para la implementación de la circularidad en el tratamiento de las aguas residuales, evidencian el amplio potencial que existe en la materia, y en particular en ALC, si se toma en cuenta la situación actual del tratamiento de las aguas residuales en la región.

De las posibilidades detalladas, aquella que presenta mejores perspectivas para ALC es la generación de energía que toma en cuenta el aprovechamiento del metano. Primeramente, esta tecnología puede resultar menos costosa que los sistemas bioelectroquímicos, así como puede configurar menores desafíos que la generación de energía a partir de microalgas. A su vez, si bien alternativas como la incineración para obtención de energía eléctrica pueden presentar viabilidad económica y técnica, su impacto en la emisión de compuestos orgánicos volátiles configura afectaciones ambientales importantes que se contraponen con los principios de la economía circular. En cuanto a la extracción de nutrientes, los sistemas de separación de orina presentan importantes restricciones que dificultan alcanzar economías de escala. Asimismo, el sistema de cristalización controlada de estruvita implica altos costos que se reflejan en la insostenibilidad financiera de su implementación en la región.

En contraste, existe literatura relevante que ha documentado la viabilidad financiera de implementar sistemas de aprovechamiento de metano y cogeneración de energía en PTAR que atienden poblaciones superiores a 300 mil habitantes, lo que implica un amplio potencial para la implementación de este tipo de tecnologías en ciudades intermedias.

A su vez, la implementación de la circularidad a partir del aprovechamiento de metano presenta importantes beneficios sociales, ambientales y económicos, que se dan, en la medida en que dicho esquema no sea excluyente. Por lo demás, permite el desarrollo de circularidad en otras áreas del tratamiento de las aguas residuales, tales como la utilización de los lodos residuales como fuente de nutrientes para la actividad agrícola (como en el caso de la PTAR la Farfana en Chile, y Nuevo Cairo en Egipto) y la comercialización de aguas residuales tratadas para riego o generación de calor y frío. Asimismo, como componente central, permite la reducción de emisiones GEI a partir de la reducción de las emisiones del metano que se genera en las PTAR, y de la cogeneración de energía que puede ser empleada por las PTAR en los procesos internos. Incluso, a partir de estas tecnologías pueden generarse excedentes que, implícitamente, presentan el beneficio de sustituir energía proveniente de la matriz energética nacional, comúnmente basada en fuentes de energía no renovables, por energías renovables. Este potencial del aprovechamiento del metano motiva entonces la necesidad de identificar las posibilidades para su desarrollo en la región, así como los beneficios que ello proveería, aspectos que se revisan en los siguientes capítulos.

III. Potencial de aprovechamiento del metano para la generación de energía en las PTAR de América Latina y el Caribe

Estimaciones de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2016), indican que 120 millones de toneladas de petróleo equivalente de energía se utilizaron globalmente en el sector del agua potable y saneamiento en 2014, lo cual equivale a toda la energía que demanda Australia. A nivel mundial, la mayor parte de esta energía se utiliza para la extracción de aguas subterráneas y superficiales (40%), seguida del tratamiento de aguas residuales (25%). No obstante, la proporción cambia al examinar los países desarrollados, donde el 42% del consumo eléctrico del sector se utiliza para el tratamiento de aguas residuales, 20% para la distribución de agua a los consumidores y el resto se explica por las transferencias de agua entre cuencas a gran escala, el tratamiento de agua dulce y la reutilización del agua. La distribución de los requerimientos en los países en desarrollo, incluidos los de ALC, es muy diferente puesto que las aguas residuales no reciben el debido tratamiento y actualmente la extracción y distribución del agua en países de medio ingreso, recae principalmente en energía de fuentes fósiles. Si bien se requieren más estudios para analizar la matriz energética del sector y el impacto de las emisiones GEI, es importante considerar la huella de carbono asociada al uso energético, cuyos costos en la región rondan cerca del 40% de los costos operativos, así como el metano emitido en la gestión de las aguas residuales.

En este último punto, cabe resaltar que existe una gran oportunidad para la generación de energía renovable a partir de los lodos residuales del agua tratada. Esta, se estima que podría proporcionar hasta el 87% de la energía necesaria para alimentar las plantas de tratamiento de aguas residuales del mundo (Gasson, 2021).

Para determinar las oportunidades de incorporar un enfoque de economía circular en el tratamiento de las aguas residuales de ALC que permita utilizar el metano para generación de energía (ya sea para autoconsumo y/o venta a terceros), este estudio lleva a cabo la estimación de las emisiones de metano en un grupo de PTAR de la región, junto con los costos de las inversiones asociadas para su transformación tecnológica. Con ello, se podrán evaluar los beneficios económicos y ambientales derivados de esta actividad en particular.

Por tanto, el presente capítulo comienza con la caracterización de las tecnologías y escalas de funcionamiento más frecuentes en la región. Para ello se consolidó una base de datos con información de más de 3.000 PTAR en países selectos (Apartado A). Posteriormente, se seleccionan PTAR cuyas capacidades de tratamiento se encuentran entre 500 l/s y 4.000 l/s, con el fin de analizar el potencial técnico y financiero de la recuperación del metano en ciudades o municipios mayores a 300 mil habitantes y por debajo de los 2,3 millones de habitantes, donde todavía los principios de circularidad no han sido adoptados (apartado B). Seguido a esto, se presenta la metodología, las ecuaciones y los parámetros empleados en la estimación de las emisiones de metano (y el potencial energético) en las PTAR seleccionadas (apartado C). Finalmente, se realizan dos ejercicios que contemplan la estimación de las emisiones de metano en las PTAR seleccionadas en un escenario base (apartado D) y en un escenario que contempla la transformación de las PTAR a partir de una serie de inversiones que se detallan en el capítulo IV (apartado E).

A. Caracterización de PTAR en países selectos de la región

Se seleccionaron cinco países, geográficamente distribuidos entre Centro y Sur América, teniendo en cuenta la disponibilidad de información que permita establecer características de las PTAR como: i) la capacidad instalada, ii) el caudal de aguas residuales tratadas y iii) las tecnologías empleadas para el efecto.

Los países seleccionados fueron México y Costa Rica, de la zona norte y centro de la región y Perú, Colombia y Bolivia, de la zona sur. En ellos se asientan el 35% de los habitantes de la región —equivalente a un total de 229,5 millones de personas—. El cuadro 2, presenta una breve descripción socioeconómica del sector de agua potable y saneamiento de los países seleccionados.

Cuadro 2
Caracterización de los países seleccionados para el análisis

País	PIB 2019	Población	Caracterización del sector
Bolivia (Estado Plurinacional de)	USD \$29,7 billones, y USD \$2.579,9 per cápita (CEPAL, 2019).	11,46 millones de habitantes, de los cuales el 28,7% vive en la ruralidad (Dirven, 2019).	El consumo promedio de agua por habitante en 2017 era de 97 litros al día. El país trata aproximadamente el 61% de las aguas servidas que se vierten al alcantarillado sanitario (Mejía, Uzcátegui, y Valverde, 2017). Sin embargo, no se tiene información sobre la remoción efectiva de la carga contaminante de estas aguas ni sobre el cumplimiento de la norma boliviana sobre descargas de aguas residuales. Es necesario notar que este cubrimiento del tratamiento de aguas residuales se encuentra matizado por una cobertura del 59% del servicio de alcantarillado (Mejía, Uzcátegui, y Valverde, 2017).
Colombia	USD \$394,8 billones, y USD \$7.843 per cápita (CEPAL, 2019).	50,2 millones de personas, con un porcentaje de ruralidad del 19% (Dirven, 2019).	Las actividades registradas como "distribución de agua; evacuación y tratamiento de aguas residuales, gestión de desechos y actividades de saneamiento ambiental" representaron el 0,91% del PIB (DANE, 2020). El consumo promedio de agua por habitante se ubica, según Briseño y Rubiano (2018), en 112,27 litros diarios por persona, y en 2019 el país trató el 48,56% del total de las aguas vertidas por los sistemas de alcantarillado a los cuerpos de agua, equivalente a 31,50 m ³ /s (SSPD, 2020).
Costa Rica	USD \$51,6 billones, y USD \$10.234 per cápita (CEPAL, 2019).	5,05 millones de habitantes, de los cuales el 19,2% habita en la ruralidad (Dirven, 2019)	Según BCCR (2021), el consumo de agua por habitante en 2017 fue de 157 litros al día. Con respecto a la disposición de las aguas residuales, debe notarse que para 2019 el 75% de la población utilizaba tanque séptico; el 7% lo hacía a través del servicio público de alcantarillado, y el restante 18% no contaba con ningún tipo para el efecto (Comité Técnico Interinstitucional Estadísticas del Agua, 2021).
México	USD \$1.308 billones y USD \$10.255 per cápita (CEPAL, 2019).	132,7 millones de habitantes. Concentra un 21,8% de sus habitantes en la ruralidad (Dirven, 2019).	Es el país de la región con el mayor consumo per cápita de agua: 366 litros al día (Fortuño, 2017); y cuenta con un nivel de cobertura de tratamiento de aguas residuales del 65,7%, equivalente a 141,5 m ³ /s, presentando un incremento de 42,7 puntos con respecto a la cobertura con que contaba el país en 2001, lo cual evidencia los importantes esfuerzos realizados por el país en esta materia durante las dos últimas décadas (CONAGUA, 2020).
Perú	USD \$210,9 billones y USD \$6.489 per cápita (CEPAL, 2019).	Población de 33,3 millones de habitantes, con un porcentaje de ruralidad del 19,7% (Dirven, 2019).	En cuanto al consumo doméstico de agua en 2019, según el INEI (2020) en Lima Metropolitana fue de un total de 415.773.000 m ³ , que representa una media de 106,2 litros por habitante al día. El porcentaje de cobertura de tratamiento de aguas residuales domésticas en todo el país es del 72%, determinado por la amplia capacidad de tratamiento existente en Lima y la Provincia Constitucional del Callao, de manera que, si se abstraen dichas regiones, la cobertura de tratamiento de aguas residuales del país se reduce al 48% (Moscoso, 2016).

Fuente: Elaboración propia.

En este grupo de países se han identificado que existen en total 3.336 PTAR, las cuales utilizan una gama de tecnologías que cubren prácticamente todas aquellas empleadas en el tratamiento de aguas residuales en ALC, a diferentes escalas (véase Anexo 1 para una descripción detallada de las tecnologías empleadas y el cuadro 3 para un resumen de las estadísticas básicas de estas PTAR por país).

Cuadro 3
Estadísticas básicas de las PTAR existentes en los cinco países seleccionados

País	# PTAR	Porcentaje de PTAR	Capacidad instalada (l/s)	Total de habitantes 2020	Contribución de aguas residuales de los habitantes (l/s)	Porcentaje de cobertura de la capacidad instalada ^a
Bolivia (Estado Plurinacional de) ^b	50	1%	6 220	11 673 021	20 266	31%
Colombia ^c	430	13%	51 843	50 882 891	88 338	59%
Costa Rica ^d	30	1%	3 614	5 094 118	8 844	41%
México ^e	2 639	79%	194 699	128 932 753	223 842	87%
Perú ^f	187	6%	42 533	32 971 854	57 243	74%
Total	3 336	100%	298 909	229 554 637	398 532	75%

Fuente: Elaboración propia con base en: Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (2019); SUI (2021); Ruiz (2012); Datos Abiertos (2021); Méndez y Marchán (2008) y Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín (2017).

^a Capacidad instalada/Contribución de aguas residuales por habitante.

^b En Bolivia, la información se tomó del informe de indicadores de desempeño de las EPSA reguladas, elaborado por la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico APPS (2019), lo que permitió acceder a datos actualizados y completos de las PTAR existentes en dicho país.

^c La información fue tomada del Sistema Único de Información SUI (2021), el cual, si bien no brindó información total de las PTAR existentes en el país, sí proveyó datos relevantes en cuanto a su capacidad y las tecnologías empleadas en el tratamiento de las aguas residuales.

^d La información de las PTAR documentadas en Costa Rica se tomó del documento: "Gestión de las Excretas y Aguas Residuales en Costa Rica, Situación Actual y Perspectiva" elaborado por Ruiz (2012), y no propiamente de una base de datos o un sistema de información actualizado que permita conocer objetivamente la realidad de la capacidad instalada, el nivel de caudales tratados y las tecnologías empleadas para tal efecto. Dicha fuente documenta las PTAR operadas por las Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunes, la Empresa de Servicios Públicos de Heredia, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados y la Municipalidad de Alajuela. No obstante, es preciso mencionar que, de acuerdo con registros del Ministerio de Salud —que no son completamente exhaustivos—, hay 912 PTAR ubicadas en condominios y urbanizaciones, de las cuales no fue posible obtener información que permita tenerlas en cuenta en este inventario; pero, igualmente, por su escala no entrarían en el grupo objetivo de este trabajo.

^e En el caso de México, la información se extrajo de Datos Abiertos (2021), lo que garantiza su fiabilidad y accesibilidad.

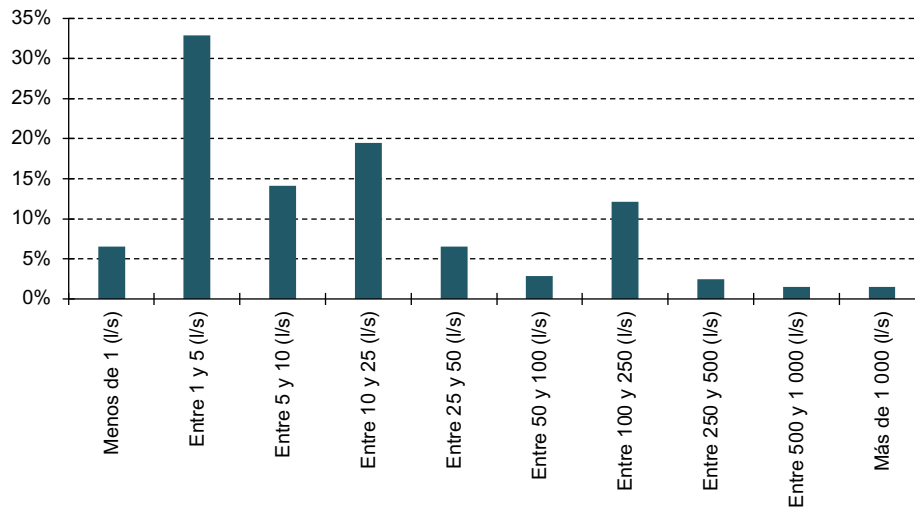
^f La recolección de información en Perú también contó con la misma limitación, dado que se tomó del documento elaborado por Méndez y Marchán (2008). Esta información se complementó con la extraída del análisis que realizó el Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín (2017) en Lima Metropolitana. Este procedimiento permitió actualizar la información disponible, en particular la documentación de buena parte de los nuevos proyectos de tratamiento de aguas residuales impulsados durante el periodo 2008 – 2017.

Dichas plantas, cuentan con una capacidad total de 298.909 litros por segundo (l/s), equivalentes a una capacidad para atender 172 millones de personas. La distribución de las plantas y su capacidad de tratamiento se muestran, en principio, acordes con la distribución poblacional de cada país. No obstante, una evaluación de la capacidad de las PTAR realizada a partir de una contribución de aguas residuales de 150 litros por habitante al día (l/h/d), evidencia una amplia capacidad de tratamiento en México y Perú (con capacidades para tratar el 87% y 74% de las aguas residuales), y una capacidad limitada en Bolivia (con capacidad para tratar el 31% de las aguas residuales).

En el análisis de las 3.336 PTAR documentadas⁹ se detectó que, debido a la atomización de las unidades municipales existentes en varios de los países estudiados, existe un amplio dominio de pequeños sistemas (véase el gráfico 3). En este sentido, 1.788 PTAR, que representan el 54% del total, tienen una capacidad menor que 10 l/s, y 867 plantas, que constituyen el 26% del total, poseen capacidad entre 10 l/s y 50 l/s. Además, considerando un volumen de descarga de aguas residuales de 150 l/h/d, el primer grupo (menores que 10 l/s) sirve a poblaciones inferiores a 5.760 habitantes, y el segundo grupo (entre 10 l/s y 50 l/s) puede servir a poblaciones de hasta casi 29.000 habitantes.

⁹ Puede consultar el archivo "Base de datos PTAR" empleado para el desarrollo de este análisis, en el repositorio web "Series de la CEPAL" en la sección "Recursos Naturales y Desarrollo". Esta base de datos se consolidó con financiamiento de la Cooperación Francesa durante el año 2021.

Gráfico 3
Distribución de las 3.336 PTAR según capacidad de tratamiento (l/s)^a
(En porcentajes)

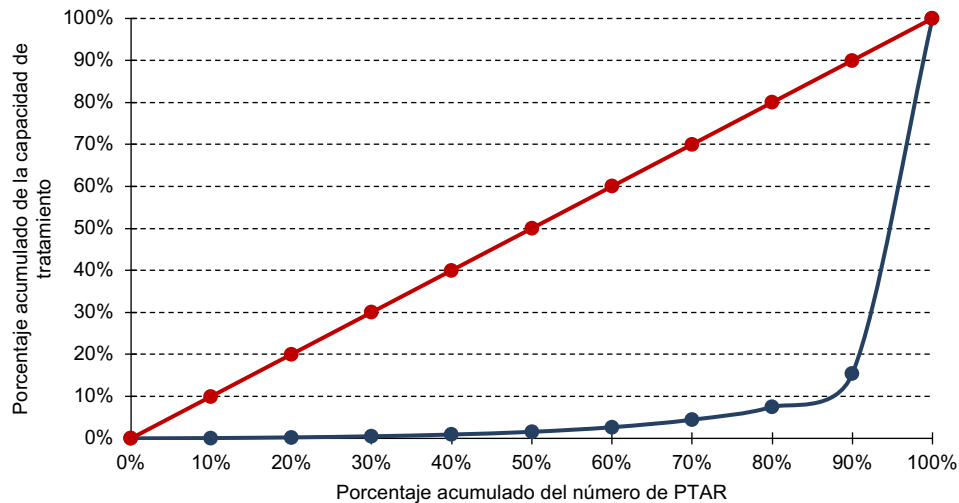


Fuente: Elaboración propia con base en: Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (2019); SUI (2021); Ruiz (2012); Datos Abiertos (2021); Méndez y Marchán (2008) y Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín (2017).

^a Por facilidad para el lector, se anotan las conversiones de las capacidades de tratamiento, en personas equivalentes, tomando como referencia un volumen de descarga por habitante de 150 litros al día. Así se tiene que las PTAR con capacidades de 1 l/s o menos podrían atender una población de 576 habitantes, 5 l/s (2.880 habitantes), 10 l/s (5.760 habitantes), 25 l/s (14.400 habitantes), 50 l/s (28.800 habitantes), 100 l/s (57.600 habitantes), 250 l/s (144.000 habitantes), 500 l/s (288.000 habitantes), y 1.000 l/s (576.000 habitantes).

No obstante, al analizar la distribución global de la capacidad de tratamiento (véase el gráfico 4), el dominio de las PTAR de menor tamaño se reduce significativamente. Una Curva de Lorenz construida con la capacidad del total de las plantas vs. el número de plantas refleja que en conjunto, el 80% de las PTAR tiene una capacidad de tratamiento agregada menor al 8% y el 10% siguiente de las PTAR tiene una capacidad de tratamiento del 7%. Con lo anterior, el 90% de las PTAR logra una capacidad acumulada del 15%. Como complemento, el 10% restante de las PTAR acumula el 90% de la capacidad de tratamiento del total de 3.336 PTAR.

Gráfico 4
Curva de Lorenz: capacidad instalada en relación con el número de PTAR en los países evaluados
(En porcentajes)

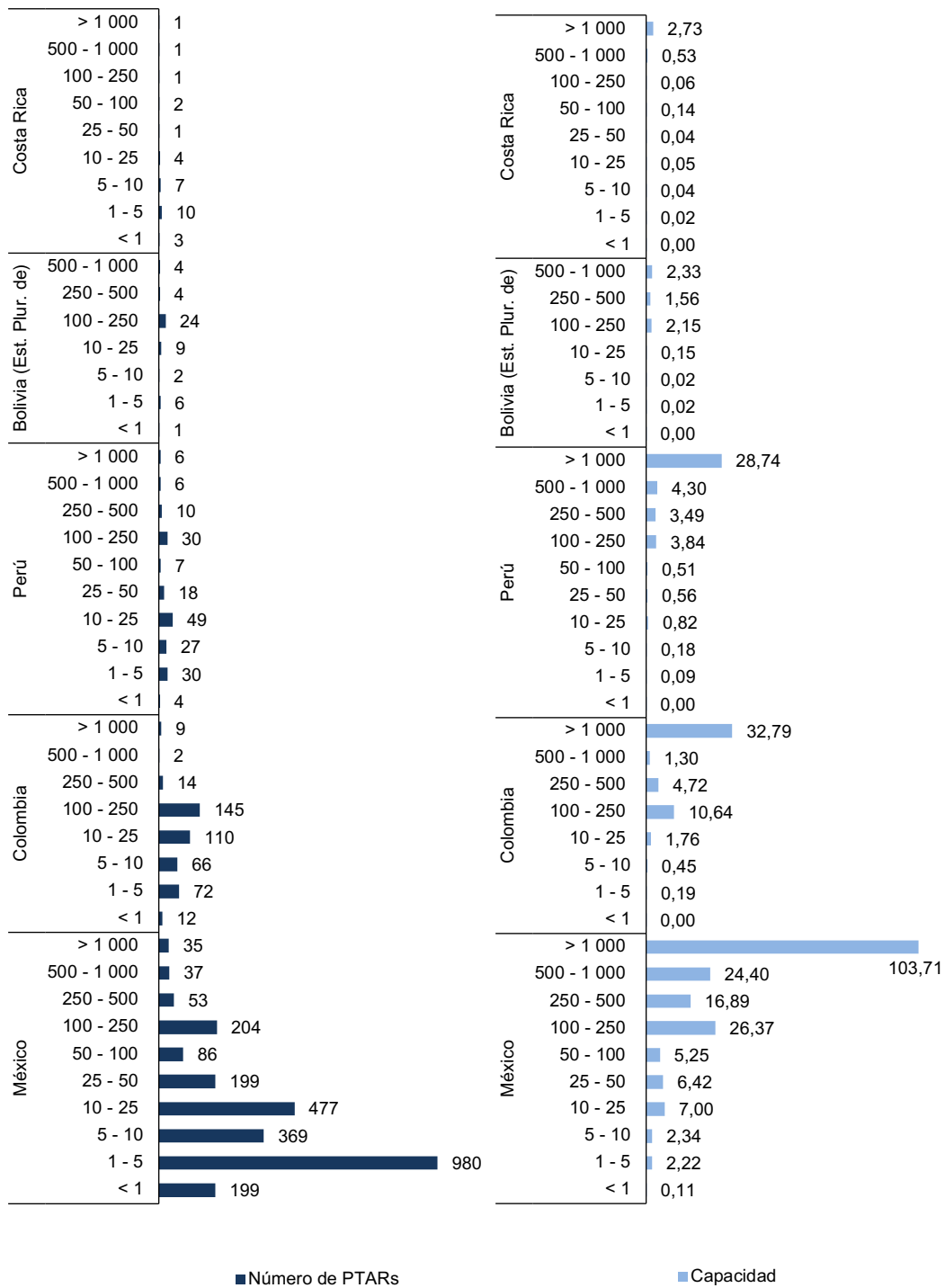


Fuente: Elaboración propia con base en: Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (2019); SUI (2021); Ruiz (2012); Datos Abiertos (2021); Méndez y Marchán (2008) y Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín (2017).

En la distribución por tamaño de las PTAR identificadas tiene un peso importante México, donde el 84% de sus plantas cuenta con una capacidad inferior a los 50 l/s. Situación similar se presenta en Costa Rica, con 83% de sus PTAR en ese rango; y un poco más atrás Perú, con 68%. Colombia cuenta con una mayor participación de plantas con una capacidad entre 100 l/s y 500 l/s, las cuales representan el 37% de su parque de tratamiento. Llama la atención el caso de Bolivia, caracterizado no solo por un importante número de municipios, sino por la notoria atomización de prestadores. Ello explica que existan numerosos prestadores del servicio, aún dentro del casco urbano de un municipio, donde predominan las PTAR con capacidad entre 100 l/s y 500 l/s, que representan el 56% del total de las plantas de tratamiento del país.

