



Ingeniería. Revista de la Universidad de Costa Rica

ISSN: 1409-2441

ISSN: 2215-2652

revista.inii@ucr.ac.cr

Universidad de Costa Rica

Costa Rica

Centeno Mora, Erick; Cruz Zúñiga, Nidia; Vidal Rivera, Paola
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES ORDINARIAS EN COSTA
RICA: PERFIL TECNOLÓGICO Y PERSPECTIVAS DE SOSTENIBILIDAD
Ingeniería. Revista de la Universidad de Costa Rica, vol. 34, núm. 1, 2023
Universidad de Costa Rica
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

DOI: <https://doi.org/10.15517/ri.v34i1.55222>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44176067002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
ENERO/JUNIO 2024 - VOLUMEN 34 (1)





Tratamiento de aguas residuales ordinarias en Costa Rica: perfil tecnológico y perspectivas de sostenibilidad

Ordinary wastewater treatment in Costa Rica: technological profile and sustainability prospects

Erick Centeno Mora ¹, Nidia Cruz Zúñiga ², Paola Vidal Rivera ³

¹ Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Docente e investigador Escuela de Ingeniería Civil, Investigador Centro de Investigación en Desarrollo Sostenible (CIEDES),
email: erick.centenomora@ucr.ac.cr

² Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Docente e investigador Escuela de Ingeniería Civil,
email: nidia.cruz@ucr.ac.cr

³ Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Docente e investigadora Escuela de Ingeniería Civil, Investigadora Centro de Investigación en Desarrollo Sostenible (CIEDES),
email: paola.vidal@ucr.ac.cr

Palabras Clave:

Aguas residuales; depuración de aguas ordinarias; economía circular; sistemas de tratamiento anaeróbico.

Resumen

En Costa Rica, existen grandes desafíos en materia de tratamiento de aguas residuales. Este trabajo evaluó la gestión de aguas residuales ordinarias en Costa Rica, dando énfasis al perfil tecnológico, al uso de sistemas anaeróbicos y a la recuperación de los subproductos generados. Se consideró un abordaje mixto, combinando información secundaria de bases de datos, consultas a expertos y talleres participativos. Se logró evidenciar que la mayoría de los sistemas que existen trabaja con lodos activados y con vertido directo a cuerpo receptor. Además, se evidenciaron brechas importantes para la implementación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, en especial para los sistemas anaeróbicos. Desde el punto de vista técnico, se identificó la falta de capacitación y de confianza en diseñarlos y operarlos, aunado a la relevancia de controlar el tratamiento de contaminantes emergentes; desde el punto de vista económico, se apunta hacia la falta de sostenibilidad financiera de los proyectos y poca capacidad de pago de los usuarios, falta de incentivos o de sistemas tarifarios escalonados; dentro de las brechas institucionales, la principal es la necesidad de tener una rectoría más clara del sector y evitar la duplicidad de funciones. Se demostró que lo anterior requiere ir ligado de una normativa robusta y clara, que permita la innovación en los sistemas a implementar. Finalmente, se pudo detectar que, para que el principio de economía circular sea una realidad, se requiere trabajar en un cambio cultural y en romper el paradigma de que las aguas residuales solo sirven para desecharlas.

Recibido: 23/05/2023

Aceptado: 15/08/2023

Keywords:

Anaerobic treatment systems; circular economy; municipal wastewater treatment; sewage;

Abstract

In Costa Rica, there are significant challenges regarding wastewater treatment. This study evaluated the management of municipal wastewater in Costa Rica, with emphasis on the technological profile, the use of anaerobic systems, and the recovery of generated by-products. A mixed approach was used, combining secondary information from databases, expert consultations, and participatory workshops. It was found that most existing systems work with activated sludge and direct discharge to receiving bodies. Additionally, significant gaps were identified for the implementation of anaerobic systems for wastewater treatment. From a technical standpoint, the lack of training and confidence in designing and operating these systems was noted, along with the relevance of controlling the treatment of emerging contaminants. From an economic standpoint, the lack of financial sustainability of projects, low capacity for user payment, and lack of incentives or tiered tariff systems were identified. Within institutional gaps, the main issue was the need for clearer sectoral leadership and avoiding duplication of functions. All the above requires robust and clear regulations that allow for innovation in the systems to be implemented. Finally, it was found that, for the circular economy principle to become a reality, cultural change is required, and the paradigm that wastewater is only meant for disposal must be changed.