Las PTAR con capacidad de tratamiento superior a los 1.000 l/s de Colombia, Costa Rica, México y Perú, concentran más del 50% de la capacidad de tratamiento de cada país (véase el gráfico 5). En el caso de Bolivia, que no cuenta con PTAR en ese rango de capacidad, sus sistemas entre 500 l/s y 1.000 l/s de capacidad representan el 37% de la capacidad total de tratamiento del país. De hecho, las PTAR con capacidad entre 50 l/s a 500 l/s son el eje central del tratamiento de las aguas residuales en Bolivia, representando el 59,6% de la capacidad instalada del país. En los casos de Perú, México y Colombia dichos sistemas abarcan entre el 18% y el 25% de la capacidad instalada, mientras en Costa Rica solo tres PTAR tienen dichos rangos de capacidad y en conjunto suman el 5,5% del total de la capacidad documentada en dicho país.

Gráfico 5
Número de plantas y capacidad de tratamiento total según la capacidad de tratamiento de las PTAR
(En número de plantas y metros cúbicos por segundo)



Fuente: Elaboración propia con base en: Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (2019); SUI (2021); Ruiz (2012); Datos Abiertos (2021); Méndez y Marchán (2008) y Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín (2017).

B. Selección de PTAR para el desarrollo del análisis

Estudios desarrollados en la región han establecido que es bastante débil la viabilidad financiera de los proyectos de aprovechamiento de metano para la generación de energía en PTAR que tratan caudales inferiores a los 500 l/s (equivalente a poblaciones menores a 300.000 habitantes). Lo anterior, en cuanto a los beneficios económicos —ya sea ahorros en costos o venta del servicio— percibidos por la generación de energía y la reducción de emisión de GEI, estos no compensan los costos de inversión y operación en que deben incurrir las empresas prestadoras del servicio (Silva y otros, 2016; Nolasco, 2010).

De otro lado, una revisión de las PTAR de la región con capacidad para tratar volúmenes superiores a los 4.000 l/s (345,6 millones de litros al día, equivalente a una población servida de 2,3 millones de personas¹⁰), permite afirmar que ya cuentan con soluciones tecnológicas para el aprovechamiento del biogás, ya sea para la generación de energía o calor. Por mencionar algunos ejemplos, en México las PTAR Norte, Dulces Nombres, Agua Prieta y Atotonilco de Tula, que sirven las zonas metropolitanas de Monterrey (las dos primeras), Guadalajara y el Valle de México, respectivamente, han implementado ya soluciones orientadas al aprovechamiento del recurso. En Colombia las PTAR El Salitre, Aguas Claras y Cañaveralejo, que sirven a Bogotá, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Cali, respectivamente, emplean el biogás en el secado de lodos, y las dos últimas, en la generación de energía. En Perú, la PTAR Taboada, que sirve a los habitantes de Lima y la Provincia Constitucional del Callao, tiene ya la autorización del gobierno Regional del Callao para generar 2,2 MW. En Chile, la planta La Farfana trata el 50% de las aguas residuales generadas por la población del Gran Santiago y emplea el biogás en el secado de lodos e inyecta los excedentes al sistema de distribución de gas natural de la ciudad.

En ese sentido, tomando como criterio de clasificación las capacidades superiores a 500 l/s e inferiores a 4.000 l/s, se conforma una base total de 75 PTAR¹¹ listadas en el cuadro 4 a fin de estimar la factibilidad de aprovechamiento del metano en dichas plantas.

Cuadro 4
Número de PTAR (con capacidades entre 500 l/s – 4.000 l/s) en los países analizados

País	Total PTAR	Capacidad instalada	Caudal tratado	Habitantes atendidos
Bolivia (Estado Plurinacional de)	4	2 329	1 556	896 117
Colombia	3	3 100	2 071	1 192 833
Costa Rica	1	2 730	2 730	1 572 705
México	59	61 555	46 271	26 652 286
Perú	8	9 238	4 744	2 732 556
Total general	75	78 952	57 372	33 046 496

Fuente: Elaboración propia con base en: Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (2019); SUI (2021); Ruiz (2012); Datos Abiertos (2021); Méndez y Marchán (2008) y Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín (2017).

¹⁰ Tomando un valor promedio de descarga de 150 litros al día por habitante.

¹¹ Teniendo en cuenta el criterio establecido para la selección de las PTAR, se tiene que existen 91 PTAR objetivo. Sin embargo, existen 16 plantas que no pueden ser tomadas en cuenta para el posterior ejercicio de la estimación de emisiones de metano, y los beneficios del aprovechamiento de este, por características asociadas a la capacidad instalada y al tipo de tratamiento que otorgan a las aguas servidas, pues tres de ellas corresponden a emisarios submarinos, cuatro corresponden a tratamientos primario avanzado y nueve a sistemas lagunares que pese a contar con capacidades de tratamiento entre los rangos definidos, tampoco serán tomadas en cuenta, por cuanto para los mismos no es posible estimar beneficios asociados al aprovechamiento de metano.

De esta forma, del total de las plantas listadas en el cuadro 3, solo se tomarán en cuenta para el análisis, el 8%, 0,7%, 3,3%, 2,2% y 5,1% de las PTAR documentadas en Bolivia, Colombia, Costa Rica, México, y Perú respectivamente. Sin embargo, este grupo de PTAR representa el 37%, 6%, 75%, 32% y 21% de la capacidad instalada total documentada para Bolivia, Colombia, Costa Rica, México, y Perú respectivamente, y además sirve a un total de 33 millones de personas.

Esta baja participación en el número de PTAR, y la considerable participación en términos de capacidad instalada¹², se encuentra determinada por la gran atomización de las 3.336 PTAR identificadas para los 5 países, pues como se detalla en el apartado anterior, el 80% de las PTAR cuenta con capacidades de tratamiento inferiores a los 50 l/s.

Por otro lado, de las 75 plantas objetivo, se tiene que el 83% emplean tecnologías aerobias (y aerobias anóxicas), que tratan el 89% de las aguas servidas por este grupo de PTAR objetivo (51.1 mil l/s). En esta categoría se destaca la amplia adopción de la tecnología de los lodos activados convencionales, pues el 60% de las PTAR objetivo ocupa esta tecnología en el tratamiento del 64% de las aguas residuales (véase el cuadro 5).

Cuadro 5
Clasificación de las PTAR (con capacidades entre 500 l/s – 4.000 l/s) según la tecnología empleada

Tipo de tratamiento	Tecnología	Id tecnología	Total PTAR	Caudal tratado (l/s)	Población equivalente atendida
Aerobio	Lodos activados convencionales	LAC	45	36 799	21 216 960
	Aireación extendida	AE	5	5 835	3 360 960
	Lagunas aireadas-aerobias	L A	4	2 363	1 361 088
Aerobio-anóxico	Zanjas de oxidación	ZO	1	492	283 392
	Aireación extendida con desnitrificación	AE-Dn	1	625	360 000
	Filtro percolador/Lecho percolador/Filtro biológico	FP	5	4 611	2 655 936
	Otras combinaciones de lagunas en serie	L + L	1	345	204 480
Anaerobio	Reactor anaerobio de flujo ascendente	RAFA/UASB	1	750	432 000
	Lagunas anaerobias	L An	1	269	154 944
Anaerobio-aerobio	Reactor anaerobio de flujo ascendente y lodos activados convencionales	RAFA + LAC	1	428	253 440
	Lagunas anaerobias + lagunas de otros tipos	L An + L	10	4 856	2 825 856
Total general			75	57 372	33 046 272

Fuente: Elaboración propia con base en: Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (2019); SUI (2021); Ruiz (2012); Datos Abiertos (2021); Méndez y Marchán (2008) y Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín (2017).

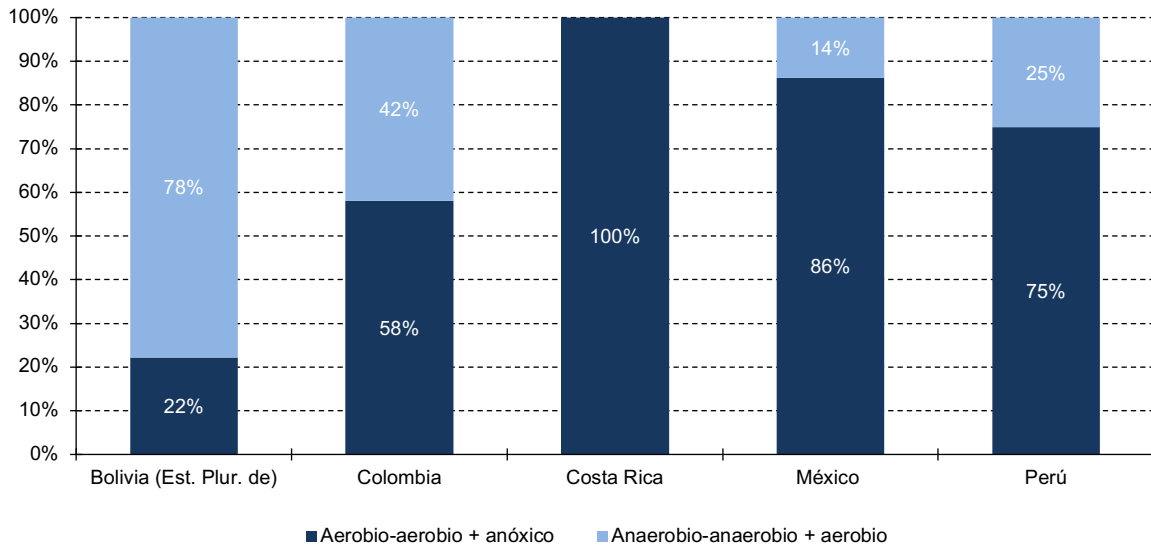
De la misma forma, los sistemas que emplean tecnologías anaerobias y duales (anaerobia-aerobia) acaparan el 17% de las tecnologías empleadas por este grupo de 75 PTAR, lo que corresponde al tratamiento del 11% de las aguas residuales servidas en esta selección de PTAR.

El gráfico 6 ilustra la composición de los caudales tratados, según la tecnología empleada en cada país. Esta composición determina el volumen estimado de metano emitido por cada habitante atendido, en la medida en que los sistemas aerobios operados de manera correcta no generan

¹² El caso de Colombia presenta una particularidad, pues cuenta con 7 PTAR (con una capacidad instalada total de 11.691 l/s) con capacidades de tratamiento entre 500 l/s y 4000 l/s. Sin embargo, 4 de estas no pudieron ser tomadas en cuenta debido a los tipos de tratamiento que otorgan a las aguas residuales (2 emisarios submarinos, y 2 sistemas lagunares con capacidades superiores a los 1.000 l/s).

emisiones, salvo que sean complementados con una digestión anaerobia de lodos (en vez de aerobia). Por el contrario, las tecnologías anaerobias presentan altas tasas de emisión de metano.

Gráfico 6
Participación de tecnologías aerobias y anaerobias en los caudales tratados en las PTAR objetivo
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

En este sentido, la importante proporción de caudales tratadas a partir de sistemas anaerobios y duales en Bolivia y Colombia determina un mayor potencial de emisión de metano en las PTAR seleccionadas de tales países y consecuentemente mayores posibilidades de implementar sistemas circulares para su captación y aprovechamiento, en contraste con las emisiones que podrían presentar México, Costa Rica y Perú, como se puede observar en los siguientes capítulos.

C. Metodología y parámetros empleados en la estimación de emisiones de metano según tipo de tecnología

Para realizar la estimación de las emisiones de metano en el proceso de tratamiento de las aguas residuales, se empleó el procedimiento de cálculo propuesto por Nolasco (2010), que a su vez está basado en la metodología publicada por el IPCC (2006), y que parte de la carga orgánica específica (DBO_5) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST) que recibe la planta ($kg/año$), para estimar la cantidad de metano por persona equivalente generada en las PTAR objetivo¹³ (ver anexo 2).

Dicha metodología, permite la aplicación de tres ecuaciones diferentes, para la estimación de la emisión de metano, tomando en cuenta las particularidades de la tecnología empleada para el tratamiento de las aguas residuales, en tecnologías anaerobias, aerobias y duales (anaerobias-aerobias).

¹³ Puesto que se están analizando PTAR municipales, es posible asumir que las aguas residuales tratadas son básicamente de origen residencial y que en todos los casos tales aguas tienen las características medias esperadas en términos de DBO_5 y sólidos suspendidos totales (SST) por habitante.

A continuación, se realizan algunas consideraciones para la estimación de emisiones de metano según tipo de tecnología.

- En principio, es necesario tomar en cuenta que las PTAR que emplean tecnologías anaerobias —ya sea a partir de reactores compactos o de sistemas lagunares— realizan un proceso de degradación de la materia orgánica, transformándola mayoritariamente en biogás con alto contenido de metano (ver ecuación 1 del anexo 2).
- Por otro lado, los sistemas que emplean procesos aerobios cuentan con niveles muy bajos o nulos de generación de metano, cuando se encuentran bien operados. Sin embargo, estas PTAR producen un gran volumen de lodo aerobio en el proceso de degradación de la materia orgánica que es necesario estabilizar antes de su disposición final, ya sea como mejorador de suelos, u otros usos.

El lodo aerobio se puede estabilizar mediante digestión aerobia o digestión anaerobia. La primera implica un alto consumo energético por unidad de volumen (mayor ineficiencia energética) y por tanto demanda mayores costos de operación. Por tal motivo, una alternativa que brinda potenciales beneficios es la estabilización anaerobia del lodo en digestores que permitan la emisión y captura del biogás, que se puede aprovechar en los diferentes procesos que se desarrollan en la PTAR (ver ecuación 4 del anexo 2). En el presente estudio se buscará cuantificar la generación de metano y energía eléctrica presumiendo que en todos los casos se aplica la estabilización anaerobia de los lodos.

Finalmente, existen configuraciones de PTAR que cuentan con tecnologías duales para el tratamiento de las aguas residuales. Estas plantas cuentan con una primera etapa de tratamiento que consta de un reactor anaerobio; y una segunda etapa de tratamiento aerobio, en donde suelen emplearse lodos activados convencionales, o filtros percoladores. En estos sistemas se emite metano en la primera etapa, a partir de la degradación de la materia orgánica contenida en las aguas servidas; y en la segunda etapa, a partir de la estabilización de los lodos derivados del tratamiento aerobio, en el reactor anaerobio de la primera etapa (ver ecuación 7 del anexo 2).

De la misma forma, para estimar la energía eléctrica y calórica generable a partir del metano emitido y captado en las PTAR, se emplearon las ecuaciones 10 y 11 del anexo 2. Estas ecuaciones parten de una eficiencia de los sistemas de captura, ruteo y reutilización del metano del 90% para los sistemas compactos y del 85% para los sistemas lagunares. Posteriormente se emplea el poder calorífico del metano captado (9,97 kWh/año) y las eficiencias promedio de los sistemas generadores de energía eléctrica (35%¹⁴) y del sistema de recuperación de calor (40%¹⁵), para la estimación de la energía eléctrica y calórica generable en las 75 PTAR evaluadas.

De acuerdo con las anteriores consideraciones, existe una serie de parámetros generales que no varían y son aplicables en la estimación de la emisión de metano para todas las tecnologías consideradas en este documento, a saber: la carga orgánica que recibe el sistema de tratamiento por habitante al año¹⁶, la capacidad máxima de producción de metano a partir de la carga orgánica que ingresa al sistema, y la densidad del metano en condiciones normales de temperatura y presión, tal como se ilustra en el cuadro 6.

Así mismo, para el caso de las tecnologías aerobias no extensivas y duales, factores como la proporción de materia orgánica contenida en el lodo generado (en peso seco) y la fracción del lodo que se transforma en biogás en la digestión anaerobia, no son susceptibles a variaciones en función de la tecnología empleada (ver ecuación 4 del anexo 2).

¹⁴ Puede variar entre 20% y 45% según la tecnología y el tamaño del motogenerador.

¹⁵ Puede variar entre 30% y 50% según la tecnología y el tamaño del motogenerador.

¹⁶ Se empleó el valor recomendado por Rosa (1998), de 42 g de DBO p.e. al día. Sin embargo, es necesario aclarar que en el mismo documento citado se propone un rango que varía entre 30 g y 45 g p.e. al día.

Cuadro 6
Parámetros generales para la estimación del metano emitido en el tratamiento de las aguas residuales

Tipo de tratamiento	Parámetro	Valor estándar	Unidad de medida
Todos los sistemas	Bo: capacidad máxima de producción de metano (CH ₄)	0,6	kg de CH ₄ generado/kg de DBO degradada
	DM: densidad del metano en condiciones normales de temperatura y presión	0,67	kg/m ³
	QDBO: carga orgánica específica (DBO p.e.) que recibe el sistema	15,33	kg/año
Aerobio y anaerobio-aerobio (sin sistemas extensivos o lagunares)	DOC: proporción de materia orgánica contenida en el lodo generado (en peso seco)	0,5	kg SV/kg ST
	DOCf: fracción del DOC que se transforma en biogás en la digestión anaerobia	0,5	Proporción

Fuente: Elaboración propia.

De otra parte, la metodología empleada contiene una serie de factores que sí varían en función de las tecnologías empleadas en el tratamiento de las aguas residuales. En ese sentido, la emisión de metano en PTAR que cuentan con tecnologías anaerobias dependerá de la eficiencia del sistema para remover el DBO₅ (DBOd) y del factor de corrección que otorga el IPCC (2006) para cada tipo de tecnología anaerobia (véase el cuadro 7).

Cuadro 7
Parámetros para la estimación del metano emitido en el tratamiento de las aguas residuales a partir de tecnologías anaerobias y anaerobias-aerobias

Tipo de tratamiento	Id tecnología	MCFj ^a (proporción)	DBOd ^b (proporción)	MCFj ^c (proporción)	Ss ^d (kg ST/kg DBO)	L ^e	CH ₄ pe ^f generado (m ³ /año)
Tratamiento anaerobio	RAFA/UASB	1,0	0,7	-	-	0,10	9,6
	L An	0,8	0,6	-	-	0,15	6,7
Tratamiento anaerobio-aerobio	RAFA + LAC	1,0	0,7	1	0,90	0,10	10,5
	L An + L	0,8	0,6	-	-	0,15	6,7
Tratamiento aerobio	LAC	-	-	1	0,90	0,10	3,1
	AE	-	-	1	0,60	0,10	2,1
	L A	0,1	0,1	-	-	-	1,1
Tratamiento aerobio-anóxico	ZO	-	-	1	0,75	0,10	2,6
	AE-Dn	-	-	1	0,60	0,10	2,1
	FP	-	-	1	0,65	0,10	2,2
	L + L	0,2	0,2	-	-	-	1,1

Fuente: Elaboración propia.

^a MCFi: factor corrector según el IPCC. Es una indicación de la medida o grado en que cada sistema es anaeróbico. Varía en función del sistema de tratamiento. Por ejemplo, en reactores cerrados perfectamente anaeróbicos, su valor es 1. En el caso de los sistemas perfectamente aerobios, su valor es cedio. En el caso de sistemas aerobios sobrecargados, o en las lagunas que no son totalmente aerobias, alcanza valores del orden de 0,1 a 0,3 (IPCC, 2006).

^b DBOd: fracción de la DBO degradada por el sistema. Es la eficiencia de remoción de DQO en el tratamiento anaerobio del agua residual. Su valor varía en función de la tecnología anaerobia utilizada.

^c MCFj: factor corrector según el IPCC, para sistemas de digestión anaerobia de lodos.

^d Ss: factor de conversión de materia orgánica en lodos (kg ST/kg DBO).

^e L: fracción del biogás que se pierde en el sistema de captura, ruteo y reutilización (es decir, metano no captado).

^f Metano emitido por persona atendida al año (m₃).

En contraste, las tecnologías duales (anaerobias-aerobias) emiten metano no solo en función de la eficiencia con que operan y el grado en que cada sistema es anaerobio, sino también en relación con el volumen de lodos que se generan en la fase aerobia del tratamiento de las aguas residuales y que se digieren de manera anaerobia.

Por otro lado, las emisiones en los sistemas que cuentan con tecnologías de tratamiento aerobio y aerobio-anóxico (que no son sistemas lagunares) se relacionan con el volumen de lodos que se produzcan durante el proceso de degradación de la materia orgánica, y el tipo de tratamiento que a estos se les otorgue. En el presente ejercicio, se asume que las tecnologías aerobias emplean digestores de lodos anaerobios, que son los que permiten mayores niveles de emisión y posterior captación del biogás.

A su vez, el cuadro 7 muestra que las lagunas aerobias y los sistemas lagunares en serie no emiten metano producto de la digestión anaerobia de los lodos, sino directamente del proceso de tratamiento que se desarrolla en los mismos sistemas lagunares, por cuanto estos no generan cantidades considerables de lodos a tratar.

En este sentido, una PTAR que emplea un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA o UASB) con una eficiencia de remoción del 70% del DBO, emitirá un estimado de 9,6 m³ de metano persona equivalente (p.e.) al año, que correspondería a 2,8 millones de m³ de metano en una PTAR que sirve las aguas residuales de 288.000 habitantes. Si además se toman en cuenta las ineficiencias supuestas en los sistemas de captación y ruteo del metano, así como en los de generación de energía eléctrica y de recuperación de calor, se podría generar un estimado de 8.691 MWh/año de energía eléctrica (equivalente al consumo de 58.000 personas en un día) y 9.933 MWh/año de energía calórica.

En contraste, una PTAR aerobia que atiende los mismos 288.000 habitantes y emplea un tratamiento a partir de lodos activados convencionales (en condiciones de operación óptima), podría generar un estimado de 3.973 toneladas de lodos, que a partir de su digestión anaerobia permitirían la emisión de 3,1 m³ de metano p.e., es decir, 892 mil m³ de metano. Con ello, se podría generar 2.793 MWh/año de energía eléctrica (equivalente al consumo de 19 mil personas en un día) y 3.192 MWh/año de energía calórica.

D. Estimación de emisiones de metano en las PTAR objetivo de los países seleccionados en un escenario base

Empleando los parámetros anteriormente enunciados, se estimó una emisión potencial de 107,9 millones de m³ de metano en las 75 PTAR analizadas²⁷, con un contenido energético de 1.076 GWh/año —una cantidad equivalente al consumo de energía eléctrica de 594.857 personas al año si se toma en cuenta el promedio de consumo per cápita de 1.809 kWh/año— (véase el cuadro 8). Sin embargo, es necesario notar que aún no se toma en cuenta la implementación de sistemas para la recuperación y el aprovechamiento de metano, por lo cual estos 107,9 millones de m³ de CH₄ corresponden al metano emisible por las PTAR, más no al metano recuperable.

A este respecto, hay que considerar que las emisiones derivadas del tratamiento aerobio de las aguas residuales y la digestión anaerobia de lodos ascienden a 2,8 m³ de metano por cada persona atendida al año, lo que representa una emisión total de 81,5 millones de metros cúbicos de metano en el año (volumen equivalente al de 24.000 piscinas olímpicas).

Aquí es necesario resaltar que la mayor producción de metano está determinada por la predominancia de los sistemas que emplean tecnologías de lodos activados convencionales, que si bien tratan el 72% de las aguas residuales servidas por PTAR aerobias, cuentan con un potencial de emisión de metano de 65,5 millones de metros cúbicos, equivalentes al 80% del metano generado en la digestión anaerobia de los lodos derivados de los tratamientos aerobios, y al 60% del metano generado en las PTAR que son objeto de análisis en este documento.

De la misma forma, el cuadro 8 pone de manifiesto el bajo nivel de emisiones que se deriva del tratamiento de las aguas residuales en los sistemas lagunares aerobios, que asciende a 1,1 m³ de metano p.e.

²⁷ Representa una emisión en promedio de 3,3 m³ de CH₄ por cada habitante atendido.