DOI: 10.15517/ri.v34i1.55222



1. INTRODUCCIÓN

Costa Rica posee décadas de rezago en infraestructura de saneamiento en aguas residuales y el Gobierno pretende cerrar esta brecha hacia el 2045 [1]. La selección de las tecnologías de tratamiento y la gestión de los subproductos generados son aspectos clave para garantizar un saneamiento sostenible y universal. Según el Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados de Costa Rica (AyA), en el país, existe un rezago de varias décadas en inversión en infraestructura para el tratamiento de aguas residuales (alcantarillado sanitario y plantas de tratamiento de aguas residuales, referidas en este artículo por el acrónimo “PTAR”), y menos de un 15 % de la población trata sus aguas residuales en una PTAR [1]. Más del 75 % trata sus aguas de manera individual [2], por medio de un tanque séptico seguido de infiltración al terreno, opción que no es técnica y ambientalmente adecuada en muchas zonas del país. Aunque esta última técnica está bien estudiada y consolidada en la literatura para sistemas descentralizados [3], en Costa Rica, se ha usado de manera indiscriminada, incluso en áreas urbanas con limitaciones de espacio para drenajes, en zonas de suelos no aptos o con riesgo de contaminación de los acuíferos. En ese sentido, es urgente invertir en alcantarillado sanitario y PTARs en Costa Rica.

Desde una perspectiva clásica, el tratamiento de las aguas residuales puede definirse como la descontaminación o remoción de contaminantes del agua, tras ser usada en alguna actividad humana, hasta alcanzar una calidad compatible con su descarga en el ambiente [4]. Existen diferentes formas de clasificar las aguas residuales, dependiendo del país en que se analicen. Según la reglamentación costarricense [5], las aguas residuales se pueden clasificar en ordinarias (de origen municipal o doméstico), y especiales (industriales, agrícolas u otras). La investigación realizada se centró solamente en el tratamiento de las aguas residuales ordinarias, con énfasis, principalmente, en el tratamiento secundario o biológico. En este proceso, la remoción de materia orgánica (y en ocasiones nutrientes como fósforo y nitrógeno) se lleva a cabo por medio de reactores biológicos que utilizan microorganismos (bacterias, protozoarios, algas) para descontaminar las aguas residuales [6]. Existen muchos tipos de procesos biológicos (tratamiento secundario) para la remoción de materia orgánica; diversas clasificaciones de los procesos biológicos están disponibles en la literatura [7]–[9]. Para esta investigación, interesa la clasificación según el tipo de metabolismo de los microorganismos: metabolismo aeróbico y metabolismo anaeróbico.

Publicaciones previas en este tema [10], [11] puntualizan que, para la baja proporción de aguas residuales que se trata en PTARs, existe una predominancia muy significativa de sistemas aeróbicos para el tratamiento de las aguas residuales en el país, específicamente con la tecnología de lodos activados (presente en más del 90 % de las PTARs), en contraste con otros países donde los sistemas anaeróbicos son una opción ampliamente utilizada, tales como México, Colombia y Brasil, entre otros [12], [13]. Sin embargo, a la fecha, no se ha intentado explicar la razón de esta tendencia, ni tampoco se ha profundizado en la percepción de la comunidad técnica en relación con el aprovechamiento de

los subproductos generados durante el tratamiento de las aguas residuales ordinarias. Es importante mencionar que los sistemas anaeróbicos han sido muy estudiados en los últimos treinta años y que poseen diversas ventajas sobre los sistemas aeróbicos (como los lodos activados), tales como [14]–[17]: menor producción de lodo; menor consumo energético; generación de biogás, el cual es energéticamente valorizable; menores costos operativos; mayor simplicidad en la operación y mantenimiento debido a la ausencia de equipos mecanizados. Sin embargo, normalmente es necesario que el sistema anaeróbico cuente con un postratamiento aeróbico para cumplir con los requisitos de calidad del efluente antes de su vertido a un cuerpo hídrico.

El objetivo de este artículo es analizar la situación del tratamiento de aguas residuales ordinarias en Costa Rica desde una perspectiva tecnológica, con un especial énfasis en el estudio de las tecnologías de tratamiento anaeróbico y la recuperación de subproductos como energía, agua y nutrientes a partir de las aguas residuales. Para ello, se analizó información de diversas bases de datos y se consultó sobre el tema a expertos técnicos y académicos en la materia. Con este trabajo se pretende analizar las tendencias tecnológicas del tratamiento de aguas residuales ordinarias en el país, profundizando en las razones que podría explicarlas y puntualizando sobre algunas acciones para promover el uso de tecnologías anaeróbicas en el país y la recuperación de subproductos a partir de las aguas residuales.

2. METODOLOGÍA

Se plantearon dos etapas de recopilación de información y triangulación de esta, las cuales se complementan con el fin de contar con una mejor perspectiva de la realidad de tratamiento de aguas residuales ordinarias en el país al año 2022.

2.1 *Análisis de bases de datos de aguas residuales*

Se analizaron tres bases de datos de instituciones públicas relacionadas con la gestión de las aguas residuales ordinarias en Costa Rica: proyectos de PTARs, tramitadas en el sistema Administrador de Proyectos Constructivos (APC) desde el 2011 hasta finales del 2021 [18], PTARs revisadas por AyA desde el 2011 hasta el 2018 para aprobación (urbanizaciones y condominios) [19], y datos operacionales del Sistema de Registro de Reportes Operaciones de Aguas Residuales (SIRROAR) durante el año 2021 [20]. El foco de análisis principal fue la comparación de las distintas variables en función del tipo de tecnología de tratamiento biológico.

En el caso de la base de APC, se filtraron todos los proyectos que compartían información (plano de catastro, año) con la base de AyA, permitiendo cruzar ambas bases de datos y asignar costos de los proyectos según las distintas tecnologías de tratamiento, entre otras informaciones analizadas.

Para la base de SIRROAR, se consideraron únicamente los casos con aguas residuales ordinarias, revisando cada línea para verificar las actividades (según su código de Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las Actividades Económicas

vigente en el país, CIUU) y eliminar cualquier caso que presentara inconsistencias para depurar la base. Se consideró únicamente la información del año 2021 porque fue a partir de ese año que se incorporó en los reportes operacionales la opción de seleccionar la tecnología de tratamiento, información que era requerida para los análisis que se realizaron.

Los valores obtenidos para distintas variables fueron comparados por medio de pruebas estadísticas no paramétricas (Test de Kruskal-Wallis para comparación de medianas en poblaciones independientes, con comparación múltiple de Dunn posterior, considerando el 5 % de significancia en ambos casos).

Cabe mencionar que la clasificación de las tecnologías en ambas bases de datos (AyA-APC y SIRROAR) varió debido a diferencias de homogeneidad entre ambas fuentes, aunque se logró una comparación equivalente en términos de sistemas aeróbicos y anaeróbicos.