Cuadro 8
Emisiones de metano estimadas en el tratamiento de las aguas residuales domésticas en las PTAR objetivo

Tipo de tratamiento	Id tecnología	Total PTAR	Caudal tratado (l/s)	Porcentaje de aguas tratadas	Población equivalente atendida	Metano generado CH ₄ p.e. (m ³ /año)	Metano generado CH ₄ (m ³ /año)
Tratamiento anaerobio	RAFA/UASB	1	750	1,3%	432 000	9,61	4 151 456
	L An	1	269	0,5%	155 174	6,59	1 022 539
Tratamiento aerobio-anaerobio	RAFA + LAC	1	428	0,7%	246 262	10,54	2 594 746
	L An + L	10	4 856	8,5%	2 797 256	6,67	18 663 243
Tratamiento aerobio	LAC	45	36 799	64,1%	21 196 007	3,09	65 471 933
	AE	5	5 835	10,2%	3 360 851	2,06	6 920 844
	L A	4	2 363	4,1%	1 360 950	1,10	1 494 688
Tratamiento aerobio-anóxico	ZO	1	492	0,9%	283 473	2,57	729 678
	AE-Dn	1	625	1,1%	360 000	2,06	741 331
	FP	5	4 611	8,0%	2 655 936	2,23	5 925 017
	L + L	1	345	0,6%	198 587	1,10	218 102
Total general		75	57 372	100,0%	33 046 496	3,27	107 933 577

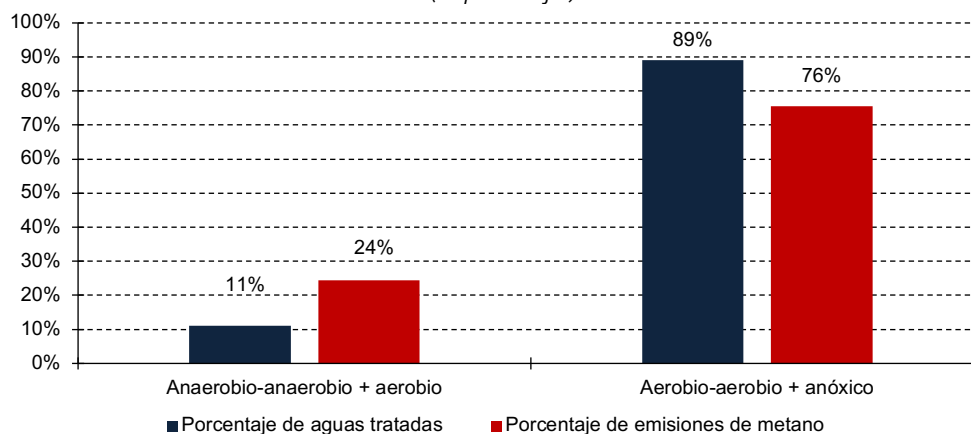
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, las plantas que emplean tecnologías anaerobias y duales presentan una emisión p.e. promedio de 7,3 m³ de metano, equivalentes a una emisión de 26,4 millones de metros cúbicos de metano.

Esto evidencia, en principio, un mayor potencial contaminante de las PTAR que emplean estas tecnologías, lo cual, visto desde la óptica de la economía circular, constituye una valiosa oportunidad para aprovechar el amplio potencial energético que representa este nivel de emisiones.

Una comparación que permite contextualizar la diferencia existente en las emisiones en los distintos tipos de tecnologías se ilustra en el gráfico 7. Allí es posible apreciar que las plantas que emplean tecnologías aerobias tratan el 89% de las aguas residuales servidas por las PTAR objetivo, y producen el 76% del metano que emiten estas. En contraste, las tecnologías anaerobias, a pesar de tratar el 11% de las aguas residuales, producen el 24% del metano emitido en las PTAR objetivo.

Gráfico 7
Emisiones de metano estimadas según el tipo de tratamiento aplicado a las aguas residuales
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

Así, las emisiones de metano en las PTAR objetivo de cada país se comportan de acuerdo con la composición tecnológica de las PTAR que tratan sus aguas servidas. Aquí, cabe mencionar que, si bien Bolivia no cuenta con una amplia capacidad instalada para tratar sus aguas residuales utiliza tecnologías que reúnen las condiciones para emitir altos volúmenes de metano¹⁸. En ese sentido, posee un mayor potencial para la implementación de la circularidad en el aprovechamiento, al igual que Colombia, como se evidencia en el cuadro 9.

En los casos Costa Rica, México y Perú, las emisiones p.e. son homogéneas como consecuencia del predominio del uso de tecnologías aerobias en el tratamiento de las aguas residuales, tal como se ilustró previamente en el gráfico 6.

Cuadro 9
Emisiones de metano estimadas en cada país, producto del tratamiento de las aguas residuales domésticas en las PTAR objetivo

País	Metano emitido (m ³ /año)	Habitantes atendidos	Metano emitido p.e. (m ³ /año)
Bolivia (Estado Plurinacional de)	4 872 005	896 117	5,4
Colombia	6 428 546	1 192 833	5,4
Costa Rica	4 857 897	1 572 705	3,1
México	82 377 024	26 652 286	3,1
Perú	9 398 105	2 732 556	3,4
Total	107 933 577	33 046 496	3,3

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, es necesario notar que los 107,9 millones de m³ de metano que pueden ser emitidos por las 75 PTAR analizadas representan un potencial energético total de 1.079 GWh/año. Sin embargo, no todo este metano es aprovechable, ni lo es tampoco la totalidad de su contenido energético. Por tal motivo, es necesario ponderar esta cifra con cautela hasta tanto se tomen en cuenta los factores de eficiencia que presentan los sistemas de captación y ruteo del metano, además de los sistemas de cogeneración de energía eléctrica y calórica.

E. Estimación de emisiones de metano en las PTAR objetivo de los países seleccionados en un escenario modificado

En el apartado anterior se presentó una estimación inicial de las emisiones de metano en las 75 PTAR seleccionadas en Bolivia, Colombia, Costa Rica, México y Perú. De la misma forma se detalló la relación existente entre las tecnologías empleadas en el tratamiento de las aguas residuales y la emisión de metano en el proceso. Al respecto se mencionó que la emisión de metano es inherente a los procesos anaerobios, por cuanto la materia orgánica en estos casos se transforma en biogás. También se esclareció que en los procesos aerobios es necesario implementar un sistema para la digestión anaerobia de lodos, dado que durante ella se emite y capta el biogás que posteriormente puede ser aprovechado en la PTAR.

Sin embargo, a diferencia de los sistemas que emplean tecnologías aerobias, los sistemas lagunares aerobios no reúnen las condiciones necesarias para la digestión anaerobia de los lodos, por cuanto su producción no es importante. Por consiguiente, una opción que tiene gran potencial para la implementación de esquemas de economía circular es la conversión de estas lagunas aerobias en

¹⁸ Las cuatro PTAR evaluadas en Bolivia tratan las aguas residuales a partir de sistemas lagunares que no superan los 1000 l/s. De ellas, tres emplean sistemas que contienen lagunas anaerobias y lagunas de otros tipos, y una corresponde a una combinación de lagunas en serie que no contiene lagunas anaerobias, pero cuenta con la extensión suficiente para ser transformada en laguna anaerobia.

lagunas anaerobias y con ello lograr la emisión, captura y aprovechamiento de un mayor volumen de biogás en la cogeneración de energía eléctrica y calórica.

Ahora bien, es necesario notar que esta solución no es viable en todos los sistemas lagunares, y varía en función de las características de cada uno de ellos. Así, de 25 sistemas lagunares que contaban con capacidades de tratamiento entre 500 l/s y 4.000 l/s, solo 16 fueron incluidos en el grupo de PTAR objetivo. Lo anterior, pues los 9 sistemas lagunares restantes cuentan con áreas extensas que comprometen la viabilidad de la transformación de las lagunas aerobias en anaerobias, y en ese sentido, imposibilitan la posterior estimación de los beneficios del aprovechamiento del metano en estas PTAR transformadas.

En ese sentido, de acuerdo con las modificaciones propuestas, se obtiene que las PTAR que emplean sistemas lagunares en el tratamiento de aguas residuales, pasan de contar con unas emisiones potenciales de 21,4 a 29,9 millones de m³ de metano (véase el cuadro 7 para apreciar los diferentes factores de emisión). De la misma forma, las PTAR objetivo pasan de contar con un potencial de 107,9 a 116,5 millones de m³ de metano (véase el cuadro 10).

Al considerar los factores de eficiencia de los sistemas de captura, ruteo y almacenamiento del metano¹⁹ (ver ecuación 3 del anexo 2), solo serían captables o recuperables 103,4 millones de metros cúbicos, es decir, el 89% del metano generable por las 75 PTAR evaluadas.

Cuadro 10
Emisiones de metano y potencial energético estimado, derivado del tratamiento de las aguas residuales domésticas en las PTAR objetivo

Id tecnología (original)	Id tecnología (modificada)	Caudal tratado (l/s)	Población equivalente atendida	Metano generado p.e. (m ³ /año)	Metano generado CH ₄ (hm ³ /año)	Metano recuperable CH ₄ (hm ³ /año)	Contenido energético del metano recuperable (MWh/año)	Energía eléctrica generable (MWh/año)	Energía calórica recuperable (co-generación) (MWh/año)
LAC	LAC	36 799	21 196 007	3,09	65 472	58 925	587 480	205 618	234 992
ZO	ZO	492	283 473	2,57	730	657	6 547	2 292	2 619
AE	AE	5 835	3 360 851	2,06	6 921	6 229	62 101	21 735	24 840
AE-Dn	AE-Dn	625	360 000	2,06	741	667	6 652	2 328	2 661
FP	FP	4 611	2 655 936	2,23	5 925	5 333	53 165	18 608	21 266
L A	L An	2 363	1 360 950	6,59	8 968	7 623	76 000	26 600	30 400
L + L	L An + L	345	198 587	6,67	1 325	1 126	11 228	3 930	4 491
RAFA/UASB	RAFA/UASB	750	432 000	9,61	4 151	3 736	37 251	13 038	14 900
L An	L An	269	155 174	6,67	1 035	880	8 774	3 071	3 510
RAFA + LAC	RAFA + LAC	428	246 262	10,54	2 595	2 335	23 283	8 149	9 313
L An + L	L An + L	4 856	2 797 256	6,67	18 663	15 864	158 162	55 357	63 265
Total		57 372	33 046 496	3,53	116 527	103 374	1 030 643	360 725	412 257

Fuente: Elaboración propia.

En ese sentido, el metano que puede ser captado cuenta con un potencial energético de 1.030 GWh/año. Sin embargo, este potencial solo es aprovechable en función de la eficiencia del sistema de generación de energía eléctrica²⁰, por lo que únicamente podrían generarse 360.725 MWh/año de energía eléctrica —equivalente al consumo anual de energía eléctrica de 202.000 habitantes— y 412.257 MWh/año de energía calórica. Lo anterior potencialmente otorga un total de 772.982 MWh/año, de emplearse un sistema de cogeneración que recupere la energía calórica que se produce en el sistema de generación de energía eléctrica.

Finalmente, el cuadro 11 ilustra la composición del potencial de emisiones, y el potencial energético derivado de estas para cada uno de los países evaluados. En este, es posible observar que,

¹⁹ 90% en reactores y digestores de lodos anaerobios, y 85% en lagunas o sistemas lagunares anaerobios.

²⁰ Se presume un 35% de eficiencia en la generación de energía eléctrica, y un 40% de eficiencia en la cogeneración de energía calórica.

en contraste con las emisiones p.e. documentadas en el cuadro 9, se presentan incrementos considerables en Bolivia (1,3 m³), México (0,2 m³) y Perú (0,5 m³), lo que configura incrementos en el metano recuperable y en el potencial energético de estos países. A partir de estos valores se estima, en el capítulo siguiente, los beneficios económicos y ambientales de la implementación de la circularidad en el tratamiento de las aguas residuales.

Cuadro 11
Emisiones de metano y potencial energético estimado en cada país, producto del tratamiento de las aguas residuales domésticas en las PTAR objetivo

País	Número de PTAR	Caudal tratado (l/s)	Población equivalente atendida	Metano generado CH ₄ (hm ³ /año)	Metano generado p.e. (m ³ /año)	Metano recuperable CH ₄ (hm ³ /año)	Contenido energético del metano recuperable (MWh/año)	Energía eléctrica generable (MWh/año)	Energía calórica recuperable (co-generación) (MWh/año)
Bolivia (Estado Plurinacional de)	4	1 556	896 117	5 979	6,67	5 082	50 668	17 734	20 267
Colombia	3	2 071	1 192 833	6 429	5,39	5 701	56 839	19 894	22 735
Costa Rica	1	2 730	1 572 705	4 858	3,09	4 372	43 590	15 256	17 436
México	59	46 271	26 652 286	88 703	3,33	79 026	787 886	275 760	315 154
Perú	8	4 744	2 732 556	10 558	3,86	9 194	91 661	32 081	36 664
Total	75	57 372	33 046 496	116 527	3,53	103 374	1 030 643	360 725	412 257

Fuente: Elaboración propia.

IV. Estimación de los costos y beneficios derivados del aprovechamiento del metano —emitido en las PTAR objetivo— para la cogeneración de energía

En este capítulo se estiman los beneficios asociados al aprovechamiento del metano en el tratamiento de las aguas residuales de las PTAR seleccionadas para la evaluación, tanto en el plano económico, como el ambiental y social. Para tal fin se detalla, en principio, los costos de inversión en que se debe incurrir en cada una de las PTAR objetivo. Con ello, se presentan las inversiones a realizar en tres grandes tipos de PTAR (véase apartado A).

En el apartado B, se documentan los beneficios económicos de las inversiones a realizar. En principio, se presenta el biogás potencialmente aprovechable, el contenido energético del mismo, y la energía que de allí podría aprovecharse. Después, se establecen una serie de supuestos que se tomarán en cuenta para evaluar los ingresos que se derivarían de la generación de energía, para realizar una evaluación de tipo beneficio/costo.

Posteriormente se presentan los beneficios ambientales (véase apartado C), producto de la implementación de procesos circulares a partir de las mencionadas inversiones. Finalmente (véase apartado D), se presenta una aproximación de los beneficios macroeconómicos y sociales derivados de las inversiones propuestas, evidenciando el número de empleos generados y los incrementos en Producto Interno Bruto (PIB) y valor agregado, en las economías nacionales de países selectos de la muestra.

A. Costos de inversión para el aprovechamiento de metano en la generación de energía en las PTAR objetivo

Se ha estimado el potencial de metano que podría producir una PTAR en un escenario base, y en un escenario modificado. Sin embargo, para poder calcular los beneficios que otorgaría el aprovechamiento de dicho metano, es necesario definir los costos de inversión en los que se debe

incurrir, para poder potenciar el nivel de emisiones que se podría presentar en el proceso de tratamiento en el caso de los sistemas lagunares y los sistemas aerobios compactos, y para poder captar y transformar dicho metano en energía, y finalmente, en ingresos. Estas inversiones, pueden resumirse en tres tipos, de acuerdo con la tecnología empleada en el escenario base de cada PTAR. En principio, se tiene que en las PTAR que emplean tratamientos de tipo aerobio (compacto), es necesario implementar digestores anaerobios de los lodos, que son cruciales para el aprovechamiento del metano en este tipo de plantas, pues de no contar con estos digestores, no será posible contar con la emisión y posterior captación de metano.

En estas PTAR, también se hace necesaria la introducción de sistemas de ruteo, almacenamiento y purificación del metano, así como de motogeneradores de energía y del sistema de cogeneración de energía calórica.

En este punto, es necesario notar que una de las limitaciones del actual documento corresponde a la no estimación de costos de inversión asociados a la implementación de sistemas de cogeneración de energía calórica (véase la última columna del cuadro 12), motivo por el cual tampoco se tomarán en cuenta los beneficios derivados de dicha inversión en el análisis global de la relación costo beneficio.

Cuadro 12
Inversiones necesarias para aprovechar el metano generable en las PTAR objetivo

Id tecnología	Sistema digestor de lodos	Obra civil de rectificación de lagunas existentes (profundización)	Cubierta de PEAD sobre nuevas lagunas anaerobias	Sistemas de ruteo, almacenamiento y purificación del metano	Sistema de generación de energía eléctrica	Sistema de cogeneración de energía calórica
LAC	x			x	x	x
ZO	x			x	x	x
AE	x			x	x	x
AE-Dn	x			x	x	x
FP	x			x	x	x
L A		x	x	x	x	x
L + L		x	x	x	x	x
L An		x	x	x	x	x
L An + L		x	x	x	x	x
RAFA/UASB				x	x	x
RAFA + LAC				x	x	x

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los sistemas lagunares, es necesario desarrollar una serie de transformaciones (obras civiles de rectificación de las lagunas, y cubierta de PEAD sobre las lagunas) que permitan la generación y captación del metano. De la misma forma, en este tipo de plantas se requieren las inversiones adicionales documentadas en las columnas 4, 5 y 6 del cuadro 12, de manera que se logre contar con un sistema que permita el aprovechamiento del metano en la cogeneración de energía.

Finalmente, las tecnologías anaerobias compactas, configuran el tercer grupo de inversiones a realizar. En estos casos, como se cuenta con la existencia de un reactor anaerobio (que cumple con la función de captación del biogás), solo se haría necesario incurrir en los costos que implicaría el aprovechamiento de este. Estas inversiones²¹, se presentan de forma detallada en el anexo 3.

Las transformaciones propuestas presentan un costo estimado total de USD \$251 millones para financiar la implementación de proyectos que permitan el aprovechamiento del metano en la generación de energía, en 75 plantas que sirven un total de 33 millones de habitantes (véase el cuadro 13 y el cuadro 14).

²¹ Es relevante identificar que el ejercicio desarrollado omite las particularidades que pueda presentar el desarrollo de dichas inversiones en cada PTAR.

Cuadro 13
Costo de Inversión estimado para el aprovechamiento del metano generable en las PTAR objetivo, por tecnología
(En dólares del 2021)

Id tecnología	Total PTAR	Caudal tratado (l/s)	Población equivalente atendida	Metano recuperable CH ₄ (hm ³ /año)	Energía eléctrica generable (MWh/año)	Inversión inicial	Inversión inicial p.e.
LAC	45	36 799	21 196 007	58 925	205 618	188 391 300	8,89
ZO	1	492	283 473	657	2 292	2 420 500	8,54
AE	5	5 835	3 360 851	6 229	21 735	17 202 600	5,12
AE-Dn	1	625	360 000	667	2 328	2 627 300	7,30
FP	5	4 611	2 655 936	5 333	18 608	20 441 300	7,70
L A	4	2 363	1 360 950	7 623	26 600	5 442 480	4,00
L + L	1	345	198 587	1 126	3 930	1 360 620	6,85
RAFA/UASB	1	750	432 000	3 736	13 038	1 030 200	2,38
L An	1	269	155 174	880	3 071	1 020 420	6,58
RAFA + LAC	1	428	246 262	2 335	8 149	1 000 300	4,06
L An + L	10	4 856	2 797 256	15 864	55 357	10 204 200	3,65
Total	75	57 372	33 046 496	103 374	360 725	251 141 220	7,60

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 14
Costo de Inversión estimado para el aprovechamiento del metano generable en las PTAR objetivo, por país
(En dólares del 2021)

País	Total PTAR	Caudal tratado (l/s)	Población equivalente atendida	Metano recuperable CH ₄ (hm ³ /año)	Energía eléctrica generable (MWh/año)	Inversión	Inversión p.e.
Bolivia (Estado Plurinacional de)	4	1 556	896 117	5 082 043	17 733 791	4 421 880	4,93
Colombia	3	2 071	1 192 833	5 700 972	19 893 540	8 471 020	7,10
Costa Rica	1	2 730	1 572 705	4 372 107	15 256 468	8 875 900	5,64
México	59	46 271	26 652 286	79 025 643	275 759 982	208 124 440	7,81
Perú	8	4 744	2 732 556	9 193 655	32 081 260	21 247 980	7,78
Total	75	57 372	33 046 496	103 374 420	360 725 040	251 141 220	7,69

Fuente: Elaboración propia.

Las plantas que emplean tecnologías aerobias (compactas) acaparan el mayor volumen de inversión, pues tratan el 84% de las aguas residuales domésticas y concentran el 95% de las inversiones requeridas para el aprovechamiento del metano (en las PTAR objetivo). Esta concentración de las inversiones se encuentra determinada por los importantes costos en que se incurren a la hora de la implementación de sistemas de espesamiento, bombeo y digestión anaerobia de lodos, que acaparan el 85% —USD \$196,7 millones— de las inversiones a realizar en este tipo de plantas.

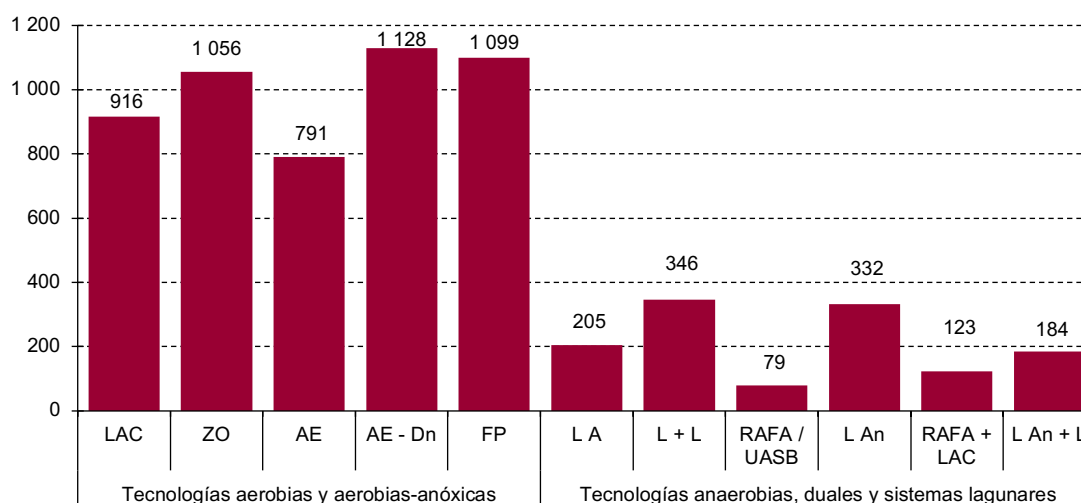
En contraste, las tecnologías anaerobias compactas (RAFA/UASB y RAFA + LAC) tratan el 2,05% de las aguas residuales y concentran el 0,81% de las inversiones (en las PTAR objetivo). Finalmente, los sistemas lagunares, tratan el 13,7% de las aguas residuales y acaparan el 7% de las inversiones requeridas por las PTAR objetivo.

Estas diferencias también pueden apreciarse en términos de inversión p.e., con respecto a la cual se estima que los costos que demandan los sistemas aerobios compactos duplican los requeridos en los sistemas anaerobios (ver última columna del cuadro 13).

Así, a partir de estas inversiones es posible generar un total de 360.725 MWh/año de energía eléctrica —equivalente al consumo anual de 200.000 habitantes—.

En ese sentido, el gráfico 8 pone de manifiesto que se requiere de una inversión promedio de USD \$696 por cada MWh/año de energía eléctrica generable en las 75 PTAR evaluadas. En las tecnologías aerobias (compactas) se tiene que la inversión promedio por cada MWh/año de energía eléctrica generable es de USD \$922; mientras en las tecnologías anaerobias, duales, y sistemas lagunares es de USD \$182.

Gráfico 8
Costos de inversión por cada MWh de energía eléctrica generable al año
(En dólares del 2021)



Fuente: Elaboración propia.

Esta amplia brecha existente en el costo de inversión por cada MWh/año de energía eléctrica generable, obedece a los bajos costos de inversión que representaría el aprovechamiento del metano en las PTAR que emplean procesos anaerobios, y al mayor potencial de emisión y captación de metano para la posterior generación de energía por habitante atendido, en contraste con los sistemas aerobios²².

B. Beneficios económicos

Una vez definidos los costos de inversión en los que habría que incurrir para aprovechar el metano en las PTAR evaluadas, y el nivel de aprovechamiento esperado de acuerdo con la tecnología de cada PTAR, es factible realizar una evaluación financiera de los proyectos que deben implementarse²³.

Para tal fin se parte de un supuesto sencillo que permite simplificar el análisis: la energía generada en las PTAR se empleará en su totalidad en la misma planta, con el fin de sustituir las fuentes externas de energía a que deben recurrir para realizar sus diversos procesos.

Con esta consideración es posible cuantificar el valor de la energía generada con base en los precios que paga el sector industrial en cada país por kWh de energía consumida (véase el cuadro 15). Dichos precios fueron tomados de la Unidad de Planeación Minero Energética (2021), que presenta información para los países evaluados en los trimestres 1 y 2 de 2019. Estos valores son un punto de referencia importante en la medida en que no contienen los trastornos económicos derivados de la pandemia del Covid-19 en 2020 y 2021, o de la guerra en Ucrania en 2022.

²² Empleando tecnologías de cogeneración, los sistemas aerobios cuentan con un potencial para generar, en promedio, un total de 19,3 kWh/año p.e., y 9 kWh/año p.e. de energía eléctrica; mientras los sistemas anaerobios podrían generar en promedio, un total de 37,2 kWh/año p.e. y 17 kWh/año p.e. de energía eléctrica.