2.2 Consultas a la comunidad técnica y científica

La fase de consultas se realizó mediante un cuestionario en línea que fue enviado a la base de datos de expertos en saneamiento del país, considerando distintos actores relacionados con el tema: técnicos de instituciones involucradas en el tema, aporte de expertos académicos en el tema de diversas universidades estatales y privadas, listado de especialista en ingeniería sanitaria del CFIA, listado de empresas de saneamiento y profesionales en consultoría habilitados en el Ministerio de Salud para realizar reportes operacionales de PTAR, y aporte de colegas que respondían el

instrumento y recomendaban más personas que podrían aportar al tema. Este fue un segundo reto detectado para el país, ya que no existen registros centralizados o homogéneos de las personas técnicas o profesionales con conocimiento en tratamiento de aguas residuales, dicha construcción también es un aporte importante de la presente investigación.

Una vez construida la base de datos para consulta, se recolectó la percepción de la comunidad técnica durante un periodo de dos meses, mediante un cuestionario en línea. El instrumento se construyó con el fin de indagar la incidencia de diversas perspectivas y posturas de los actores relacionados con el tratamiento de las aguas residuales ordinarias en Costa Rica, con énfasis en los tratamientos por vía anaeróbica. Los temas consultados fueron:

- conocimiento teórico y técnico con relación a la digestión anaeróbica y a su aplicación al tratamiento de las aguas residuales ordinarias;
- experiencias previas con PTARs ordinarias con reactores anaeróbicos;
- principales problemas / limitaciones del uso de la tecnología anaeróbica en el país;
- principales ventajas / potenciales del uso de la tecnología anaeróbica en el país;
- interés académico y/o profesional en el desarrollo de la tecnología anaeróbica para el tratamiento de aguas residuales en Costa Rica.

El CUADRO I presenta la estructura general que se utilizó para desarrollar el cuestionario:

CUADRO I.
Estructura de la encuesta para recopilación de los datos
para la construcción del perfil técnico de tratamiento anaeróbico en el país

Sección	Contenido
Introducción	Descripción de la encuesta, con objetivos del proyecto de investigación, importancia de la participación, cláusula de confidencialidad de la información, tiempo estimado requerido para completar la encuesta y agradecimiento.
Información general	Datos generales de la persona encuestada: tipo de actor, edad, nivel de estudios formales, cargo o funciones profesionales, tiempo de laborar.
Experiencia en PTARs ordinarias con reactores anaeróbicos	Experiencias (académicas, profesionales o de otro tipo) que la persona encuestada ha tenido con esta tecnología previamente.
Debilidades / Fortalezas de los sistemas anaeróbicos	Percepción de la persona encuestada sobre el uso de la tecnología, abordando temas como calidad del efluente, necesidad de un postratamiento, consideraciones operacionales, riesgos ambientales, entre otros.
Investigación y Desarrollo (I + D) tecnológico en sistemas anaeróbicos	Consulta sobre interés y posibilidad de participar en proyectos de I+D en sistemas anaeróbicos.
Cierre	Espacio para dar comentarios adicionales y contacto. Formato abierto de opinión.

La encuesta se envió vía correo electrónico al público meta por medio de la aplicación *Google Forms*. En el comunicado de participación y en la primera sección del instrumento, se indicó a los participantes el compromiso con la confidencialidad de los

datos. Además, se incluyó en la encuesta un apartado para que cada participante de su consentimiento informado de participación.

Esta consulta a la comunidad técnica arrojó una muestra de 116 personas, con rangos de edades muy diversos, donde el

67 % cuentan con 36 años o más, en su mayoría son hombres (70 %), con grado de estudios de posgrado universitario (51,7 %), y un 72,4 % respondieron que el área de saneamiento es su ocupación principal.

En una segunda parte de esta etapa, se procedió a realizar un proceso de triangulación de la información recopilada con un grupo de expertos en el campo disciplinar del saneamiento (43 personas técnicas y académicas), con el fin de presentar los resultados obtenidos tanto del análisis de las bases de datos de sistemas existentes como de la primera parte de la consulta a expertos (cuestionario en línea) para validar la información disponible. Al mismo tiempo se utilizó este espacio para indagar sobre las brechas que existen en el país para alcanzar un saneamiento más universal e impulsar la economía circular aplicable a aguas residuales. Este abordaje se trabajó mediante

un taller de reflexión, que utilizó como técnicas de recopilación de información la lluvia de ideas y el método Delphi para trabajo en grupos por afinidad profesional o académica, este último se trabajó mediante tres preguntas generadoras y con un espacio amplio para discusión, a saber:

- ¿Cuál es la principal limitación que existe en el país para un potencial aprovechamiento energético de los sistemas de tratamiento de aguas residuales?
- ¿Cuál es la principal limitación que existe en el país para un potencial aprovechamiento de subproductos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales?
- ¿Cómo considera usted que percibiría la población en general el aprovechamiento de estos sistemas?

En la **Fig. 1** se muestran algunas fotografías del taller realizado el día 18 de noviembre de 2022.



Fig. 1. Fotografías del taller Jornada de reflexión académica “Saneamiento sostenible y universal en aguas residuales en Costa Rica”.

Los resultados de ambas técnicas se procesaron mediante un análisis cuantitativo con dimensiones preestablecidas y emergentes. Finalmente, se compararon los resultados de la recopilación de información por los diferentes medios y se establecieron las principales similitudes y conclusiones de esta primera fase de la investigación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 *Análisis de bases de datos con información de la gestión de las aguas residuales ordinarias en Costa Rica*

La **Fig. 2** muestra la distribución de la cantidad de PTAR por provincia, tipo disposición del efluente tratado y caudal. Para las PTARs registradas en el sistema de trámite de construcción APC-AyA (correspondientes a los gráficos (a), (c) y (e)) y en el

sistema de reportes operacionales (SIRROAR) del Ministerio de Salud (correspondientes a los gráficos (b), (d) y (f)).

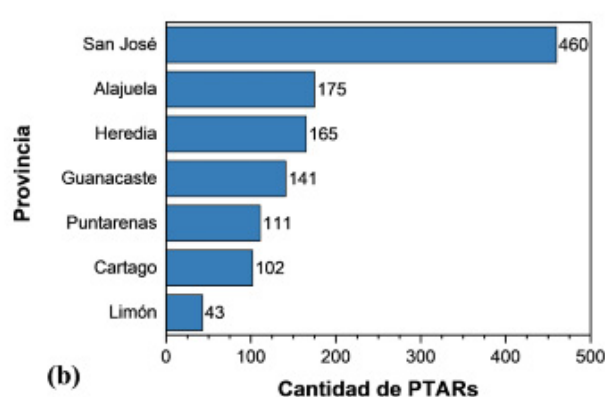
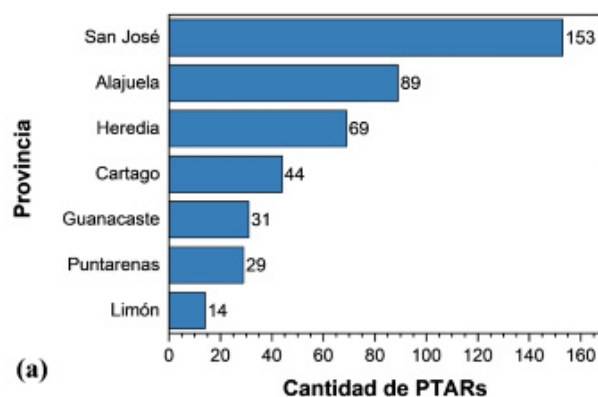
En el sistema APC, desde el año 2011 hasta el 2018, se tramitaron 429 PTARs, mientras que en el sistema SIRROAR, para el año 2021, se reportaron los datos operacionales de 1196 PTARs. Esta diferencia puede deberse a dos razones principales: (i) el año de corte de las bases de datos disponibles, considerando que para el sistema APC no se tenían datos para el periodo 2019 a 2021; (ii) la base de revisión de PTARs de APC-AyA reporta únicamente los proyectos que deben ser aprobados por estas instancias, correspondientes a sistemas de tratamiento para urbanizaciones y condominios. Muchas otras PTARs ordinarias son construidas para proyectos de otra naturaleza: instituciones públicas, oficinas, hoteles, desarrollos comerciales, entre otros. Estas últimas PTARs no pasan por la revisión de AyA, pero sí deben entregar reportes operacionales, según las disposiciones del Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales (DE-33601-S-MINAE).