²³ Es necesario anotar que la evaluación financiera que se presenta en este apartado únicamente contempla los beneficios del aprovechamiento de metano en la generación de energía eléctrica, y no toma en cuenta otros beneficios como los ahorros en costos por disposición de lodos, que se derivarían de la instalación de digestores anaerobios de lodos en PTAR que emplean tecnologías de tratamiento aerobias; entre otros.

Cuadro 15
Precios de energía eléctrica para el sector industrial en el segundo trimestre de 2019
(En dólares por kWh)

País	Precio
Bolivia (Estado Plurinacional de)	0,22
Colombia	0,12
Costa Rica	0,13
México	0,13
Perú	0,09

Fuente: Elaboración propia con base en precios publicados por la Unidad de Planeación Minero-Energética (2021).

De acuerdo con lo anterior, el cuadro 16 muestra que la implementación de estas inversiones permitiría obtener ingresos (ahorros) de USD \$46.6 millones anuales si solo se toma en cuenta la producción de energía eléctrica. Si se considera un horizonte temporal de 10 años y una tasa de descuento de 12,28%²⁴, se obtendría un ingreso presente neto de USD \$260,4 millones. Si se valora dicha inversión en un horizonte temporal de 20 años, se obtendría un ingreso presente neto de USD \$342,2 millones, considerablemente superior al valor presente de la inversión.

Cuadro 16
Evaluación financiera del aprovechamiento de metano en las PTAR objetivo
(En dólares del 2021)

Id tecnología	Total PTAR	Caudal tratado (l/s)	Población equivalente atendida	Inversión inicial	Inversión p.e.	VAN ingresos (20 años)	VAN ingresos (10 años)	Relación beneficio-costo (20 años)	Relación beneficio-costo (10 años)
LAC	45	36 799	21 196 007	188 391 300	8,89	192 541 240	146 526 890	1,02	0,78
ZO	1	492	283 473	2 420 500	8,54	2 164 842	1 647 479	0,89	0,68
AE	5	5 835	3 360 851	17 202 600	5,12	20 533 090	15 626 002	1,19	0,91
AE-Dn	1	625	360 000	2 627 300	7,30	1 548 308	1 178 286	0,59	0,45
FP	5	4 611	2 655 936	20 441 300	7,70	15 707 420	11 953 592	0,77	0,58
L A	4	2 363	1 360 950	5 442 480	4,00	23 986 891	18 254 399	4,41	3,35
L + L	1	345	198 587	1 360 620	6,85	6 277 094	4 776 966	4,61	4,68
RAFA/UASB	1	750	432 000	1 030 200	2,38	12 316 736	9 373 228	11,96	9,10
L An	1	269	155 174	1 020 420	6,58	2 042 191	1 554 139	2,00	1,52
RAFA+LAC	1	428	246 262	1 000 300	4,06	7 201 750	5 480 644	7,20	5,48
L An + L	10	4 856	2 797 256	10 204 200	3,65	57 875 740	44 044 342	5,67	4,32
Total	75	57 372	33 046 496	251 141 220	7,59	342 195 299	260 415 966	1,36	1,04

Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, la implementación de esquemas de economía circular en las PTAR evaluadas en el presente documento requeriría inversiones de USD \$7,6 p.e., pero permitirían obtener ingresos en un horizonte temporal de 20 años del orden de USD \$10,3 p.e, lo cual representa una relación beneficio/costo de 1,36.

Ahora bien, es evidente —como se ha insistido a lo largo del documento— que esta relación beneficio/costo es muy superior en las tecnologías anaerobias en relación con las tecnologías aerobias; pues en las primeras, las inversiones p.e. ascienden a USD \$3,8 y los ingresos en un horizonte temporal

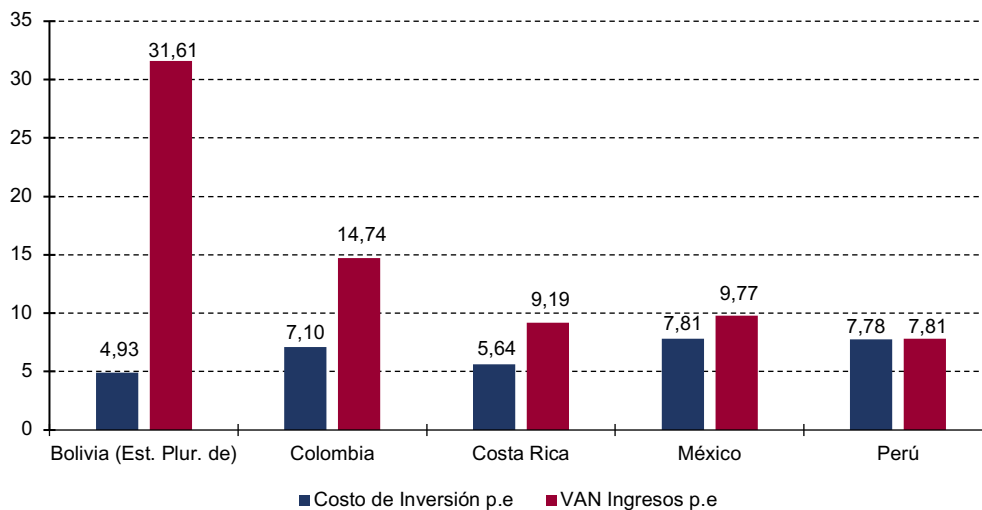
²⁴ Es la tasa de descuento reconocida por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico de Colombia a las empresas prestadoras del servicio público de agua y alcantarillado que atienden a más de 100.000 suscriptores en el área urbana.

de 20 años ascenderían a USD \$21,14; mientras en las segundas, las inversiones p.e. obedecen a USD \$8,30, y los ingresos en un horizonte temporal de 20 años es de USD \$8,35.

En particular, las tecnologías aerobias, tales como aireación extendida con desnitrificación, zanjas de oxidación y filtros percoladores no ofrecen condiciones financieras que permitan recuperar los costos asociados a la inversión inicial en este horizonte temporal de 20 años. No obstante, estas diferencias deben evaluarse cuidadosamente por cuanto existen diversos factores que pueden estar alterando esta relación y que se mencionarán más adelante (en el presente apartado).

Por otro lado, el gráfico 9 ilustra la brecha existente entre los costos de inversión en que se incurriría en cada país para implementar las tecnologías planteadas, y el valor presente neto de los ingresos evaluados con un horizonte temporal de 20 años (ambos valores se presentan en términos de persona atendida). Allí se pone de manifiesto el amplio potencial de Bolivia para el desarrollo de proyectos de este tipo, por el predominio de sistemas lagunares —que a la luz del presente documento cuentan con las condiciones para la transformación en lagunas anaerobias para captar y aprovechar el gas emitido por ellas—. Así, en el caso de las PTAR evaluadas en Bolivia, la implementación de estos proyectos implicaría que todas las aguas residuales que sirven dichas PTAR se tratarían en condiciones anaerobias, lo que se traduciría en un importante potencial de aprovechamiento de metano en dicho país.

Gráfico 9
Costos de inversión p.e. vs. Ingresos proyectados p.e. a 20 años, producto del aprovechamiento del metano en la generación de energía eléctrica
(En dólares del 2021)



Fuente: Elaboración propia.

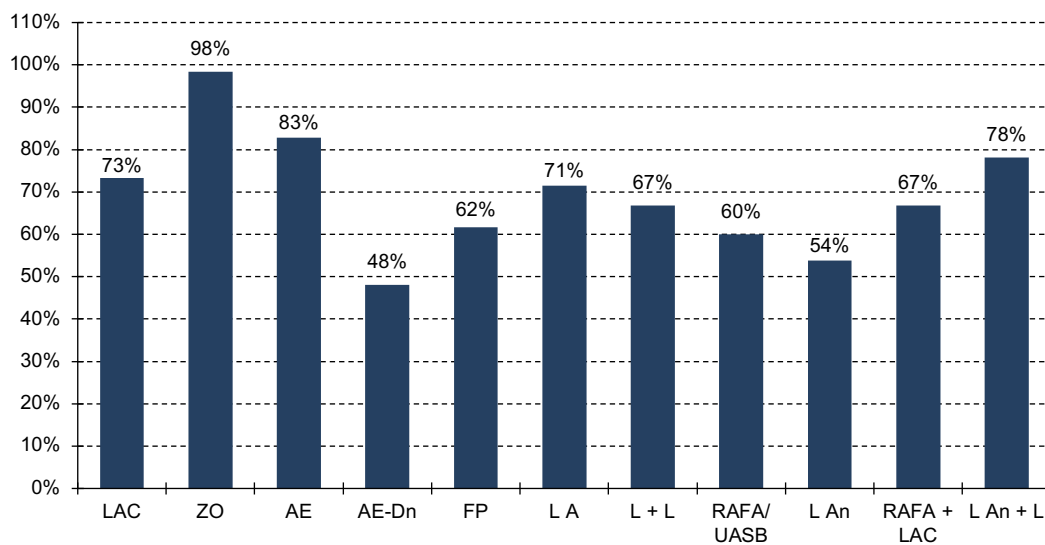
En el caso colombiano también es posible identificar una brecha favorable de USD \$7,6 p.e., que al igual que en Bolivia, surge de la presencia de tecnologías anaerobias que tratan el 42% de las aguas residuales servidas por las PTAR de dicho país que han sido abordadas en el presente análisis.

En el caso de Perú, es posible apreciar la existencia de costos de inversión iguales a los ingresos derivados de esas inversiones en un horizonte temporal de 20 años. Una explicación para la relación que allí se presenta, es la importante subutilización de las PTAR evaluadas que operan en dicho país, por cuanto solo se emplea el 51% de su capacidad instalada (véase el gráfico 11), lo que implica que la evaluación en términos de personas atendidas sea allí desfavorable.

Es necesario, entonces, hacer una aclaración con respecto a la evaluación financiera de los proyectos a realizar. Si bien se planteó un escenario con un horizonte temporal de 20 años, para el ejercicio se consideraron unas condiciones invariables en términos de producción de metano y en la evolución de los precios de la energía.

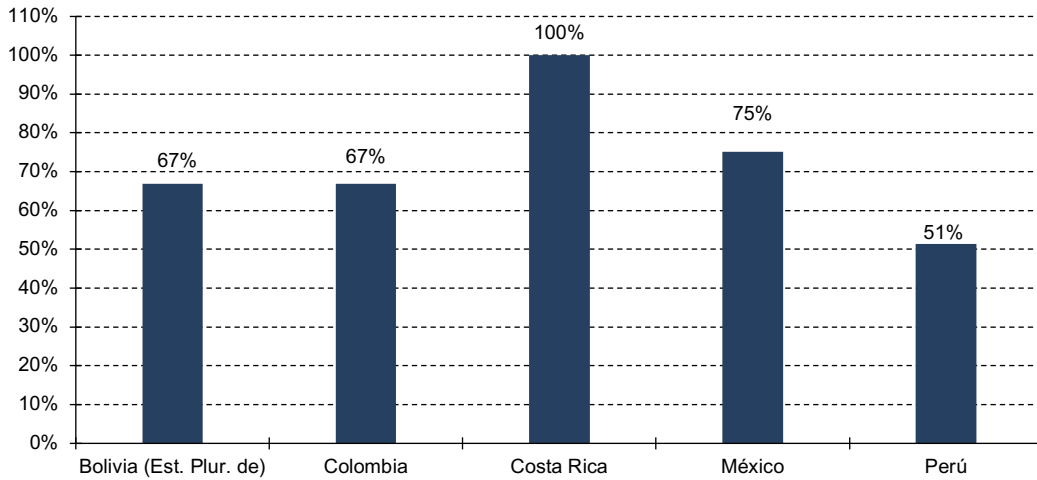
Sin embargo, debe observarse que, tal como se mencionó en el caso de Perú, la capacidad instalada y su utilización son factores determinantes en la viabilidad financiera de las inversiones a implementar. Esto, dado que la emisión de metano evoluciona en función de la carga orgánica que recibe la PTAR, y esta a su vez depende del número de personas servidas por la planta. En este sentido el gráfico 10 y el gráfico 11 ilustran el nivel de utilización de la capacidad instalada de las PTAR.

Gráfico 10
Nivel de utilización de la capacidad instalada en las PTAR evaluadas, según el tipo de tecnología empleada en el tratamiento de las aguas residuales
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 11
Nivel de utilización de la capacidad instalada en las PTAR evaluadas de cada país
(En porcentajes)

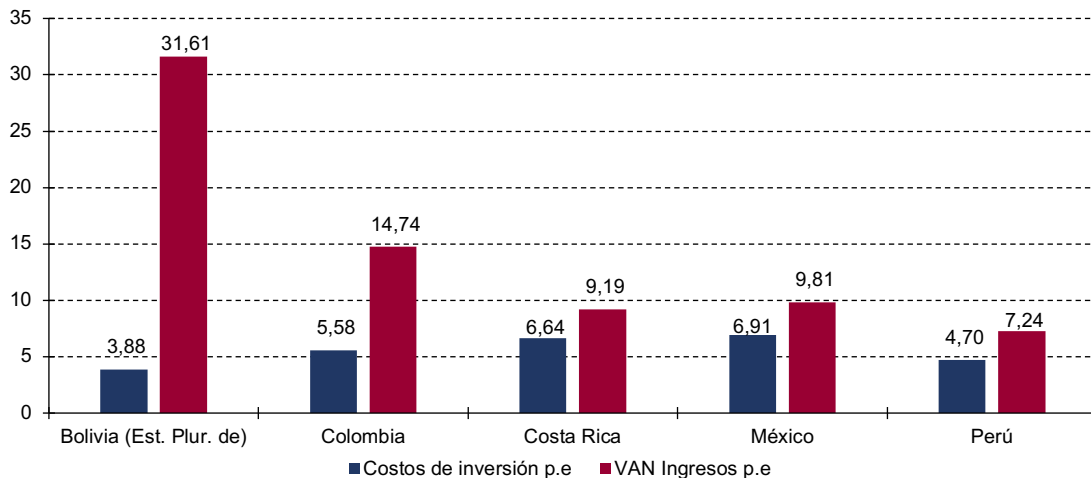


Fuente: Elaboración propia.

Dado lo anterior, la viabilidad de estas inversiones será mayor en la medida en que se amplíe el nivel de utilización de la PTAR, lo cual necesariamente implica que las empresas prestadoras de servicios públicos deben ampliar las redes y las conexiones al servicio de alcantarillado.

Si se replica el gráfico 9, suponiendo un porcentaje de utilización general del 85% de la capacidad instalada en las PTAR, se obtendría un nivel de inversiones y de ingresos p.e. como lo ilustra el gráfico 12. Allí se puede apreciar que la relación costo/beneficio cambia sustancialmente cuando se presenta un alto nivel de utilización de la capacidad instalada con que cuenta la PTAR. Este efecto es más evidente en Perú, en donde este tipo de proyectos no se muestran financieramente viables en el escenario inicial.

Gráfico 12
Costos de inversión p.e. vs. Ingresos proyectados p.e. a 20 años, producto del aprovechamiento del metano en la cogeneración de energía (suponiendo el uso del 85% de la capacidad instalada)
(En dólares del 2021)



Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, la tecnología empleada en el tratamiento de las aguas residuales, así como el nivel de utilización de la PTAR, y el nivel de carga orgánica contenida en las aguas residuales a tratar en cada planta²⁵, son factores claves a la hora de determinar la sostenibilidad financiera de un proyecto que implemente la circularidad en la reutilización del metano derivado del tratamiento de las aguas residuales.

Asimismo, dado el favorable margen que presenta la relación costo beneficio de los proyectos que emplean tecnologías anaerobias, y en particular, en los sistemas lagunares, se identifica una oportunidad importante en torno a la conversión de sistemas lagunares aerobios en sistemas anaerobios que implementen la captación y el aprovechamiento del metano en la generación de energía. Adicional a esto, los resultados obtenidos en el presente ejercicio, sugieren que el aprovechamiento de metano en la generación de energía sería viable incluso en sistemas lagunares que cuentan con capacidades de tratamiento inferiores a los 500 l/s.

Por otro lado, en la actualidad existen casos de PTAR que realizan tratamientos de tipo aerobio y que emplean digestores anaerobios de lodos, pero no realizan el aprovechamiento del metano que de allí se deriva, por lo que surge entonces la posibilidad de realizar inversiones que para estos casos particulares, configurarían costos marginales, que a su vez permitirían la obtención de fuentes adicionales de ingreso o de ahorro a la PTAR.

C. Beneficios ambientales

Como ya se ha mencionado en el documento, el tratamiento de las aguas residuales tiene impactos importantes en la protección de la calidad del agua, la salvaguarda de los ecosistemas acuáticos y la mitigación del cambio climático.

En adición a esto, la introducción del enfoque de la economía circular permite potenciar los beneficios ambientales derivados del tratamiento de las aguas residuales, pues implica aspectos como la sustitución de energía eléctrica proveniente de fuentes que emplean combustibles fósiles y la reducción de las emisiones de GEI, en particular, de metano.

De acuerdo con lo anterior, en este apartado se pretende documentar los beneficios ambientales producto de la reducción de emisiones que se presenta a raíz del aprovechamiento del metano en las 75 PTAR objetivo, para la generación de energía eléctrica. Sin embargo, es necesario hacer antes algunas salvedades.

En principio, el procedimiento habitual para realizar las estimaciones de reducción de emisiones, parte de la evaluación de las emisiones de la PTAR en un escenario base, y en un escenario que contempla las inversiones que se detallaron en el apartado A del presente capítulo. Sin embargo, el análisis actual presenta la limitación de no contar con la información precisa del escenario base de cada una de las PTAR analizadas. En particular, no se cuenta con la información concerniente al consumo energético de cada una de las PTAR, y en el caso de las plantas que emplean tratamientos aerobios, no se cuenta con información que de cuenta sobre el tipo de digestión que se realiza a los lodos.

Sin embargo, el ejercicio a desarrollar en este capítulo no tiene como objeto estimar beneficios económicos a partir de la venta de bonos de carbono; sino realizar un análisis que permita dimensionar las reducciones potenciales de emisiones GEI que tendrían lugar al realizar las inversiones propuestas en este documento. Por esta razón, se contemplan unos sencillos supuestos que se listan a continuación.

²⁵ Debido a limitaciones impuestas por las fuentes de información, no se pudo tomar en cuenta la diferencia entre las características de las aguas residuales tratadas en las diferentes PTAR evaluadas en el documento, que, sin duda, habría enriquecido los resultados que aquí se presentan.

- El primero se presenta con respecto a las PTAR que emplean tecnologías aerobias (compactas)—tal como se hizo con el ejercicio de estimación de las emisiones de metano de las 75 PTAR— que corresponde a la utilización de digestión anaerobia de los lodos derivados del tratamiento de las aguas residuales.
- El segundo, corresponde a la exclusión del análisis de las emisiones indirectas, producto del factor contaminante de la energía que emplea la PTAR para su operación, o cualquier tipo de emisión indirecta que pueda presentarse por particularidades de cada una de las PTAR.
- El tercero corresponde a la emisión total del metano derivado del proceso del tratamiento de las aguas residuales en las 75 PTAR; aun cuando es frecuente encontrar plantas que implementen el quemado del metano con el fin de reducir las emisiones GEI.

Así, el cuadro 17 ilustra la reducción de emisiones de metano en las PTAR evaluadas, tomando un escenario base con las consideraciones anteriormente expuestas²⁶.

Cuadro 17
Reducción de emisiones después de la realización de inversiones en la captación y el aprovechamiento del metano en las PTAR objetivo

Id tecnología (original)	Id tecnología (modificada)	Emisiones de CH ₄ en escenario base (m ³)	Emisiones de CH ₄ en escenario modificado (m ³)	Reducción de emisiones (en porcentajes)
LAC	LAC	65 471 933	6 547 193	90
ZO	ZO	729 678	72 968	90
AE	AE	6 920 844	692 084	90
AE-Dn	AE-Dn	741 331	74 133	90
FP	FP	5 925 017	592 502	90
L A	L An	1 494 688	1 345 220	10
L + L	L An + L	218 102	198 746	9
RAFA/UASB	RAFA/UASB	4 151 456	415 146	90
L An	L An	1 022 539	155 298	85
RAFA + LAC	RAFA + LAC	2 594 746	259 475	90
L An + L	L An + L	18 663 243	2 799 486	85
Total		107 933 577	13 152 250	88

Fuente: Elaboración propia.

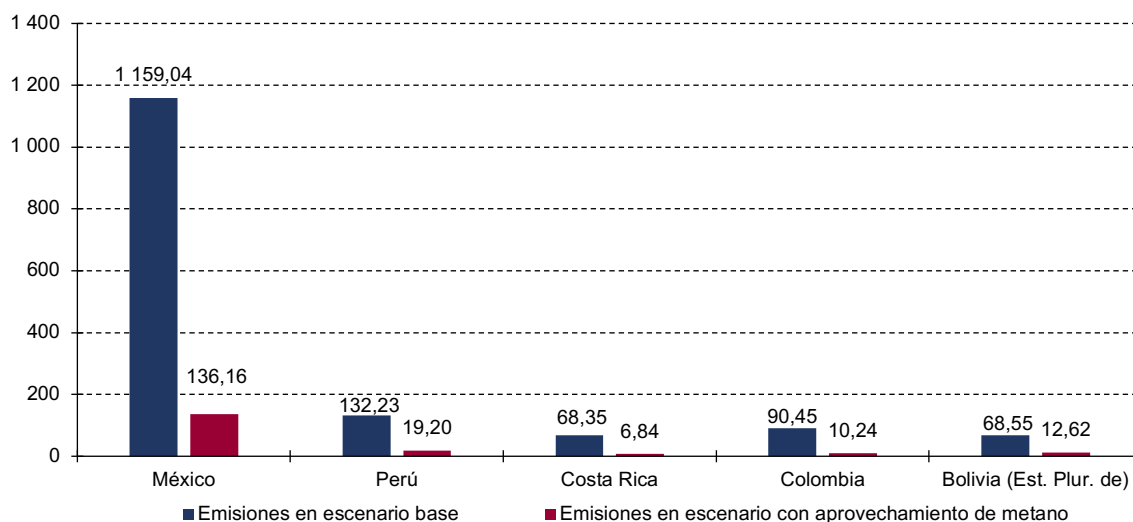
Allí se hace evidente que existe una reducción de emisiones del 88% pasando de 107 millones de m³ de metano, equivalente a 1,5 millones de toneladas de CO₂ (equivalente a las emisiones de 320 mil personas en un año²⁷), a 13,1 millones de m³ de metano equivalente a 0,2 millones de toneladas de CO₂.

De la misma forma, la reducción de emisiones que se presenta en cada país se ilustra en el gráfico 13, donde es posible identificar reducciones en las emisiones que oscilan entre el 82% y el 90%. Así, las reducciones en las emisiones agregadas de las 75 PTAR evaluadas en los 5 países corresponden al 26% de las emisiones de Nicaragua en el 2018, al 22% de las emisiones de la población de Costa Rica y al 1,7% de las emisiones de Colombia, en ese mismo año.

²⁶ El escenario base corresponde a las emisiones estimadas y documentadas en el cuadro 8.

²⁷ https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.PC?name_desc=true.

Gráfico 13
Reducción de emisiones por país, en las PTAR objetivo
(En miles de toneladas de CO₂)



Fuente: Elaboración propia.

D. Beneficios macroeconómicos y sociales

Para el cálculo, se consideran los beneficios económicos y ambientales que permiten la introducción de los principios de economía circular en la gestión de las aguas residuales, así como los beneficios sociales asociados a mejoras en salud pública. Además, se identifica la existencia de beneficios sociales (agregados) derivados de las inversiones propuestas para el aprovechamiento de metano en la generación de energía eléctrica, que se materializan en la generación de empleos verdes, crecimiento del valor agregado generado en los países, e incrementos en el PIB.

En ese sentido, se empleó un simulador elaborado con base en las Matrices Insumo Producto del año 2011 desarrolladas por la División Económica de Comercio Internacional e Integración de la CEPAL. Esta permite estimar los impactos directos e indirectos de la inversión en saneamiento en las economías de 10 países de ALC, rescatando efectos sobre el empleo, el valor agregado, la producción y el consumo intermedio.

En ese sentido, se identifica que, en la realización de la simulación del impacto de las inversiones a realizar sobre el PIB, el valor agregado y el empleo, se encuentra la limitación de no contar con las MIP de Bolivia desagregadas para los sectores de agua potable y saneamiento, lo que imposibilitó su inclusión en esta fase del análisis.

Los resultados ilustrados en el cuadro 18 evidencian que la ejecución de inversiones por USD \$247 millones en el aprovechamiento del metano para la generación de energía eléctrica, tendría un impacto total de USD \$320 millones sobre el PIB de los 4 países abordados, así como generaría un incremento del valor agregado en USD \$228 millones.

Cuadro 18
Impacto de las inversiones sobre el PIB, el valor agregado y el empleo, por país

País	Número PTAR	Inversión inicial (millones de dólares)	Incremento del PIB (millones de dólares)	Incremento del valor agregado bruto (millones de dólares)	Nuevos empleos directos	Nuevos empleos indirectos
Colombia	3	8,47	12,74	7,91	176	245
Costa Rica	1	8,88	11,77	8,08	423	99
México	59	208,12	263,27	193,42	7 230	959
Perú	8	21,25	32,33	19,03	1 699	552
Total	71	246,72	320,11	228,44	9 528	1 855

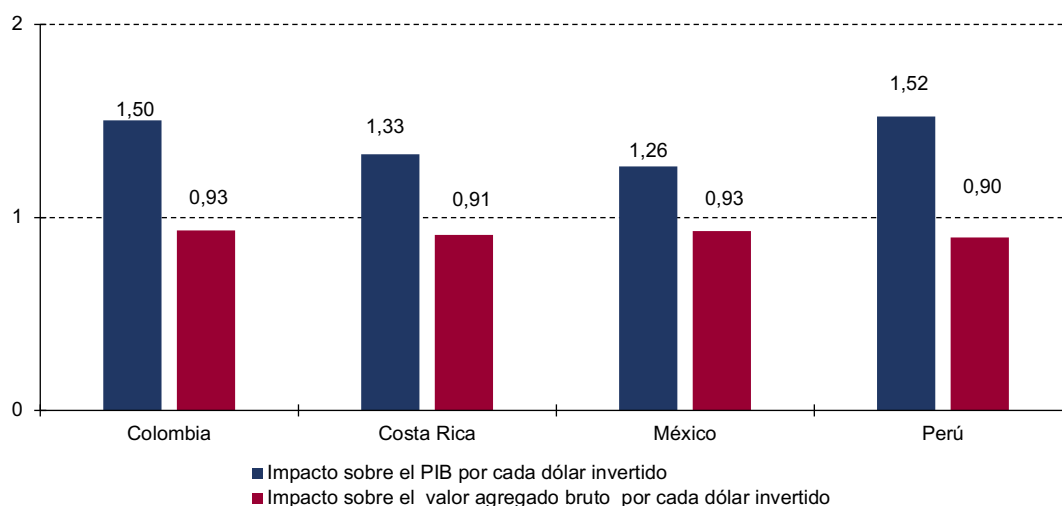
Fuente: Elaboración propia.

También pone de manifiesto que la realización de las inversiones propuestas configuraría la creación de 11.383 nuevos empleos verdes. De estos, 9.528 son empleos generados en el sector, es decir, empleos directos; mientras los 1.855 restantes son empleos indirectos.

Es necesario notar que los beneficios sociales derivados de las inversiones propuestas no se presentan de manera homogénea en los países analizados. Esto, por cuanto estas inversiones tienen un efecto que se encuentra determinado por la compleja red de encadenamientos productivos de cada país, que determina el hecho de que, por cada dólar invertido, se presenten impactos en el PIB por el orden de USD 1,5 en Colombia y en Perú, e inferiores en el caso de México y Costa Rica (véase el gráfico 14).

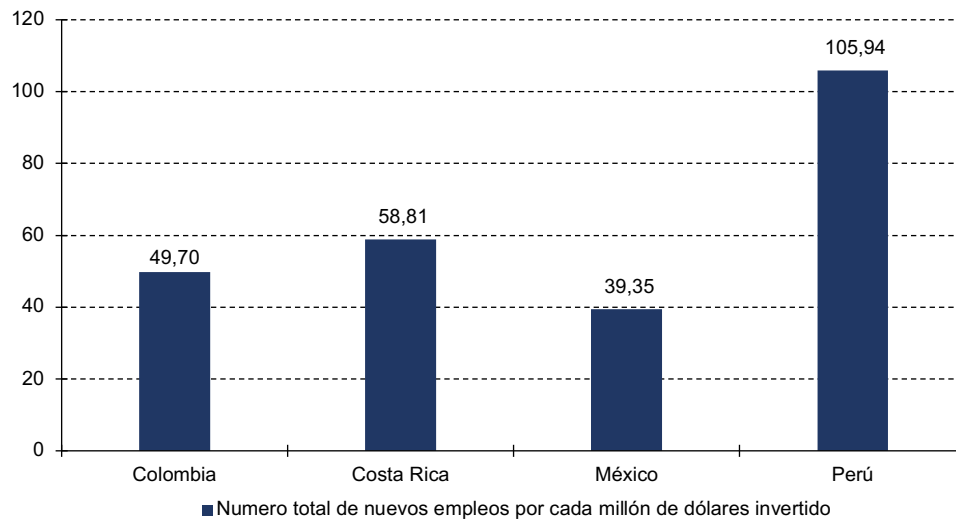
Esto mismo determina el hecho de que, por cada millón de dólares invertido en el aprovechamiento de metano para la generación de energía eléctrica en Perú, se creen aproximadamente 106 empleos, mientras en Costa Rica se crean 59, y en Colombia y México 50 y 39 respectivamente (véase el gráfico 15).

Gráfico 14
Impacto de las inversiones sobre el PIB y el valor agregado, por país
(En dólares del 2021)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 15
Impacto de las inversiones sobre la generación de empleos verdes, por país
(En números)



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, es necesario destacar que los efectos mencionados anteriormente, corresponden a incrementos (para los 4 países) del 0,011%, 0,014% y 0,013% en el PIB, el Valor Agregado y el empleo respectivamente. Estos impactos si bien parecen moderados, se derivan de la realización de inversiones en 71 PTAR de las 3.286 contenidas en la base de datos para estos 4 países.

V. Conclusiones y recomendaciones

A. Hallazgos y recomendaciones para la adopción de una política y plan de aprovechamiento del metano de PTAR en países de América Latina y el Caribe

El presente estudio brinda evidencia sobre los costos y beneficios de incorporar principios de economía circular en el tratamiento de aguas residuales. Específicamente, aporta estimaciones sobre la inversión necesaria para iniciar la transformación de 75 PTAR —con capacidades entre 500 l/s y 4.000 l/s ubicadas en 5 países de ALC que sirven hasta 33 millones de habitantes—, para el aprovechamiento del metano en la generación de energía eléctrica. Lo anterior adquiere especial relevancia al enfocarse en espacios donde estas opciones no están siendo consideradas y representa una oportunidad para mejorar la calidad, eficiencia y viabilidad financiera del servicio prestado. Los cálculos indican que, en promedio, se requeriría inversiones de USD \$7,6 p.e., que permitirían obtener ingresos en un horizonte temporal de 20 años del orden de USD \$10,3 p.e, representando una relación beneficio costo de 1,36. Al mismo tiempo, se podrían reducir las emisiones de metano en un 88%, equivalente a un cuarto de las emisiones totales de Nicaragua en 2018.

En particular, se destaca la relación beneficio costo que se presenta en sistemas lagunares aerobios o anaerobios con capacidades entre 500 l/s y 4.000 l/s (3,81 si se evalúa en un horizonte de 10 años, y 5,0 en un horizonte de 20 años). Esta alta rentabilidad, se constituye en un indicio de la posible viabilidad que tendría la transformación de sistemas lagunares con capacidades de tratamiento inferiores a los 500 l/s, lo cual debe ser explorado en futuros trabajos.

Dicha relación beneficio costo en los sistemas lagunares implica para el caso de las PTAR ubicadas en municipios bolivianos, en los cuales las inversiones a realizar para capturar metano son sustancialmente menores (USD\$ 4,93p.e.), que existe una oportunidad de negocio en la reconversión de las PTAR, para capturar beneficios operativos por hasta USD\$ 31,6 p.e. Esta cifra corresponde a más del doble registrado en las PTAR de los otros cuatro países considerados en el estudio.

Por tal motivo, una de las tareas pendientes que surgen del desarrollo de este documento, corresponde a la evaluación de los beneficios económicos, sociales y ambientales que se derivarían de la implementación de esquemas de economía circular en sistemas lagunares que cuentan con capacidades instaladas inferiores a los 500 l/s. De hecho, se hace necesario establecer la escala de operación en que este tipo de tecnologías, así como de las tecnologías anaerobias compactas, reportarían una relación beneficio/costo positiva, de manera que se fomente la transformación de dichos sistemas en PTAR que adopten los principios de la economía circular.

En términos ambientales, se resaltan los beneficios de la reducción de emisiones de metano que se presenta en todas las tecnologías. No obstante, a pesar de este positivo resultado, es evidente que si se realizara una evaluación partiendo de un escenario base —que permita conocer las emisiones directas e indirectas de cada PTAR—, se obtendrían resultados en términos de reducción de emisiones de CO₂ equivalente, más robustos y específicos para cada planta abordada.

A su vez, es necesario resaltar que los beneficios ambientales de los sistemas circulares en el tratamiento de aguas residuales no se limita a la reducción en las emisiones de metano. La menor contaminación de los cuerpos de agua que ese enfoque habilita, al aumentar la viabilidad financiera de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, tiene efectos positivos en la salud pública. Por ejemplo, la literatura indica una relación positiva entre la disminución de las muertes relacionadas con enfermedades transmitidas por el agua cuando existe una infraestructura y una cobertura de agua potable y saneamiento adecuadas. De manera similar, la paridad de género en la participación escolar mejora cuando la infraestructura de agua potable y saneamiento gestionado de forma segura está disponible (Saravia Matus y otros, 2022). Una menor contaminación del aire y de los cuerpos de agua también impacta positivamente en el precio de las viviendas, favorece el turismo y asegura un ambiente sano. También se destacan los beneficios sociales. Con la inversión estimada en las PTAR seleccionadas de Colombia, Costa Rica, México y Perú, se crearían 11.383 empleos verdes (directos e indirectos).

No obstante, es necesario reiterar la necesidad de fortalecer la generación de economías a escala en el tratamiento de las aguas residuales. Esto es debido a que el 34% de la capacidad instalada de los países abordados se encuentra distribuida en 3.243 sistemas con capacidades entre los 0,03 l/s y los 500 l/s. En ese sentido, la reducción de la gran atomización identificada en las PTAR de los países abordados permitiría un mayor nivel de eficiencia en el tratamiento de las aguas residuales, con menores costos de operación y menor impacto ambiental (menores niveles de emisión de CO₂ equivalente).

Ejemplificando lo anterior, pueden ser más contaminantes 50 PTAR con capacidades de 10 l/s, o 25 PTAR con capacidades de 20 l/s, que no cuentan con viabilidad financiera para la implementación de esquemas de economía circular, que una PTAR con capacidad equivalente que implemente esquemas de economía circular que permitan aprovechar los diferentes subproductos generados en su proceso.

Por otro lado, las principales barreras para la adopción de estos sistemas corresponden al nivel de capacitación del personal, la disponibilidad de fuentes de financiamiento a largo plazo, así como la necesidad de la realización de inversiones adicionales en redes de alcantarillado que permitan un mayor nivel de utilización de las PTAR. De hecho, uno de los hallazgos del estudio, sugiere que un mayor nivel de utilización de la capacidad instalada en las PTAR mejora la viabilidad económica de estos proyectos.

Así, el gran reto de la región corresponde a la ampliación de los sistemas de alcantarillado, que permita un aumento importante en el uso de la capacidad instalada para el tratamiento de las aguas residuales, la cual se encuentra bastante por debajo de sus parámetro de diseño en muchos países²⁸, bajo un esquema que adopte los principios de circularidad, y que priorice la financiación hacia los proyectos que permitan la operación a una escala eficiente económica y ambientalmente.

²⁸ México, Perú, y recientemente Costa Rica son un buen ejemplo de ello.

Finalmente, se hace necesario avanzar en la evaluación de la viabilidad económica y de las condiciones requeridas para implementar tecnologías que permitan el máximo aprovechamiento de los diferentes subproductos derivados del tratamiento de aguas residuales. Esto, por cuanto existen otras opciones no evaluadas en este documento, que pueden generar ingresos a las PTAR, como lo son la venta de bonos verdes y de agua tratada, la recuperación de nutrientes para la agricultura o bien la gestión de los lodos para restaurar suelos.

Para fomentar estas oportunidades, hay que actualizar regulaciones y diseñar políticas de atracción de la demanda, como estímulos para impulsar la compra de los diferentes servicios y bienes provenientes de sistemas circulares del tratamiento de las aguas residuales así como revisar los incentivos para fomentar la inversión en el sector, que permita el cumplimiento de los requisitos de gestión segura. De esta manera, se favorece la viabilidad financiera de las PTAR convirtiéndolas en negocios sostenibles y alineados con los objetivos de la Agenda de Desarrollo Sostenible. Solamente así la región no se quedará atrás frente a las transformaciones tecnológicas que ya se están produciendo en los países más desarrollados en este sector.

B. Aporte a la recuperación económica transformadora de la región

Los resultados de este estudio revelan que este tipo de soluciones innovadoras contribuyen al progreso hacia el desarrollo sostenible y están en consonancia con la Agenda 2030. En esencia, también representan una opción viable para la reactivación económica transformadora de ALC después de la pandemia por Covid-19 y en un contexto de guerra en Ucrania. Esta reactivación económica transformadora se basa en dos pilares: a) que las innovaciones tecnológicas contribuyan a un cambio estructural y que b) promuevan un gran impulso inversor en línea con la sostenibilidad (CEPAL, 2021).

La propuesta de transformación a sistemas circulares de las PTAR de este estudio, es una acción concreta que constituye una forma innovadora de enfrentar el reto del tratamiento de aguas residuales y la estructura económica que lo acompaña, evitando principalmente impactos sobre el medio ambiente y la salud de las personas, mientras se crean espacios para transformar residuos en productos que pueden ser la generación eléctrica en base a biogás, la venta de agua tratada, el uso de lodos para restauración de suelos o bien la extracción de nutrientes. Ya en 2012, la CEPAL señalaba la oportunidad de cerrar las brechas de infraestructura con insumos y productos sostenibles, sobre todo en las áreas de transporte, agua y saneamiento, vivienda y energía, como necesarias para un cambio estructural para la igualdad. Sin embargo, en ese momento los países debían aun superar obstáculos y deficiencias institucionales para implementarlas.

Varios autores identifican a las ciudades (Moglia y otros, 2021) y los espacios con alta densidad poblacional e insuficiente infraestructura de agua y saneamiento (Leach y otros, 2021) como los puntos de partida para la recuperación transformadora y el incremento de la resiliencia ante el cambio climático. En este sentido, los sistemas circulares en el tratamiento de aguas residuales contribuyen a promover la autosuficiencia energética, a reducir el riesgo de interrupción en el suministro o disponibilidad agua y a disminuir la contaminación del agua, entre otros (Moglia y otros, 2021). Las nuevas formas de política pueden convertirse en la base de las relaciones ciudadano-Estado, reconfiguradas para hacer frente a otra pandemia o shocks externos generados por el clima o las guerras. Queda demostrado que la anticipación y la resiliencia a las grandes crisis deben convertirse en una problemática central a ser tratada, sobre todo en los sistemas de prestación de agua potable y saneamiento, que constituyen derechos humanos y son centrales para salud pública y ambiental.

Finalmente, estas transformaciones —que se ha demostrado, son rentables en términos económicos—, necesitan de un fuerte impulso inversor. En los países desarrollados se han impulsado algunas transiciones verdes con transformaciones estructurales en agua potable y tratamiento de aguas residuales, pero, al no asegurar la continuidad de las inversiones, los ha llevado de nuevo a ser vulnerables y caer en el riesgo (Barbier, 2020). De ahí la necesidad de mantener no solamente un apoyo fiscal en el tiempo, sino de abrir espacios para la participación del sector privado. Es por eso por lo que la CEPAL tiene como una de sus recomendaciones para la recuperación postpandemia el sostener las políticas fiscales expansivas, identificando espacios para innovación y gestión privada responsable con el uso sostenible de los recursos naturales, particularmente el agua, que es central para el bienestar de las sociedades (CEPAL, 2021).

Bibliografía

- Aguilar, I. y P. Blanco (2018), "Recuperación de metano y reducción de emisiones en PTAR Nuevo Laredo, Tamaulipas, México", *Revista de Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 9, N° 2.
- Aresta, M., A. Dibenedetto y G. Barberio (2005), "Utilization of macro-algae for enhanced CO₂ fixation and biofuels production: Development of a computing software for an LCA study", *Fuel Processing Technology*, vol. 86, N° 14.
- Arnabat, I. (2017), "Bomba de calor para ACS a partir de fuentes de calor residual", [en línea], <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/bomba-de-calor-para-ac-s-fuentes-calor-residual.html>.
- Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (2019), "Indicadores de Desempeño de las EPSA Reguladas Categorías A, B, C, D 2019", Ministerio de Medio Ambiente y Agua, La Paz, Bolivia.
- Báez, P.A. y otros (2016), "Evidencia de circulación del virus de la hepatitis A, subgenotipo IA, en muestras ambientales en Antioquia, Colombia", *Biomédica*, vol. 36.
- Banco Central de Costa Rica (2021), "Cuenta de Agua", Área de Estadísticas Ambientales, San José, Costa Rica.
- Barbier, E. (2020), "Greening the Post-pandemic Recovery in the G20", *Environmental and Resource Economics*, vol. 76.
- Benetto, E., D. Nguyen, T. Lohmann y B. Schmitt (2009), "Life cycle assessment of ecological sanitation system for small-scale wastewater treatment", *Science of The Total Environment*, vol. 407, N° 5.
- Brennan, G., M. Tennant y F. Blomsma (2015), "Business and production solutions: closing loops and the circular economy".
- Briseño, H. y J. Rubiano (2018), "El servicio de agua potable para uso residencial en Colombia", *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, vol. 21, N° 1.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2012), "Cambio estructural para la igualdad: una visión integrada del desarrollo. Trigésimo cuarto período de sesiones de la CEPAL", Naciones Unidas, San Salvador, El Salvador.
- _____ (2019), Producto interno bruto (PIB) total anual a precios constantes en dólares [Conjunto de datos]. Cuentas nacionales anuales en dólares, CEPAL, [en línea]. <https://cepalstatprod.cepal.org/cepalstat/tabulador/ConsultaIntegrada.asp?IdAplicacion=6&idTema=131&idIndicador=2204&idioma=e>.

- _____ (2021), "La paradoja de la recuperación en América Latina y el Caribe. Crecimiento con persistentes problemas estructurales: desigualdad, pobreza, poca inversión y baja productividad", *Serie Special report COVID-19 CEPAL*, vol. 11.
- _____ (2022), "Una década de acción para un cambio de época: Quinto informe sobre el progreso y los desafíos regionales de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe", Foro de los Países de América Latina y el Caribe sobre el Desarrollo Sostenible, CEPAL, N° 5, San José, Costa Rica.
- Comisión Nacional del Agua (2020), "Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento edición 2020", Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México, México.
- _____ (2020), "Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación", Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México, México.
- Comité Técnico Interinstitucional Estadísticas del Agua (2021), "Boletín AGUA" CTI-Agua, [en línea], http://www.da.go.cr/wp-content/uploads/2019/01/Boletin_Agua_2021_CTIestadisticas.pdf.
- Cornejo, C. y A. Wilkie (2010), "De Estiércol a Energía - Captura de Metano en Ecuador", *Revista Tecnológica ESPOL - RTE*, vol. 23, N° 1.
- Dalal, K. y L. Svanström (2015), "Economic Burden of Disability Adjusted Life Years (DALYs) of Injuries", *Health*, vol. 57.
- Datos Abiertos (2021), Catálogo de plantas de tratamiento de aguas residuales en operación de CONAGUA [Conjunto de datos], CONAGUA, [en línea], <https://datos.gob.mx/busca/dataset/catalogo-de-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-en-operacion-de-conagua/resource/4eee2614-ee68-4bc7-9698-22cd956c57c7>.
- Denton, F. y otros (2014), "Climate-Resilient Pathways: Adaptation, Mitigation, and Sustainable Development", en C. Field, V. Barros, D. Dokken, K. Mach, M. Mastrandrea y T. Bilir, "Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2020), Producto Interno Bruto desde el enfoque de la producción a precios constantes [Conjunto de datos], Cuentas Nacionales Trimestrales, DANE, [en línea], <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentasnacionales-trimestrales/historicos-producto-interno-bruto-pib>.
- Dirven, M. (2019), "Nueva definición de lo rural en América Latina y el Caribe en el marco de FAO para una reflexión colectiva para definir líneas de acción para llegar al 2030 con un ámbito rural distinto. 2030", *Alimentación, agricultura y desarrollo rural en América Latina y el Caribe*, N° 2.
- División de Estadística de las Naciones Unidas (2021), Aguas residuales domésticas tratadas de manera segura [Conjunto de datos], UNSTAT.
- EcoGreen Mundo (2015), "Diferencias entre la Economía Circular y la Economía Lineal", EcoGreenMundo, [en línea], <https://ecogreenmundo.com/diferencias-entre-la-economia-circular-y-la-economia-lineal/>.
- Ellen MacArthur Foundation (2013), "Towards the circular economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition", Ellen MacArthur Foundation, Cowes, Reino Unido, [en línea], <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>.
- _____ (2015), "Delivering the Circular Economy, A Toolkit for Policymakers", Ellen MacArthur Foundation, Cowes, Reino Unido, [en línea], <https://emf.thirdlight.com/link/lzmolo7akk8k-hy6xla/@/preview/1?o>.
- EPA (Environmental Protection Agency) (2021), "Overview of Greenhouse Gases", EPA, [en línea], <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#CH4-reference>.
- Felca, A. y otros (2018), "Analysis of biogas produced by the anaerobic digestion of sludge generated at wastewater treatment plants in the South of Minas Gerais, Brazil as a potential energy source", *Sustainable Cities and Society*, vol. 41.

- Flores, A., C. Buckley y R. Fenner (2009), "Selecting Wastewater Systems for Sustainability in Developing Countries", *Proceedings of 11th International Conference on Urban Drainage*, Edimburgo, Reino Unido, [en línea], <https://www.researchgate.net/publication/267259999>.
- Foley, K. (2010), "Wastewater treatment and energy: an analysis on the feasibility of using renewable energy to power wastewater treatment plants in Singapore", Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, United States of America, [en línea], <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/60765>.
- Fortuño, M. (2017), "La economía del agua: El futuro se acerca complicado", World Economic Forum, El Blog Salmón, [en línea], <https://es.weforum.org/agenda/2017/03/la-economia-del-agua-cada-vez-sera-mas-importante>.
- Gaius-Obaseki, T. (2010), "Hydropower opportunities in the water industry", *International Journal of Environmental Sciences*, vol. 1, N° 3.
- Gasson, C. (2021), "Is net zero now water's biggest priority?", *Global Water Intelligence*, [en línea], <https://www.globalwaterintel.com/news/2021/32/is-net-zero-now-water-s-biggest-priority>.
- Gaterell, M. y otros (2011), "An Economic and Environmental Evaluation of the Opportunities for Substituting Phosphorus Recovered from Wastewater Treatment Works in Existing UK Fertiliser Markets", *Environmental Technology*, vol. 21, N°9.
- Ghisellini, P., C. Cialani y S. Ulgiati (2016), "A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems", *Journal of Cleaner Production*, vol. 114.
- GIZ (Deutsche gesellschaft für internationale zusammenarbeit) (2020), "Bombas de Calor. Una Guía para el Usuario", Bonn, Alemania, [en línea], <https://4echile-datastore.s3.eu-central-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2020/10/05150539/Gu%C3%ADa-Bombas-de-Calor.pdf>.
- González, R. y otros (2019), "Fecal pollution source tracking and thalassogenic diseases: The temporal-spatial concordance between maximum concentrations of human mitochondrial DNA in seawater and Hepatitis A outbreaks among a coastal population", *The Science of the Total Environment*, vol. 686.
- Gower, R. y P. Schröder (2016), "Virtuous Circle: How the Circular Economy Can Create Jobs and Save Lives in Low and Middle-income Countries", Tearfund and Institute of Development Studies, Londres, Reino Unido.
- Groom, M., E. Gray y P. Townsend (2008), "Biofuels and Biodiversity: Principles for Creating Better Policies for Biofuel Production", *Conservation Biology*, vol. 22, N° 3.
- Guzmán, F. (2019), "Cada vez son más frecuentes los florecimientos de algas nocivos", [en línea], <https://www.gaceta.unam.mx/cada-vez-son-mas-frecuentes-los-florecimientos-de-algas-nocivos/>.
- Hao, X. y otros (2020), "Sustainable disposal of excess sludge: Incineration without anaerobic digestion", *Water Research*, vol. 170.
- Hernández, A. (2021), "Recuperación de metano en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales" Reunión técnica Economía Circular, CEPAL.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2020), "Anuario de estadísticas ambientales", INEI, Lima, Perú, [en línea], https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1760/libro.pdf.
- IPCC (Intergubernamental Panel on Climate Change) (2006), "Tratamiento y eliminación de aguas residuales", en IPCC, "Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero".
- IEA (International Energy Agency) (2016), "Energy Efficiency Market Report 2016", International Energy Agency and OECD, Paris, Francia, [en línea], <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2016>.
- JMP (Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation) (2021), "Rural and urban service levels, 2015 and 2020", [en línea], <https://washdata.org/data/household#!/>.
- Kerres, M. y otros (2020), "Stop Floating, Start Swimming. Water and climate change. Interlinkages and prospects for future action", Bonn/Eschborn, Alemania, [en línea], <https://www.adelphi.de/en/publication/stop-floating-start-swimming>.
- King, A. M., S. C. Burgess, W. Ijomah y C. A. McMahon (2006), "Reducing waste: repair, recondition, remanufacture or recycle?", *Sustainable development*, vol. 14, N° 4.