Como se observa en las **Fig. 2a y 2b**, ambas bases de datos muestran una clara tendencia a concentrar los sistemas de tratamiento en las provincias centrales (San José, Alajuela, Heredia), que también son las que concentran la mayor cantidad de población y de desarrollos residenciales. En el caso de Guanacaste, aunque se han tramitado menos PTARs en el sistema APC-AyA, sí existe una gran cantidad de sistemas en operación, posiblemente de hoteles que no son tramitados en AyA, pero sí entregan reportes operacionales.

Cuando se observan las **Fig. 2c y 2d**, es posible identificar que la gran mayoría de PTARs revisadas por AyA en APC y en operación en el año 2021 disponen del efluente tratado en cuerpos de agua superficial (73 % y 75 % para ambas bases de datos, respectivamente), seguido por el reúso del efluente tratado (21 % y 20 %, respectivamente). En ese sentido, es de esperar que la mayoría de los efluentes de las PTARs sean enviados a cuerpos receptores superficiales que deberán estar en capacidad de asimilar la carga contaminante afluente y apenas una quinta parte de los sistemas estarían generando alguna forma de ayudar a la circularidad al reducir la demanda por recursos hídricos en el país. Con respecto a los tipos de reúso más comunes, un análisis más detallado de la base de datos de SIRROAR (no mostrado en la **Fig. 2**) permite concluir que el tipo de reúso más común es el urbano (tipo 1, según el DE-33601-S-MINAE), con 67 % de los casos, seguido por el riego con acceso restringido (tipo 2), con 18 % de los casos. El reúso paisajístico (tipo 7) fue considerado en 6 % de los casos de reúso, mientras que el reúso agrícola en cultivos no alimenticios (tipo 5) fue considerado en tan solo 1,3 % de los casos de reúso. Los otros tipos de reúso: agrícola en cultivos alimenticios (tipos 3 y 4), recreativo (tipo 6) y construcción (tipo 8) fueron considerados en menos de 0,4 % de los casos o no fueron considerados del todo. Al considerar el bajo porcentaje del agua reusada en la agricultura, es posible afirmar que algunos componentes del agua tratada (nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio) no están siendo recuperados ni aprovechados para cerrar ciclos en las comunidades.

Con respecto a las **Fig. 2e y 2f**, en este análisis, no se graficaron dos PTARs de gran capacidad para no distorsionar la forma de los gráficos: la PTAR de Los Tajos (caudal promedio