- Kumar, A. y otros (2010), "Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions", *Trends in Biotechnology*, vol. 28, N° 7.
- Larsen, T. y otros (2009), "Source Separation: Will We See a Paradigm Shift in Wastewater Handling?", *Environmental Science and Technology*, vol. 43, N° 16.
- Lazarova, V. y T. Asano (2013), "Milestones in Water Reuse", London, United Kingdom, Knowledge Unlatched, [en línea], doi:<https://doi.org/10.2166/WRD.2011.000>.
- Leach, M., H. MacGregor, I. Scoones y A. Wilkinson (2021), "Post-pandemic transformations: How and why COVID-19 requires us to rethink development", *World Development*, vol. 138.
- Leverenz, H., G. Tchobanoglous y T. Asano (2011), "Direct potable reuse: a future imperative", *Journal of Water Reuse and Desalination*, vol. 1, N° 1.
- Linares, D. (2020), "Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica", Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, [en línea], <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/28585/2020danillinares.pdf?sequence=6>.
- Liu, H., R. Ramnarayanan y B. Logan (2004), "Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell", *Environmental Science and Technology*, vol. 38, N° 7.
- López, J., B. Ramírez, C. Gomes y J. Morgan-Sagastume (2017), "Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales", Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México, Ciudad de México, México, [en línea], https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/265430/Guia_lodos_2017.pdf.
- McCarty, P., J. Bae y J. Kim (2011), "Domestic Wastewater Treatment as a Net Energy Producer, Can This be Achieved?", *Environmental Science and Technology*, vol. 45, N° 17.
- Mejía, A., G. Uzcátegui y O. Valverde (2017), "Agua y saneamiento en el Estado Plurinacional de Bolivia", CAF, Buenos Aires, Argentina.
- Méndez, J. y J. Marchán (2008), "Diagnóstico situacional de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en las EPS del Perú y propuestas de solución", SUNASS, Lima, Perú.
- Mills, J. E. y O. Cumming (2016), "The impact of water, sanitation and hygiene on key health and social outcomes", Sanitation and Hygiene Applied Research for Equity (SHARE) and UNICEF.
- Mo, W. y Q. Zhang (2013), "Energy–nutrients–water nexus: Integrated resource recovery in municipal wastewater treatment plants", *Journal of Environmental Management*, vol. 127.
- Moglia, M. y otros (2021), "Accelerating a green recovery of cities: Lessons from a scoping review and a proposal for mission-oriented recovery towards post-pandemic urban resilience", *Developments in the Built Environment*, vol. 7.
- Montesinos, R. y V. Martín (2020), "Economía circular y Objetivos de Desarrollo Sostenible", *Distribución y Consumo*, vol. 1.
- Moscoso, J. (2016), "Manual de buenas prácticas para el uso seguro y productivo de las aguas residuales domésticas", Autoridad Nacional del Agua, Lima, Perú.
- Mulder, N. y M. Albaladejo (2020), "El comercio internacional y la economía circular en América Latina y el Caribe", *Serie Comercio Internacional CEPAL*, vol. 159, [en línea], https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46618/1/S2000783_es.pdf.
- Nolasco, D. (2010), "Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residual", *Banco Interamericano de Desarrollo*, Nota Técnica N° 116.
- Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín (2017), "Análisis geoespacial de canales de riego en relación a las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y áreas verdes en el ámbito de Lima metropolitana", Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín, Lima, Perú.
- Peña, H. (2016), "Desafíos de la seguridad hídrica en América Latina y el Caribe", *Serie Recursos Naturales e Infraestructura CEPAL*, vol. 178.
- Peña-Guerrero, A. Nauditt, C. Muñoz-Robles, L. Ribbe y F. Meza (2020), "Drought impacts on water quality and potential implications for agricultural production in the Maipo River Basin, Central Chile" *Hydrological Sciences Journal*, vol. 65, N° 6.
- Pistonesi, C., J. Haure y R. D'Elmar (2010), "Energía a partir de las aguas residuales", Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina, [en línea], http://www.edutecne.utn.edu.ar/energia_aguas_residuales/energia_aguas_residuales.pdf.

- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) (2016), "A Snapshot of the World's Water Quality: Towards a global assessment", Reporte, N° DEW/1975/NA, Nairobi, Kenia.
- Potting, J., M.P. Hekkert, E. Worrell y A. Hanemaaijer (2017), "Circular economy: measuring innovation in the product chain", *Planbureau voor de Leefomgeving*, vol. 2544.
- Quirós, A. (2021), "Introducción a la Economía Circular y el desarrollo sostenible", Presentación para Módulo Seguridad Hídrica y Desarrollo del Curso Regional sobre Gobernanza del Agua y Seguridad Hídrica de la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD).
- Rodriguez, D., H. Serrano, A. Delgado, D. Nolasco y G. Saltiel (2020), "From Waste to Resource: Shifting Paradigms for Smarter Wastewater Interventions in Latin America and the Caribbean", World Bank, Washington DC, United States of America, [en línea], <https://www.worldbank.org/en/topic/water/publication/wastewater-initiative>.
- Rosa, C. (1998), "Metodología para la evaluación aproximada de la carga contaminante", Centro de Información, Gestión y Educación Ambiental (CIGEA), La Habana, Cuba.
- Ruiz, F. (2012), "Gestión de excretas y aguas residuales de Costa Rica. Situación actual y perspectiva", Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, San José, Costa Rica, [en línea], <https://dspaceaya.igniteonline.la/bitstream/handle/aya/374/CEDO%20AyA%205051.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Saravia Matus, S., M. Gil, E. Blanco, A. Llavona y L. Naranjo (2020), "Desafíos hídricos en Chile y recomendaciones para el cumplimiento del ODS 6 en América Latina y el Caribe", *Serie Recursos Naturales y Desarrollo CEPAL*, vol. 198.
- Saravia Matus, S., M. Gil, N. Sarmanto, E. Blanco, A. Llavona y L. Naranjo (2022), "Brechas, Desafíos y Oportunidades de Agua y Género en América Latina y el Caribe", *Serie Recursos Naturales y Desarrollo*, CEPAL.
- Schady, N. (2015), "Does Access to Better Water and Sanitation Infrastructure Improve Child Outcomes? Evidence from Latin America and the Caribbean", *Inter-American Development Bank, IDB Working Paper Series*, N° IDB-WB-603.
- Schröder, P., K. Anggraeni y U. Weber (2019), "The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals", *Journal of Industrial Ecology*, vol. 23, N° 1.
- Sihvonen, S. y T. Ritola (2015), "Conceptualizing ReX for aggregating end-of-life strategies in product development", *Procedia Cirp*, vol. 29.
- Silva, I., R. Mambeli y G. Tiago (2016), "Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment Plants in Brazil: An assessment of feasibility and potential", *Journal of Cleaner Production*, vol. 126.
- Sistema Único de Información (2021), *Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales [Conjunto de datos]*. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, [en línea], <http://www.sui.gov.co/web/alcantarillado/reportes/tecnico-operativos/sistemas-de-tratamiento-de-aguas-residuales>.
- Srinivas, H. (2021), "Moving towards a Circular Economy: More than Just 3Rs!", *Global Development Research Center*, Concept Note, vol. E-097.
- Stillwell, A., D. Hoppock y M. Webber (2010), "Energy Recovery from Wastewater Treatment Plants in the United States: A Case Study of the Energy-Water Nexus", *Sustainability*, vol. 2, N° 4.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2020), "Estudio sectorial de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado – 2019", Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Bogotá, Colombia.
- EPA (United States Environmental Protection Agency) (1985), "Estimating Sludge Management Costs. Cincinnati" Environmental Protection Agency, Center for Environmental Research Information, Ohio, United States of America.
- United States Geological Survey (2021), "Mineral Commodity Summaries", Reston, Virginia, United States of America.
- Unidad de Planeación Minero Energética (2021), "Precios de energía eléctrica, comparación por países", [en línea], <https://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/precios-energia-electrica-comparacion-paises.aspx>.
- UNEP (United Nations Environment Program) (2012), "Global outlook on Sustainable Consumption and Production Policies (SCP). The Global Outlook on SCP Policies. Taking action together", United Nations

- Environment Program, Nairobi, Kenya, [en línea], www.unep.fr/scp/ISBN:978-92-807-3250-4DTI/1498/PA.
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme) (2017), "UN World Water Development Report 2017. Wastewater: An untapped resource", WWAP, Paris, France, [en línea], <https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2017/>.
- Van Vuuren, D., A. Bouwman y A. Beusen (2010), "Phosphorus demand for the 1970–2100 period: A scenario analysis of resource depletion", *Global Environmental Change*, vol. 20, N° 3.
- Velenturf, A. y P. Purnell (2021), "Principles for a sustainable circular economy", *Sustainable Production and Consumption*, vol. 27.
- Verstraete, W., P. Van de Caveye y V. Diamantis (2009), "Maximum use of resources present in domestic used water", *Bioresource Technology*, vol. 100, N° 23.
- Von Sperling, M. (2005), "Princípios do tratamento biológico de águas residuárias", Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, [em línea], <https://www.worldcat.org/title/principios-do-tratamento-biologico-de-aguas-residuarias/oclc/77543218>.
- Winpenny, J. y otros (2010), "The wealth of waste. The economics of wastewater use in agriculture", FAO, [en línea], <https://www.fao.org/publications/card/es/c/dcfbc90b-9851-5862-8a86-ofecad117835/>.
- World Bank (2020a), "Wastewater: From Waste to Resource. The Case of New Cairo, Egypt", en Rodriguez, D. J., H. A. Serrano, A. Delgado, D. Nolasco y G. Saltiel, "From Waste to Resource: Shifting Paradigms for Smarter Wastewater Interventions in Latin America and the Caribbean", *Water Global Practices*, Washington DC, United States of America.
- _____ (2020b) "Wastewater: From Waste to Resource. The Case of Santiago, Chile", en Rodriguez, D. J., H. A. Serrano, A. Delgado, D. Nolasco y G. Saltiel, "From Waste to Resource: Shifting Paradigms for Smarter Wastewater Interventions in Latin America and the Caribbean", *Water Global Practices*, Washington DC, United States of America.

Anexos

Anexo 1

Clasificación de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales

A continuación, se presenta una descripción detallada de tecnologías más representativas empleadas en el tratamiento de las aguas residuales de la región.

1. Sistemas intensivos o compactos

a) Tratamientos aerobios

Abarcan las PTAR que utilizan tecnologías con presencia de oxígeno para el tratamiento biológico secundario del agua residual. Generan lodos primarios y secundarios (biológicos) que es necesario estabilizar. La cantidad de lodo generado depende del tipo de tecnología, por lo cual es relevante poder clasificarlas con la mayor precisión posible.

En estos sistemas el tratamiento aerobio del agua residual no genera GEI si están bien dimensionados y operan correctamente. En los casos de plantas sobrecargadas, que no funcionan en forma completamente aeróbica, puede producirse emisión de metano (IPCC, 2006).

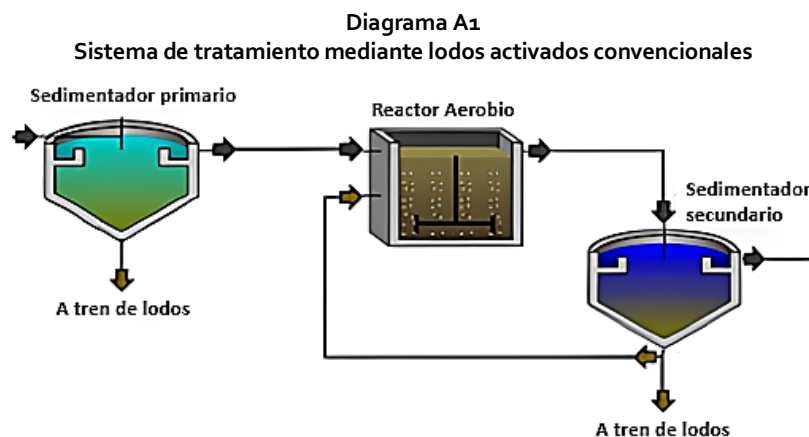
Para la estabilización de los lodos (primarios y secundarios) se pueden emplear tecnologías aerobias o anaerobias. En el presente estudio se buscará cuantificar la generación de metano y energía eléctrica presumiendo que en todos los casos se aplica la estabilización anaerobia de los lodos.

A continuación, se mencionan los tipos más comunes de PTAR aerobias intensivas. Se deja constancia de que el listado no es exhaustivo y pueden existir casos no previstos, aunque sí similares a alguno de los listados, y se deberán considerar conjuntamente.

i) *Tratamientos aerobios con biomasa suspendida*

Lodos activados convencionales (LAC)

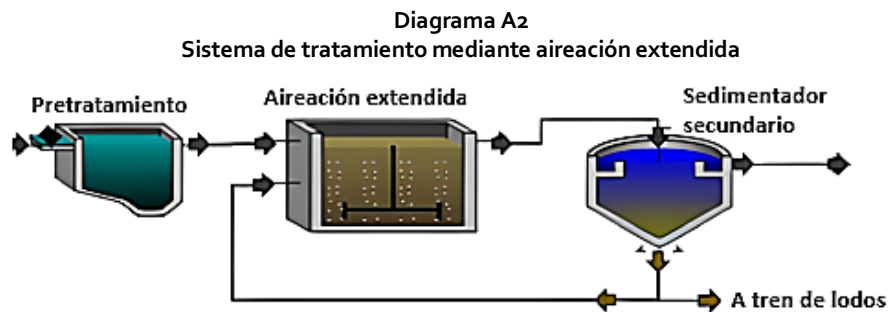
Consta de un sedimentador primario, un reactor aerobio y un sedimentador secundario, con recirculación parcial del lodo. El objetivo es oxidar la materia orgánica del agua residual, expresada como DBO₅. Es, por tanto, un tratamiento secundario. Dentro del reactor aerobio se desarrolla la biomasa aerobia en suspensión en el líquido, que luego se sedimenta para obtener el agua residual tratada. Una fracción del lodo sedimentado se recircula al tanque de aireación (lodo activado). El resto del lodo, equivalente al crecimiento de la biomasa a expensas de la materia orgánica, se purga del sistema y se envía a un tren de tratamiento de lodos para su estabilización.



Fuente: CONAGUA (2020).

Aireación extendida (AE)

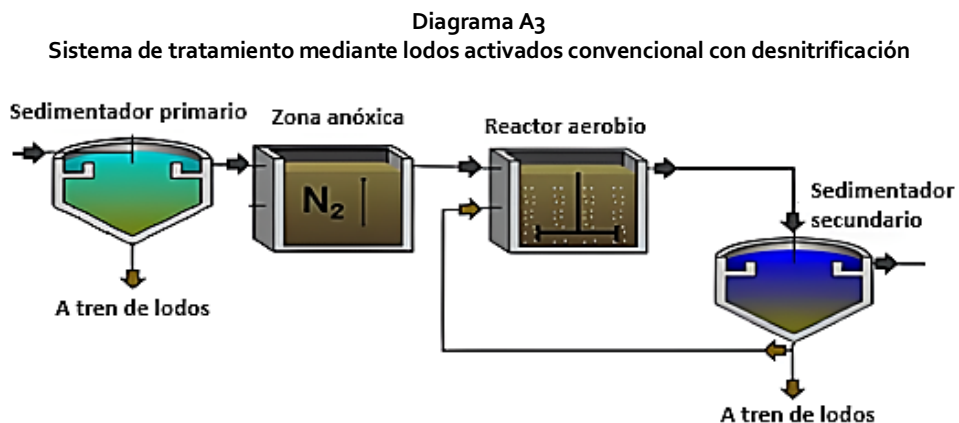
Similar al anterior, pero con mayor tiempo de residencia de los lodos, que se estabilizan parcialmente en forma aeróbica dentro del reactor aerobio. Demanda mayor consumo de energía eléctrica y menor generación de lodos que en el caso LAC.



Fuente: CONAGUA (2020).

Lodos activados convencional con desnitrificación (LAC-Dn)

Similar al LAC, pero incorpora unidades de eliminación del nitrógeno presente en el agua residual mediante procesos de nitrificación-desnitrificación (tratamiento terciario). Pueden existir diferentes configuraciones y arreglos de las unidades y flujos internos. Eventualmente se da la eliminación conjunta de fósforo, ya sea por métodos biológicos o fisicoquímicos. De acuerdo con el objetivo del presente documento, se agruparán todas esas variantes dentro de esta categoría.



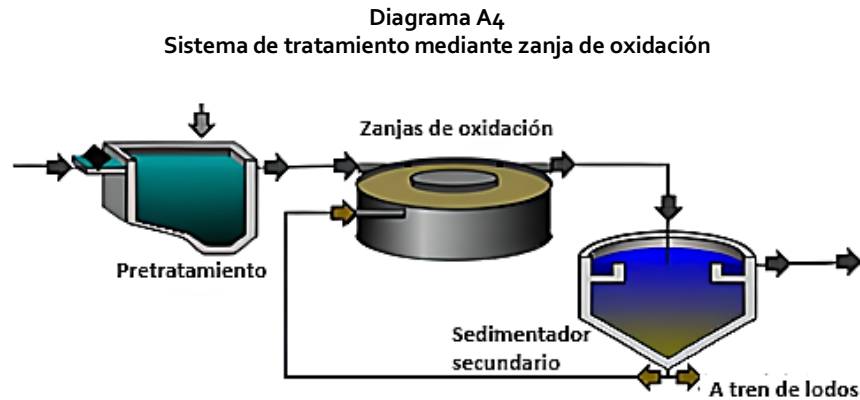
Fuente: CONAGUA (2020).

Aireación extendida con desnitrificación (AE-Dn)

Se aplican los mismos conceptos del LAC-Dn al caso de la aireación extendida (AE).

Zanja de oxidación (ZO)

Es una variante de la AE que por su diseño genera mayor cantidad de lodos que la AE común, por lo cual debe considerarse como una categoría aparte. Puede presentarse la eliminación biológica del nitrógeno (nitrificación-desnitrificación).



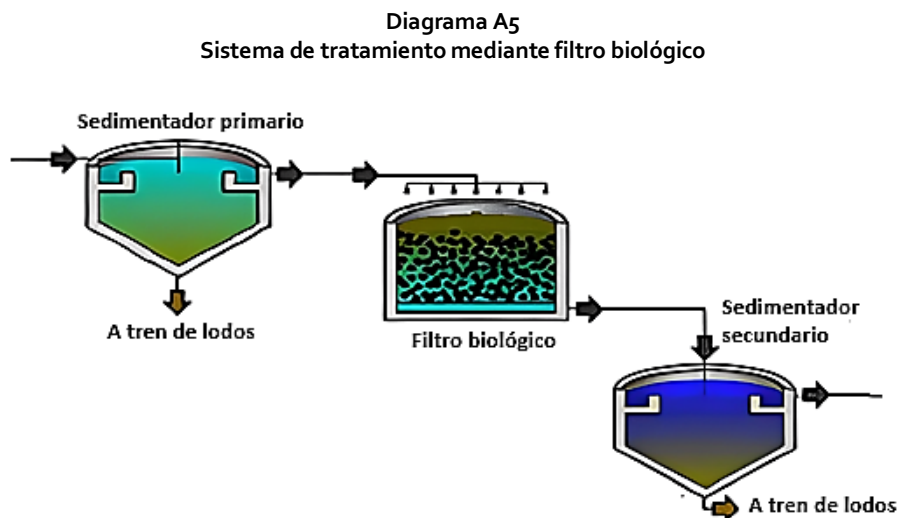
Fuente: CONAGUA (2020).

ii) *Tratamientos aerobios con biomasa fija*

A diferencia de los casos anteriores, en estas tecnologías la biomasa aerobia crece adherida a un soporte (lecho de piedra o, actualmente, de materiales plásticos).

Filtro percolador/Lecho percolador/Filtro biológico (FP) y contactores biológicos rotatorios o biodiscos (BD)

En el caso del filtro percolador (FP), el agua residual se distribuye sobre un lecho de piedras o de materiales plásticos, y la aireación se produce por tiraje natural a través del lecho. La biomasa crece adherida a esos soportes. La cantidad de lodos que se generan y que deben estabilizarse es menor que en el caso de los LAC.



Fuente: CONAGUA (2020).

Los biodiscos (BD) son un sistema de tratamiento aerobio conformado por un conjunto de discos de material plástico, que se colocan parcialmente sumergidos en la pileta por la cual circula el agua residual. La biomasa crece adherida a ese soporte. Los discos giran a bajas revoluciones por minuto (rpm), lo que genera ciclos en los cuales la biomasa es alternativamente expuesta al aire o sumergida en el agua residual.

Se propone considerar los biodiscos (BD) en un mismo grupo junto con los filtros percoladores (FP). También debería agruparse aquí cualquier otro tipo de tecnología con biomasa fija.

b) Tratamientos anaerobios

Algunas PTAR utilizan tecnologías anaerobias (en ausencia de oxígeno) para el tratamiento biológico secundario del agua residual. Al no existir aireación, el consumo de energía eléctrica es mucho menor que el de las PTAR aerobias. La cantidad de lodo a purgar de estas plantas es comparativamente menor que en el proceso aerobio (para igual capacidad de la PTAR). Además, es un lodo estabilizado que va directamente a sistemas de deshidratación o similares. En este caso el tratamiento anaerobio del agua residual en sí mismo genera GEI (metano). Los destinos del metano pueden ser:

- Liberación a la atmósfera (situación que debe evitarse).
- Quemado en antorchas ("flares").
- Uso como biocombustible para generación de energía eléctrica y calor en unidades de cogeneración CHP ("Combined Heat and Power"), que utilizan motores de ciclo Otto o Stirling, o mediante microturbinas a biogás.

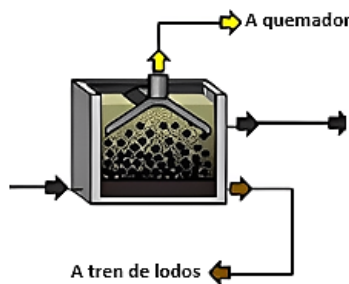
A continuación, se mencionan los tipos más comunes de PTAR anaerobias intensivas, que se propone agrupar en dos categorías.

i) Reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA), de "manta de lodos" o UASB²⁹

En esta tecnología, el flujo de agua residual se hace pasar en forma ascendente a través de una capa de lodo anaerobio. En la parte superior de los reactores se coloca un separador trifásico, que permite separar el agua residual tratada, el lodo anaerobio (que permanece en el reactor) y el biogás, que se extrae.

En muchos casos, los RAFA deben ser complementados con un postratamiento aerobio, para cumplir con los requisitos regulatorios para el agua residual tratada. En tal caso los RAFA pueden ser considerados como un "pretratamiento". (Ver más adelante 'Plantas Duales').