de 49 752 m³/d en el 2021) y el emisario submarino de Limón (caudal promedio de 8593 m³/d en el 2021). Ambos gráficos permiten constatar que una gran cantidad de PTARs son de caudales inferiores a 200 m³/d (2,3 L/s), 80 % para las PTARs tramitadas ante AyA y 90 % de las PTARs operadas en el 2021. Esta concentración de PTARs de pequeña capacidad ya había sido reportada en Centeno Mora y Murillo Marín (2019) [10] para la base de datos en APC y, en este estudio, se muestra que este comportamiento se mantiene, de forma aún más intensa, en los datos operacionales de las PTARs. A nivel operativo, en el 2021 se reportó un caudal total tratado de aguas residuales ordinarias de 126 128 m³/d (1,46 m³/s), de los cuales 39 % y 7 % corresponden a la PTARs Los Tajos y al emisario submarino de Limón, respectivamente. El restante 99,8 % de las PTARs registradas en SIRROAR (1194 sistemas) recibieron el 54 % de las aguas residuales ordinarias que son tratadas en sistemas colectivos en el país. La Fig. 2f muestra que en el 2021 hubo poco menos de 600 PTARs (50 % del total) con un caudal de operación menor a 20 m³/d, mostrando la tendencia marcada hacia la predominancia de pequeños sistemas. Por último, al considerar una población al año 2021 de 5 163 021 habitantes [21] y una producción promedio de aguas residuales de 160 L/p-d [22], considerando un factor de retorno de 0,80 sobre la dotación neta reglamentaria, la producción promedio de aguas residuales estaría en torno a 826 083 m³/d (9,56 L/s). El caudal de agua residual ordinaria tratada en PTARs y reportada durante el 2021 equivaldría a aproximadamente 15,3 % del total de agua residual ordinaria generada, lo que está muy cerca del 15,2 % presentado en otros documentos oficiales de AyA [23]. Del total de agua residual ordinaria tratada registrada en SIRROAR en el año 2021, y que fue vertida en cuerpos hídricos superficiales, un 36 % cumplió con todos los límites de vertido establecidos en la reglamentación [5]. Al desconsiderar la PTAR Los Tajos (el emisario de Limón no se consideró en la anterior estimación al no tener límites de vertido específicos), este valor asciende a aproximadamente 72 %, lo que muestra que una buena parte del caudal tratado, y de las PTARs ordinarias, tienen problemas para cumplir con los límites de vertido.