Diagrama A6
Sistema de tratamiento mediante reactor anaerobio de flujo ascendente



Fuente: CONAGUA (2020).

²⁹ Upflow anaerobic sludge blanket.

ii) Otros tipos de reactores anaerobios (RAn)

En el caso de PTAR de cierta antigüedad, o en el de poblaciones pequeñas, existen en uso tecnologías anaerobias de tratamiento del agua residual de diversos tipos, que proponemos agrupar en una categoría única. Esto incluye, por ejemplo, los tanques Imhoff, las fosas sépticas y los reactores anaerobios de contacto.

2. Sistemas extensivos (lagunas y similares)

Algunas PTAR utilizan sistemas extensivos de gran área, con base en la tecnología de lagunas de tratamiento de aguas residuales. Las lagunas se pueden clasificar considerando el tipo de proceso biológico que en ellas se desarrolla. Tenemos, entonces, lagunas anaerobias, lagunas aireadas (con aireadores mecánicos o inyección de aire), lagunas aerobias (en general se reserva este nombre a lagunas sin aireadores pero de baja carga orgánica aplicada, que presentan aireación natural), lagunas facultativas (presentan condiciones aerobias en las capas superiores de líquido y anaerobias en las inferiores), lagunas de maduración (de gran extensión y baja profundidad, para permitir el ingreso de la luz solar con el objetivo de eliminar patógenos).

Para efectos de esta clasificación se proponen los siguientes grupos:

a) Lagunas anaerobias (L An)

Como lo indica su nombre, suscitan procesos de degradación biológica anaerobia de la materia orgánica del agua residual, con liberación de metano (GEI). Eventualmente, estas lagunas pueden cubrirse con membranas de materiales apropiados (PEAD, PVC, EPDM) para captar los gases generados, con lo cual se logra disminuir la dispersión de olores, y el biogás puede destinarse a usos energéticos (como en el caso de los reactores anaerobios compactos).

b) Lagunas facultativas (L Fc) y humedales artificiales ("Wetlands") (HU)

Como ya se indicó, las lagunas facultativas presentan una zona anaerobia en su fondo, desde la cual se emiten GEI (metano). A diferencia del caso anterior, ese biogás no puede ser captado (si se cubriera la laguna, dejaría de ser facultativa). Pero si se desea cuantificar las emisiones presentes de GEI, deben ser tenidas en cuenta como una categoría específica.

Los humedales artificiales son sistemas de tratamiento que combinan procesos biológicos microbianos, crecimiento de plantas emergentes (macrófitas) y tratamientos físicos (filtración, precipitación), para recrear lo que ocurre en los humedales naturales, pantanos y áreas inundables. En los humedales pueden existir zonas aerobias, anóxicas y anaerobias. Para los efectos de esta clasificación, proponemos incluirlos junto con las lagunas facultativas.

c) Lagunas aireadas, aerobias y de maduración (L A, L M)

Si bien físicamente son sistemas diferentes, proponemos agruparlas en esta clasificación, dado que sus emisiones de GEI son nulas o muy pequeñas.

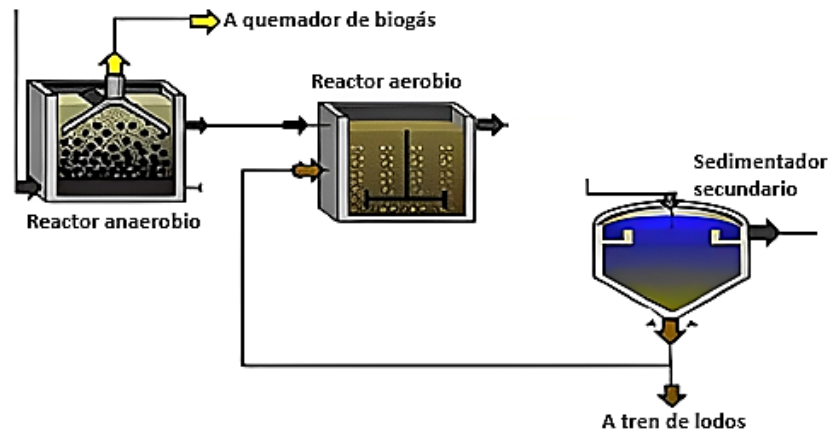
3. Sistemas duales o combinados

En este acápite de la clasificación se incluyen aquellas PTAR que combinan dos o más de los tipos de tecnologías mencionados previamente. La casuística puede ser muy variada, pero para los fines de esta clasificación proponemos las siguientes combinaciones que consideramos relevantes y que se encuentran en uso en algunos países:

a) RAFA + LAC y RAn + LAC

Se incluyen aquí todos los pretratamientos anaerobios seguidos de lodos activados.

Diagrama A7
Sistema de tratamiento mediante reactor anaerobio de flujo ascendente u otro tipo de reactor anaerobio + lodos activados

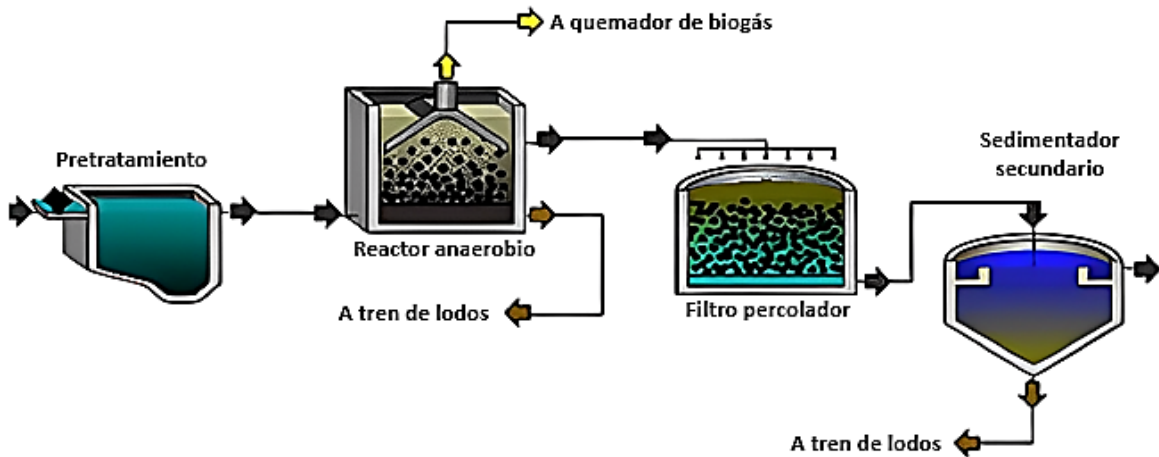


Fuente: CONAGUA (2020).

b) RAFA + FP y RAN + FP

Se incluyen aquí todos los pretratamientos anaerobios seguidos de filtro percolador.

Diagrama A8
Sistema de tratamiento mediante reactor anaerobio de flujo ascendente u otro tipo de reactor anaerobio + filtro biológico o filtro percolador



Fuente: CONAGUA (2020).

c) Lagunas anaerobias + Lagunas de otros tipos (L An + L)

Para los fines del presente estudio es relevante identificar aquellos casos que incluyen una o más lagunas anaerobias como parte de un tren de varias lagunas en serie, ya que allí existe el potencial de captar metano.

d) Otras combinaciones de lagunas en serie (L + L)

Por descarte, esta categoría cobija los sistemas lagunares que no incluyen lagunas anaerobias. Se considera que carecen de potencial para captar metano, a pesar de que emiten GEI (la mitigación debería pasar por una sustitución de los sistemas facultativos, por ejemplo).

4. Resumen de la clasificación propuesta

De acuerdo con la clasificación propuesta, el cuadro A1 presenta un resumen que contempla un identificador para cada una de las tecnologías documentadas en el presente anexo, el nombre de la tecnología, y una clasificación del tipo de sistema biológico, que comprende 4 categorías: aerobio, aerobio/anóxico (que para efectos del análisis se toman como tecnologías aerobias), anaerobio y anaerobio/aerobio (dual).

Cuadro A1
Resumen de las tecnologías empleadas en el tratamiento de aguas residuales en ALC

Identificador	Nombre de la tecnología	Tipo de sistema biológico
LAC	Lodos activados convencional	Aerobio
AE	Aireación extendida	Aerobio
LAC-Dn	Lodos activados con desnitrificación	Aerobio/anóxico
AE-Dn	Aireación extendida con desnitrificación	Aerobio/anóxico
ZO	Zanja de oxidación	Aerobio/anóxico
FP	Filtro percolador/Lecho percolador/Filtro biológico	Aerobio/anóxico
BD	Biodiscos	Aerobio/anóxico
RAFA/UASB	Reactor anaerobio de flujo ascendente	Anaerobio
Ran	Otros reactores anaerobios/Tanque Imhoff/Fosas sépticas	Anaerobio
L An	Lagunas anaerobias	Anaerobio
L Fc	Lagunas facultativas	Aerobio/anaerobio
HU	Humedales	Aerobio/anaerobio
L A	Lagunas aireadas/Lagunas aerobias	Aerobio
L M	Lagunas de maduración	Aerobio
RAFA + LAC	R. Anaerobio flujo ascendente y lodos activados	Anaerobio/aerobio
Ran + LAC	Otros R. anaerobios y lodos activados	Anaerobio/aerobio
RAFA + FP	R. Anaerobio flujo Ascendente y filtro percolador	Anaerobio/aerobio
RAN + FP	Otros R. anaerobios y filtro percolador	Anaerobio/aerobio
L An + L	Laguna(s) anaerobia(s) y otras lagunas	Anaerobio/aerobio
L + L	Combinación de otras lagunas (no anaerobias)	Aerobio/anóxico

Fuente: Elaboración propia.

5. Composición tecnológica de las PTAR contenidas en la base de datos Resumen de la clasificación propuesta

En el cuadro A2 se hacen evidentes las limitaciones impuestas por las fuentes de información, por cuanto cerca del 50% de las PTAR reportan información de baja calidad, que impide clasificarlas según las tecnologías descritas en el apartado anterior. Sin embargo, ha sido posible clasificar algunas de estas plantas según el tipo de tratamiento, a saber: 20 sistemas aerobios, 172 sistemas anaerobios, 3 sistemas duales (anaerobio-aerobio), y 134 PTAR con otros tratamientos —preliminares, primarios y de emisario submarino—.

Así, las tecnologías aerobias se constituyen en las más empleadas en el tratamiento de aguas residuales en la región según las observaciones recopiladas en este estudio, con el 29% de los sistemas y el 44% de la capacidad instalada con que cuentan los países evaluados.

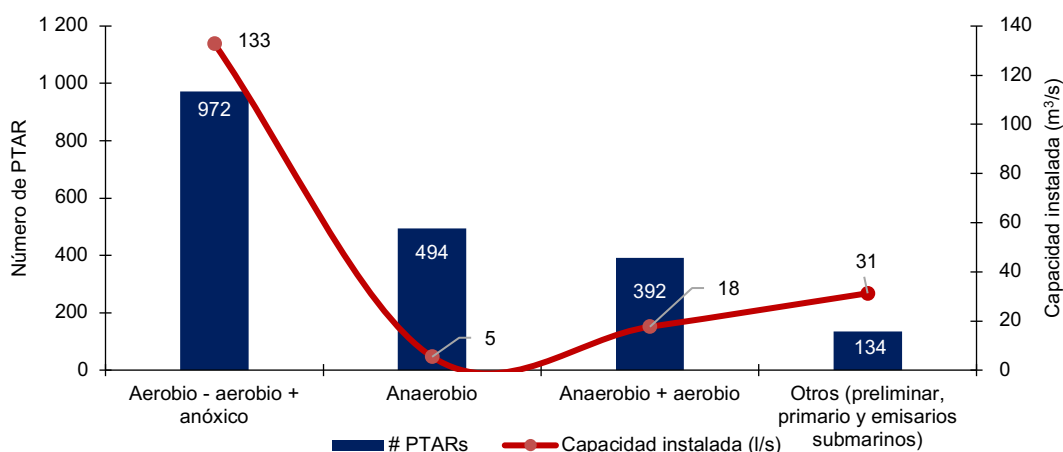
Cuadro A2
Clasificación de las PTAR contenidas en la base de datos según la tecnología empleada

Tipo de tratamiento	Tecnología	Id tecnología	# PTAR	Capacidad instalada (l/s)	
Aerobio	Lodos activados convencionales	LAC	792	104 832	
	Aireación extendida	AE	12	919	
	Lagunas aireadas-aerobias	L A	41	13 999	
	Laguna de maduración	L M	2	131	
	Aerobios (sin información detallada)	-	20	655	
Aerobio-anóxico	Otras combinaciones de lagunas en serie	L + L	2	1 572	
	Zanjas de oxidación	ZO	22	1 596	
	Lodos activados convencionales con desnitrificación	LAC-Dn	7	303	
	Aireación extendida con desnitrificación	AE-Dn	2	1 323	
	Biodiscos	BD	24	1 255	
	Filtro percolador/Lecho percolador/Filtro biológico	FP	48	6 250	
Anaerobio	Reactor anaerobio de flujo ascendente	RAFA/UASB	161	2 410	
	Otros reactores anaerobios/Tanque Imhoff/Fosas sépticas	Ran	158	702	
	Lagunas anaerobias	L An	3	620	
	Anaerobios (sin información detallada)	-	172	1 678	
Anaerobio-aerobio	R. Anaerobio flujo ascendente y lodos activados	RAFA + LAC	1	12	
	R. Anaerobio flujo ascendente y filtro percolador	RAFA + FP	67	815	
	Otros R. anaerobios y filtro percolador	RAn + FP	177	4 536	
	Otros R. anaerobios y lodos activados	RAn + LAC	10	53	
	Lagunas anaerobias + lagunas de otros tipos	L An + L	17	8 531	
	Humedales artificiales (Wetland)	HU	79	1 375	
	Lagunas facultativas	L Fc	38	1 659	
Anaerobio-aerobio (sin información detallada)	-	3	654		
Otros	Preliminar	-	27	8 804	
	Primario	P	104	19 089	
	Emisario submarino	-	3	3 375	
Sin información o información incompleta			-	1 344	111 758
Total			3 336	298 908	

Fuente: Elaboración propia.

A su vez, se identifica que los sistemas que emplean tecnologías de lodos activados convencionales (LAC) predominan ampliamente en los tipos de tratamiento aerobios (81% de las PTAR) y acaparan el 79% de la capacidad de tratamiento de estos sistemas.

Gráfico A1
Distribución de las PTAR que reportan información adecuada, según el tipo de tratamiento que emplean y la capacidad de tratamiento



Fuente: elaboración propia con base en: Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (2019); SUI (2021); Ruiz (2012); Datos Abiertos (2021); Méndez y Marchán (2008) y Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín (2017).

En cuanto a los sistemas anaerobios y duales, se detecta que prevalecen en las PTAR de baja capacidad y es reducido el uso de estas tecnologías en las PTAR con gran capacidad de tratamiento. Así las cosas, las plantas que emplean estos sistemas concentran únicamente el 7,7% de la capacidad de tratamiento total con que cuentan las 3.336 PTAR de los países evaluados.

Otra muestra de la gran atomización que existe en estas PTAR es el hecho de que el 44% de su capacidad de tratamiento se concentra en 16 PTAR de las 880 que emplean tratamientos de tipo anaerobio o dual. Igualmente, el uso de reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA) y otro tipo de reactores anaerobios, predomina también en sistemas que cuentan con baja capacidad de tratamiento: el 99,5% de las plantas que emplean estas tecnologías tienen una capacidad de tratamiento inferior a los 500 l/s.

Anexo 2

Detalle de la metodología propuesta

De acuerdo con las tecnologías referidas en el anexo 1 se tiene que es posible estimar las emisiones de metano en las PTAR evaluadas, clasificándolas en 3 grupos de tecnologías. A saber, las PTAR que emplean tecnologías anaerobias para el tratamiento de las aguas residuales, las PTAR que emplean tecnologías aerobias con niveles importantes de producción de lodos, y las PTAR que constan de etapas anaerobia y aerobia en el tratamiento de las aguas residuales.

1. Estimación de las emisiones de metano a partir del agua residual tratada en una PTAR anaerobia

En esta sección se explica el método usado para estimar el volumen de metano emitido cuando el agua residual municipal se trata anaeróticamente, ya sea en reactores anaerobios (UASB o similares) o en lagunas anaerobias, a partir del procedimiento de cálculo propuesto por Nolasco (2010), que a su vez está basado en la metodología publicada por el IPCC (2006), a saber:

$$1. \quad GM = (EF * QDBO * DBOd) / DM$$

$$2. \quad EFi = Bo * MCFi$$

Donde:

- GM: cantidad de metano (CH₄ persona equivalente) generado (m³/año).
- EFi = factor de emisión según el IPCC (kg de CH₄ generado/kg de DBO degradada).
- QDBO: carga orgánica específica (DBO p.e.) que recibe el sistema (kg/año).
- DBOd: fracción de la DBO degradada por el sistema. Es la eficiencia de remoción de DBO en el tratamiento anaerobio del agua residual. Su valor varía en función de la tecnología anaerobia utilizada.
- Bo: capacidad máxima de producción de CH₄ (kg de CH₄ generado/kg de DBO degradada).
- MCFi: factor corrector según el IPCC. Es una indicación de la medida o grado en que cada sistema es anaeróbico. Varía en función del sistema de tratamiento. Por ejemplo, en reactores cerrados perfectamente anaeróbicos, su valor es 1. En el caso de los sistemas perfectamente aerobios, su valor es cero. En el caso de sistemas aerobios sobrecargados, o en las lagunas que no son totalmente aerobias, alcanza valores del orden de 0,1 a 0,3 (IPCC, 2006).
- DM: densidad del metano a condiciones normales de temperatura y presión (kg/m³).
- Cuando se capta el metano, ya sea para quema en antorcha o para aprovechamiento energético, una fracción del biogás se pierde en el sistema de captura, ruteo y reutilización. Por lo tanto, el metano captado y aprovechable será:

$$3. \quad GA = GM(1 - L)$$

Donde:

- GA: cantidad de metano (CH₄) aprovechable (m³).
- GM: cantidad de metano (CH₄) generado (m³).

- L: fracción del biogás que se pierde en el sistema de captura, ruteo y reutilización (es decir, metano no captado).

La diferencia entre el metano generado y el metano captado será el metano emitido a la atmósfera en el escenario considerado.

2. Estimación de las emisiones de metano a partir de digestión anaerobia de lodos aerobios

A diferencia de las PTAR anaerobias, los sistemas que emplean procesos aerobios cuentan con niveles muy bajos o nulos de generación de metano (cuando se encuentran bien operados); sin embargo, estas PTAR producen un gran volumen de lodo aerobio en el proceso de degradación de la materia orgánica que es necesario estabilizar antes de su disposición final (ya sea como mejorador de suelos, u otros usos).

El lodo aerobio se puede estabilizar mediante digestión aerobia o digestión anaerobia. La primera implica un alto consumo energético por unidad de volumen (mayor ineficiencia energética) y por tanto demanda mayores costos de operación. Por tal motivo, una alternativa que brinda potenciales beneficios es la estabilización anaerobia del lodo en digestores que permitan la emisión y captura del biogás, que se puede aprovechar en los diferentes procesos que se desarrollan en la PTAR.

El metano generado en la estabilización de lodos aerobios en un biodigestor anaerobio se calcula así:

$$\begin{aligned}
 4. \quad & GM = (EFj * S * DOC * DOCf) / DM \\
 5. \quad & EFj = Bo * MCFj \\
 6. \quad & S = ss * QDBO
 \end{aligned}$$

Donde:

- GM: cantidad de metano (CH₄ p.e.) generado (m³/año).
- S: cantidad de lodo generado (ST p.e.) en el tratamiento aerobio, en peso seco (kg/año). Su valor depende del tipo de tecnología aerobia de tratamiento.
- Ss: factor de conversión de materia orgánica en lodos (kg ST/kg DBO).
- QDBO: carga orgánica específica (DBO p.e.) que recibe el sistema (kg/año).
- DOC: proporción de materia orgánica contenida en el lodo generado, en peso seco (kg SV/kg ST). Generalmente se presume un valor de 0,5.
- DOCF: fracción del DOC que se transforma en biogás en la digestión anaerobia. Valor típico: 0,5.
- Efj = factor de emisión según el IPCC (kg de CH₄ generado/kg de DBO degradada).
- Bo: capacidad máxima de producción de CH₄ (kg de CH₄ generado/kg de DBO degradada).
- MCFj: factor corrector según el IPCC, para sistemas de digestión anaerobia de lodos.
- DM: densidad del metano a condiciones normales de temperatura y presión (kg/m³).

Si el biogás es captado y aprovechado energéticamente, se debe aplicar aquí también la ecuación (3).

3. Estimación de las emisiones de metano en PTAR con etapas anaerobias y aerobias

Existen configuraciones de PTAR que cuentan con una primera etapa anaerobia de tratamiento del agua residual, seguida de una etapa aerobia. En estos sistemas, el lodo aerobio de la segunda etapa se puede estabilizar anaeróbicamente en un biodigestor de lodos. En este caso existen dos fuentes de generación de metano, y la ecuación de cálculo del GM es una combinación de las ecuaciones (1) y (4).

$$7. \quad GM = [(Efi * QDBO * DBOd) + (E fj * S * DOC * DOCf)] / DM$$

$$8. \quad S = ss * QDBOr$$

Donde:

- GM: cantidad de metano (CH₄ p.e.) generado (m³/año).
- Efi: factor de emisión del reactor anaerobio de agua residual (kg de CH₄ generado/kg de DBO degradada). En este caso, aplica la ecuación 2.
- QDBO: carga orgánica específica (DBO p.e.) que recibe el sistema en el reactor anaerobio que trata en primer lugar el agua residual (kg/año).
- DBOd: fracción de la DBO degradada por el sistema anaerobio; es la eficiencia de remoción de DBO en el tratamiento anaerobio del agua residual. Su valor varía en función de la tecnología anaerobia utilizada.
- S: cantidad de lodo generado (ST p.e.) en el tratamiento aerobio del agua residual, en peso seco (kg/año). Su valor depende del tipo de tecnología aerobia de tratamiento. Nótese que se genera a partir de la DBO remanente en el agua residual después de la etapa de tratamiento anaerobio del agua residual.
- Ss: factor de conversión de materia orgánica en lodos (kg ST/kg DBO).
- QDBOr: carga orgánica remanente (DBO p.e.) que recibe el sistema en la etapa aerobia, después del tratamiento aerobio (kg/año).
- DOC: proporción de materia orgánica contenida en el lodo aerobio generado, en peso seco (kg SV/kg ST). Generalmente se asume un valor de 0,5.
- DOCf: fracción del DOC que se transforma en biogás en la digestión anaerobia. Valor típico: 0,5.
- E fj = factor de emisión del digestor anaerobio de lodos (kg de CH₄ generado/kg de DBO degradada). En este caso, aplica la ecuación 5.

4. Estimación del potencial energético del metano y de la energía eléctrica generable

Con base en el potencial de generación de metano que presentan las PTAR analizadas, es posible generar energía que puede emplearse para la sustitución de fuentes de energía en los procesos desarrollados en la PTAR, y en algunos casos, en la generación de excedentes.

En este sentido, una vez establecido el volumen metano generado al año y el metano aprovechable (ecuación 3), es posible estimar el contenido energético de este metano, la energía eléctrica generable kWh/año y la energía calórica recuperable asociada a la generación eléctrica (co-generación) (kWh/año), con base en estas ecuaciones:

$$9. \quad CEM = GA * PCI$$

$$10. \quad GE_e = CEM * ESG_e$$

$$11. \quad GE_c = CEM * ESG_c$$

Donde:

- CEM: contenido energético del metano captado (kWh/año).
- GA: cantidad de metano (CH_4) aprovechable (m^3).
- PCI: poder calorífico del metano. Valor típico: 9,97 (kWh/año).
- GE_e : energía eléctrica generable (kWh/año).
- GE_c : energía calórica generable (kWh/año).
- ESG_e : eficiencia del sistema generador de energía eléctrica. Se presume un 35% de eficiencia promedio de generación eléctrica³⁰.
- ESG_c : eficiencia del sistema de recuperación de calor. Se presume un 40% de eficiencia promedio de recuperación de calor (enfriamiento del motor y de los gases de escape)³¹.

³⁰ Puede variar entre 20% y 45% según la tecnología y el tamaño del motogenerador.

³¹ Puede variar entre 30% y 50% según la tecnología y el tamaño del motogenerador.

Anexo 3

Detalle de las Inversiones a realizar según las tecnologías empleadas

De acuerdo con las tecnologías reportadas por las 75 PTAR objeto del análisis, y con la metodología de estimación propuesta en el anexo 2, se proponen a continuación las inversiones a las que hay lugar en las PTAR aerobias compactas, en los sistemas lagunares, y en las PTAR anaerobias o duales.

1. Digestión anaerobia de lodos generados en PTAR que emplean tratamiento aerobio (compacto) y primario avanzado, con aprovechamiento de biogás en generación de energía

En las plantas que emplean un tratamiento aerobio de las aguas residuales es posible realizar una serie de inversiones para lograr la digestión anaerobia de los lodos, que permite la generación de metano. Dichas inversiones corresponden a la construcción de un espesador de lodos, un sistema de conducción de dichos lodos, y un digestor de lodos (que se muestran en las columnas 1, 2 y 3 del cuadro A3), que significan entre el 80% y el 89% del total de las inversiones en que habría que incurrir en este tipo de tecnologías, para el aprovechamiento del metano en la generación de energía.

Cuadro A3
Inversiones necesarias para aprovechar el metano generable en las PTAR que emplean tratamiento aerobio (compacto) y primario avanzado de las aguas residuales

Escenario base	Escenario después del proyecto	1	2	3	4	5
Lodos activados convencionales						
Zanjas de oxidación						
Aireación extendida						
Aireación extendida con desnitrificación	Tecnología original + digestión anaerobia de lodos y aprovechamiento de metano	Espesador de lodos aerobios	Bombeo de lodos (tubería, bomba lodos)	Digestor de lodos	Tubería de biogás + soplador centrífugo	Antorcha ("flare")
Filtro percolador/Lecho percolador/Filtro biológico						
Tratamiento primario avanzado						
Escenario base	Escenario después del proyecto	6	7	8	9	10
Lodos activados convencionales						
Zanjas de oxidación						
Aireación extendida						
Aireación extendida con desnitrificación	Tecnología original + digestión anaerobia de lodos y aprovechamiento de metano	Gasómetro de biogás	Sistema de purificación de biogás (demister, desulfurizador, deshumidificador)	Motogenerador a biogás (CHP)	Estación de transformación eléctrica, puesto de conexión a la red	Circuito de aprovechamiento de agua caliente (p.ej calentamiento de digestor de lodos, o secado de lodos)
Filtro percolador/Lecho percolador/Filtro biológico						
Tratamiento primario avanzado						

Fuente: Elaboración propia.

A su vez, los sistemas de ruteo y generación de energía eléctrica (columnas 5, 6, 7, 8) representan entre el 11% y el 20% de los costos de inversión globales en que se incurriría en las tecnologías aerobias.

Finalmente, en cuanto a las inversiones 9 y 10, se anota que deben ser objeto de una posterior revisión por cuanto no se consideran en esta estimación³². Igualmente, se hace la salvedad de que para calcular las inversiones en obras civiles (espesador de lodos y digestor anaerobio de lodos) se tomó como referencia el documento elaborado por la EPA (1985) titulado "Estimación de los costos de gestión de lodos".

El cuadro A4 muestra un valor estimado de las inversiones que han de realizar las PTAR aerobias (compactas), según la tecnología empleada por cada una y la escala de operación. A este respecto es necesario mencionar que las inversiones requeridas por las tecnologías aerobias (compactas), se configuran como las más costosas en términos de persona atendida (USD \$8,29).

Cuadro A4
Costo de inversión estimado para el aprovechamiento del metano generable en las PTAR que emplean tecnologías aerobias (compactas) en el tratamiento de las aguas residuales
(En dólares del 2021)

Escenario base		Capacidad instalada	Total PTAR	Inversión por sistema	Inversión total
Lodos activados convencionales	LAC	Entre 500 y 1 000 l/s	24	2 665 000	63 960 000
		Entre 1 000 y 1 500 l/s	11	4 489 800	49 387 800
		Entre 1 500 y 2 000 l/s	4	6 450 300	25 801 200
		Entre 2 000 y 2 500 l/s	2	6 752 500	13 505 000
		Entre 2 500 y 3 000 l/s	3	8 875 900	26 627 700
		Entre 3 000 y 3 500 l/s	1	9 109 600	9 109 600
Zanjas de oxidación	ZO	Entre 500 y 1 000 l/s	1	2 420 500	2 420 500
Aireación extendida	AE	Entre 500 y 1 000 l/s	2	2 369 700	4 739 400
		Entre 1 000 y 1 500 l/s	1	2 728 700	2 728 700
		Entre 2 000 y 2 500 l/s	1	4 794 400	4 794 400
		Entre 2 500 y 3 000 l/s	1	4 940 100	4 940 100
Aireación extendida con desnitrificación	AE-Dn	Entre 1 000 y 1 500 l/s	1	2 627 300	2 627 300
Filtro percolador/Lecho percolador/Filtro biológico	FP	Entre 500 y 1 000 l/s	3	2 350 500	7 051 500
		Entre 1 500 y 2 000 l/s	1	4 521 000	4 521 000
		Entre 3 500 y 4 000 l/s	1	8 868 800	8 868 800
Total			57		231 083 000

Fuente: Elaboración propia.

2. Adaptación de lagunas anaerobias y conversión de lagunas aerobias en lagunas anaerobias con aprovechamiento de biogás en generación de energía

Como se anotó anteriormente, los sistemas lagunares poseen un importante potencial para implementar esquemas de economía circular que permitan la emisión, captura y aprovechamiento del metano, ya sea en lagunas anaerobias ya existentes pero que no aprovechan el metano, o en lagunas aerobias (que habría que transformar en anaerobias).

En estos sistemas lagunares las inversiones 1, 2 y 3 del cuadro A5 difieren significativamente de las que implican las tecnologías anteriores, por cuanto el metano se genera en el tratamiento de las aguas residuales directamente y, por tanto, no hay lugar a inversiones en la digestión de lodos.

³² La inversión número nueve se refiere al caso específico en que la generación de energía eléctrica es superior al consumo de la PTAR, dado lo cual se tendría un excedente que podría proveerse a las empresas prestadoras del servicio de energía eléctrica. Por su parte, la inversión número diez busca recuperar la energía calórica asociada a la generación eléctrica con el metano captado (cogeneración), que puede ser empleada en el calentamiento del digestor de lodos y en el secado de lodos, entre otros fines.

En este sentido, suponiendo un estado óptimo de operación y la inexistencia de problemas de infiltración en sistemas lagunares anaerobios; la inversión consistiría en cubrir las con materiales que permitan la captura del metano, como el polietileno de alta densidad (PEAD), además de las detalladas en la sección anterior, que corresponden al sistema de ruteo, almacenamiento y limpieza del biogás (véase las columnas 4, 5, 6 y 7 del cuadro A5), y a la dotación de equipos para la cogeneración de energía eléctrica y calórica (véase las columnas 8, 9 y 10 del cuadro A5)³³.

Cuadro A5
Inversiones necesarias para aprovechar el metano generable en las PTAR que operan a partir de sistemas lagunares

Escenario base	Escenario después del proyecto	1	2	3	4	5
Lagunas aireadas-aerobias	Combinación de lagunas anaerobias + recuperación y aprovechamiento de metano	Nota: se presume que las lagunas aerobias o de otros tipos pueden ser modificadas y transformadas en anaerobias con captación de biogás ^a .		Obra civil de rectificación de lagunas existentes (profundización)	Cubierta de PEAD sobre nuevas lagunas anaerobias	Tubería de biogás + soplador centrífugo
Otras combinaciones de lagunas en serie						Antorcha ("flare")
Lagunas anaerobias		Nota: se presume que las lagunas existentes no presentan problemas de infiltración ^b .				
Lagunas anaerobias + Lagunas de otros tipos						
Escenario base	Escenario después del proyecto	6	7	8	9	10
Lagunas aireadas-aerobias	Combinación de lagunas anaerobias + recuperación y aprovechamiento de metano	Gasómetro de biogás	Sistema de purificación de biogás (demister, desulfurizador, deshumidificador)	Motogenerador a biogás (CHP)	Estación de transformación eléctrica, puesto de conexión a la red	Circuito de aprovechamiento de agua caliente (p.ej calentamiento de digestor de lodos, o secado de lodos)
Otras combinaciones de lagunas en serie						
Lagunas anaerobias						
Lagunas anaerobias + Lagunas de otros tipos						

Fuente: Elaboración propia.

^a En casos de intervenciones importantes, se recomienda cobertura impermeable de fondo y superficie.

^b Eventualmente puede ser necesario construir una nueva laguna.

En el caso de las lagunas aerobias, sería necesario incurrir en una inversión adicional para cubrir los costos que implica aumentar su profundidad. Por lo demás, los costos asociados a la cobertura de la laguna (sistema de captura del biogás), el ruteo, almacenamiento y aprovechamiento del biogás son similares a los que demandan las lagunas anaerobias (véase el cuadro A6).

Cuadro A6
Costo de inversión estimado para el aprovechamiento del metano generable en las PTAR que operan a partir de sistemas lagunares
(En dólares del 2021)

Escenario base		Capacidad instalada	Total PTAR	Inversión por sistema	Inversión total
Lagunas aireadas-aerobias	L A	Entre 500 y 1 000 l/s	4	1 360 620	5 442 480
Otras combinaciones de lagunas en serie	L + L	Entre 500 y 1 000 l/s	1	1 360 620	1 360 620
Lagunas anaerobias	L An	Entre 500 y 1 000 l/s	1	1 020 420	1 020 420
Lagunas anaerobias + Lagunas de otros tipos	L An + L	Entre 500 y 1 000 l/s	10	1 020 420	10 204 200
Total			16		18 027 720

Fuente: Elaboración propia.

³³ En cuanto a la inversión relacionada en la columna 6, que corresponde al gasómetro, es necesario notar que esta puede obviarse cuando se emplea en la laguna una cubierta "inflada". Sin embargo, dicha cubierta puede ser susceptible de deteriorarse por causa del viento y de la acumulación de pluviales cuando se desinfla. La opción de cubierta "flotante" suele preferirse porque su diseño prevé el drenaje de pluviales, pero requiere un acumulador externo de biogás.

La gran ventaja que representa la transformación de sistemas lagunares aerobios en anaerobios es que las inversiones que demandan son significativamente más bajas y el factor de generación de metano —una vez desarrollada la inversión— es considerablemente más alto en contraste con los sistemas aerobios compactos.

Un ejemplo que podría ilustrar la diferencia que se plantea, es que la implementación para aprovechar el biogás en un sistema de lodos activados convencional costaría en una PTAR con capacidad entre 500-1.000 l/s aproximadamente USD \$2,7 millones, y se estima que produciría 3,1 m³ de metano por persona atendida. En contraste, un sistema lagunar aerobio con la misma capacidad que se transforme en un sistema lagunar anaerobio con aprovechamiento del biogás, costaría aproximadamente USD \$1,4 millones y se estima que emitiría 6,6 m³ p.e. de metano.

Finalmente, los sistemas lagunares con capacidad de tratamiento superior a los 1.000 l/s tienen áreas muy extensas que hacen inviables las inversiones necesarias para captar el biogás generable en estas lagunas, motivo por el cual su transformación no se tomó en cuenta en el presente documento. Igualmente, por no ser aprovechable el metano generado en los humedales artificiales, tampoco se tomó en cuenta la transformación de estos sistemas.

3. Aprovechamiento de biogás y generación de energía en PTAR con sistemas anaerobios o duales (compactos)

Las inversiones que deben realizarse en las PTAR que actualmente aplican un tratamiento anaerobio a las aguas residuales se diferencian de los casos anteriormente expuestos, pues solo es necesario invertir en los sistemas de ruteo, almacenamiento, purificación del biogás y cogeneración de energía (véase el cuadro A7).

Cuadro A7
Inversiones necesarias para aprovechar el metano generable en las PTAR que emplean tratamiento anaerobio y anaerobio-aerobio (compacto) de las aguas residuales

Escenario base	Escenario después del proyecto	1	2	3	4
Reactor anaerobio de flujo ascendente	Tecnología original + aprovechamiento de metano	Se presume que el RAFA ya existe	Tubería de biogás + soplador centrífugo	Antorcha ("flare")	Gasómetro de biogás
Reactor anaerobio flujo ascendente y lodos activados		Se presume que el RAFA ya existe y recibe los lodos aerobios del sistema de LAC			
Escenario base	Escenario después del proyecto	5	6	7	8
Reactor anaerobio de flujo ascendente	Tecnología original + aprovechamiento de metano	Sistema de purificación de biogás (demister, desulfurizador, deshumidificador)	Motogenerador a biogás (CHP)	Estación de transformación eléctrica, puesto de conexión a la red	Circuito de aprovechamiento de agua caliente (ej. calentamiento de digestor de lodos, o secado de lodos)
Reactor anaerobio de flujo ascendente y lodos activados					

Fuente: Elaboración propia.

Nótese que en este caso no es necesario realizar inversiones en el sistema de captación, por cuanto en el reactor anaerobio es donde se capta el biogás emitido en el proceso de degradación de la materia orgánica. Por consiguiente, en los casos en que se presentan sistemas duales es posible alimentar los reactores anaerobios con los lodos producidos en la etapa aerobia del tratamiento del

agua residual, motivo por el cual no sería necesario estimar inversiones adicionales en el espesador y en el digestor de lodos.

No obstante, como se ha anotado anteriormente, no es frecuente la utilización de tecnologías anaerobias (con amplias capacidades de operación) en el tratamiento de las aguas residuales en la región; por cuanto de la totalidad de PTAR evaluadas, solo dos presentaron tecnologías de tipo RAFA y contaron con capacidades de tratamiento superiores a los 500 l/s (véase el cuadro A8).

Cuadro A8
Costo de inversión estimado para el aprovechamiento del metano generable en las PTAR que emplean tecnologías anaerobias y anaerobias-aerobias (compactas)
(En dólares del 2021)

Escenario base		Capacidad instalada	Total PTAR	Inversión total
Reactor anaerobio flujo ascendente y lodos activados	RAFA + LAC	Entre 500 y 1 000 l/s	1	1 000 300
Reactor anaerobio de flujo ascendente	RAFA/UASB	Entre 1 000 y 1 500 l/s	1	1 030 200
Total			2	2 030 500

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro Ag
Detalle de las inversiones a realizar en las PTAR que emplean tecnologías aerobias compactas
(En dólares del 2021)

Escenario base	Escenario después de proyecto	Capacidad instalada	Espesador de lodos aerobios	Bombeo de lodos (tubería, bomba lodos)									Inversión	
				Digestor de lodos	Soplador centrifugo	Tubería de biogás ^a	Antorcha ("flare")	Gasómetro de biogás	Desulfurizador	Sistema de purificación de biogás (demister, deshumidificador)	Moto-generador a biogás	total		
Lodos activados convencionales	LAC	Lodos activados convencionales + digestión	Entre 500 y 1 000 l/s	330 800	16 500	1 773 600	2 200	17 700	31 300	75 100	19 700	49 300	348 800	2 665 000
	LAC	anaerobia de lodos, aprovechamiento de metano en generación de energía	Entre 1 000 y 1 500 l/s	452 000	22 600	3 424 400	3 300	34 200	36 700	85 900	31 200	50 700	348 800	4 489 800
	LAC		Entre 1 500 y 2 000 l/s	555 300	27 800	5 136 600	6 700	51 400	44 100	89 800	31 200	57 400	450 000	6 450 300
	LAC		Entre 2 000 y 2 500 l/s	647 600	32 400	5 330 100	6 700	53 300	46 700	97 100	31 200	57 400	450 000	6 752 500
	LAC		Entre 2 500 y 3 000 l/s	732 200	36 600	7 106 800	8 300	71 100	52 400	105 700	31 200	66 600	665 000	8 875 900
	LAC		Entre 3 000 y 3 500 l/s	810 900	40 500	7 228 000	10 300	72 300	62 600	106 700	31 200	82 100	665 000	9 109 600
Zanjas de oxidación	ZO	zanjas de oxidación + digestión anaerobia de lodos, aprovechamiento de metano en generación de energía	Entre 500 y 1 000 l/s	295 900	14 800	1 737 200	1 600	17 400	28 400	68 100	17 400	41 700	198 000	2 420 500
Aireación extendida	AE	Aireación extendida + digestión anaerobia de lodos, aprovechamiento de metano en generación de energía	Entre 500 y 1 000 l/s	258 100	12 900	1 661 400	2 200	16 600	31 300	70 600	17 400	41 700	257 500	2 369 700
	AE		Entre 1 000 y 1 500 l/s	352 800	17 600	1 807 000	2 800	18 100	31 300	81 300	19 700	49 300	348 800	2 728 700
	AE		Entre 2 000 y 2 500 l/s	505 400	25 300	3 553 400	3 300	35 500	44 100	87 300	39 400	50 700	450 000	4 794 400
	AE		Entre 2 500 y 3 000 l/s	571 400	28 600	3 614 000	6 700	36 100	44 100	92 400	39 400	57 400	450 000	4 940 100

Escenario base	Escenario después de proyecto	Capacidad instalada	Espesador de lodos aerobios	Bombeo de lodos (tubería, bomba lodos)	Digestor de lodos	Soplador centrífugo	Tubería de biogás ^a	Antorcha ("flare")	Gasómetro de biogás	Desulfurizador	Sistema de purificación de biogás (demister, deshumidificador)	Moto-generador a biogás	Inversión total
Aireación extendida con desnitrificación	AE-Dn Aireación extendida con desnitrificación + digestión anaerobia de lodos, aprovechamiento de metano en generación de energía	Entre 1 000 y 1 500 l/s	352 800	17 600	1 807 000	2 200	18 100	31 300	71 800	19 700	49 300	257 500	2 627 300
Filtro percolador/Lecho percolador/Filtro biológico	FP Filtro percolador/Lecho percolador	Entre 500 y 1 000 l/s	271 100	13 600	1 693 700	1 600	16 900	28 400	68 100	17 400	41 700	198 000	2 350 500
	FP Filtro percolador/Filtro biológico + digestión anaerobia de lodos,	Entre 1 500 y 2 000 l/s	455 100	22 800	3 469 800	2 800	34 700	36 700	81 300	19 700	49 300	348 800	4 521 000
	FP Filtro percolador/Filtro biológico + digestión anaerobia de lodos, aprovechamiento de metano en generación de energía	Entre 3 500 y 4 000 l/s	725 400	36 300	7 106 800	8 300	71 100	52 400	105 700	31 200	66 600	665 000	8 868 800

Fuente: Elaboración propia.

^a Se asume tirada máxima de 50 mts.

Cuadro A10
Detalle de las inversiones a realizar en las PTAR que emplean tecnologías anaerobias
(En dólares del 2021)

Escenario base		Escenario después de proyecto	Capacidad instalada	Obra civil de rectificación de lagunas existentes (profundización)	Cubierta de PEAD sobre lagunas anaerobias	Soplador centrífugo	Tubería de biogás ^a	Antorcha ("flare")	Gasómetro de biogás	Desulfurizador	Sistema de purificación de biogás (demister, deshumidificador)	Moto-generador a biogás	Inversión total
Lagunas aireadas-aerobias	L A	Lagunas anaerobias + recuperación y aprovechamiento de metano	Entre 500 y 1 000 l/s	340 200	447 120	2 800	34 700	36 700	81 300	19 700	49 300	348 800	1 360 620
Otras combinaciones de lagunas en serie	L + L	Combinaciones de lagunas anaerobias en serie + recuperación y aprovechamiento de metano	Entre 500 y 1 000 l/s	340 200	447 120	2 800	34 700	36 700	81 300	19 700	49 300	348 800	1 360 620
Lagunas anaerobias	L An	Lagunas anaerobias + recuperación y aprovechamiento de metano	Entre 500 y 1 000 l/s	No aplica	447 120	2 800	34 700	36 700	81 300	19 700	49 300	348 800	1 020 420
Lagunas anaerobias + Lagunas de otros tipos	L An + L	Lagunas anaerobias + Lagunas de otros tipos + recuperación y aprovechamiento de metano	Entre 500 y 1 000 l/s	No aplica	447 120	2 800	34 700	36 700	81 300	19 700	49 300	348 800	1 020 420
Reactor anaerobio flujo ascendente y lodos activados	RAFA + LAC	Reactor anaerobio flujo ascendente y lodos activados + aprovechamiento de metano	Entre 500 y 1 000 l/s	No aplica	No aplica	8 300	71 100	52 400	105 700	31 200	66 600	665 000	1 000 300
Reactor anaerobio flujo ascendente	RAFA/UASB	Reactor anaerobio flujo ascendente + aprovechamiento de metano	Entre 1 000 y 1 500 l/s	No aplica	No aplica	10 300	72 300	62 600	106 700	31 200	82 100	665 000	1 030 200

Fuente: Elaboración propia.

^a Se asume tirada máxima de 50 mts.



NACIONES UNIDAS

Serie

CEPAL

Recursos Naturales y Desarrollo

Números publicados

Un listado completo, así como los archivos pdf están disponibles en
www.cepall.org/publicaciones

213. Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe, Silvia Saravia Matus, Marina Gil Sevilla, Diego Fernández, Alfredo Montañez, Elisa Blanco, Lisbeth Naranjo, Alba Llavona y Natalia Sarmanto (LC/TS.2022/193), 2022.
212. La institucionalidad y la regulación minera en los países andinos: Bolivia (Estado Plurinacional de), Chile, Colombia, Ecuador y Perú, Rafael Poveda Bonilla (LC/TS.2022/190), 2022.
211. Brechas, desafíos y oportunidades en materia de agua y género en América Latina y el Caribe. Silvia Saravia Matus, Marina Gil Sevilla, Natalia Sarmanto, Elisa Blanco, Alba Llavona y Lisbeth Naranjo, (LC/TS.2022/170), 2022.
210. Soluciones basadas en la naturaleza y la bioeconomía: contribución a una transformación sostenible e inclusiva de la agricultura y a la recuperación pos-COVID-19, Laura Meza y Adrián Rodríguez (LC/TS.2022/43), 2022.
209. Hacia una planificación sostenible para una transición energética justa en América Latina y el Caribe: análisis de mejores prácticas en países seleccionados, Antonio Levy, Diego Messina y Rubén Contreras Lisperguer (LC/TS.2021/130), 2021.
208. Contribución de la bioeconomía a la recuperación pospandemia de COVID-19 en el Uruguay: biotecnología y valorización de subproductos agropecuarios y agroindustriales, Magdalena Borges, Atilio Deana, Lucía Pittaluga, Carolina Balian y Adrián Rodríguez (LC/TS.2021/112), 2021.
207. Desarrollo de indicadores de pobreza energética en América Latina y el Caribe, Rubén Calvo, Nicolás Álamos, Marco Billi, Anahí Urquiza y Rubén Contreras Lisperguer (LC/TS.2021/104), 2021.
206. Oportunidades de la bioeconomía para la recuperación pospandemia de COVID-19: un análisis basado en las recomendaciones de la Misión Internacional de Sabios Colombia 2019, Rafael H. Aramendis y Adrián G. Rodríguez (LC/TS.2021/103), 2021.
205. Políticas regulatorias y tarifarias en el sector de agua potable y saneamiento en América Latina y el Caribe, Diego Fernández, Silvia Saravia Matus y Marina Gil (LC/TS.2021/81), 2021.
204. Análisis comparativo de acciones con enfoque del Nexo Agua-Energía-Alimentación: lecciones aprendidas para los países de América Latina y el Caribe, Bárbara A. Willaarts, Elisa Blanco, Alba Llavona y Diego Martínez, (LC/TS.2021/18), 2021.

RECURSOS NATURALES Y DESARROLLO

Números publicados:

- 213 Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe
Silvia Saravia Matus, Marina Gil Sevilla, Diego Fernández, Alfredo Montañez, Elisa Blanco, Lisbeth Naranjo, Alba Llavona y Natalia Sarmanto
- 212 La institucionalidad y la regulación minera en los países andinos
Bolivia (Estado Plurinacional de), Chile, Colombia, Ecuador y Perú,
Rafael Poveda Bonilla
- 211 Brechas, desafíos y oportunidades de agua y género en América Latina y el Caribe
Silvia Saravia Matus, Marina Gil Sevilla, Natalia Sarmanto, Elisa Blanco, Alba Llavona y Lisbeth Naranjo