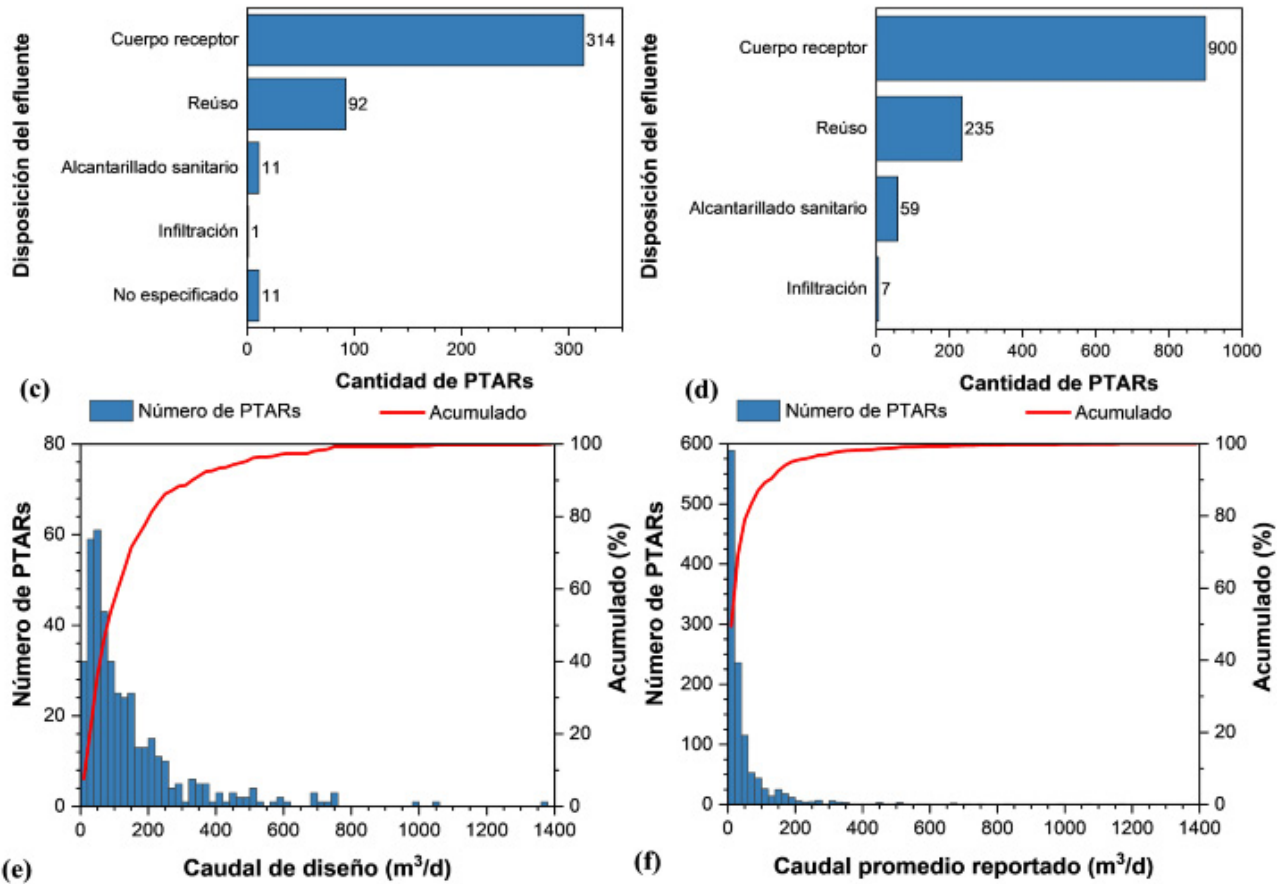


Fig. 2. Provincia, tipo de disposición del efluente tratado y caudal de las PTARs ordinarias en Costa Rica: (a), (c), (e) tramitadas en APC (2011 a 2018); (b), (d), (f) reportadas en SIRROAR durante el año 2021.

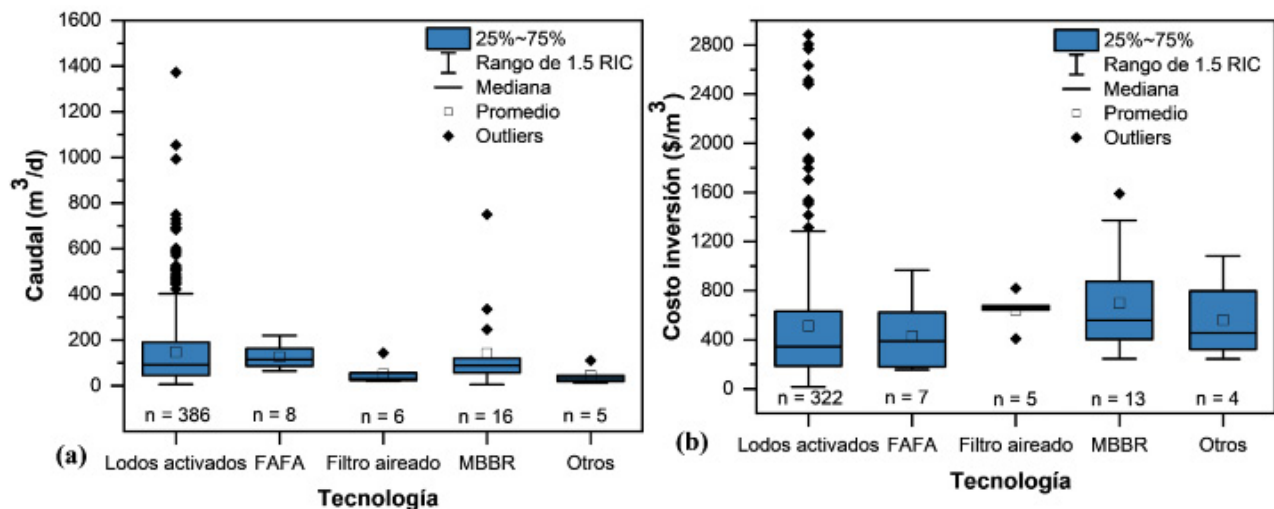


Fig. 3. Análisis por tecnología del sistema reportado en APC (2011 a 2018): (a) distribución de caudales de diseño, (b) costos de inversión reportado por metro cúbico de capacidad del sistema.

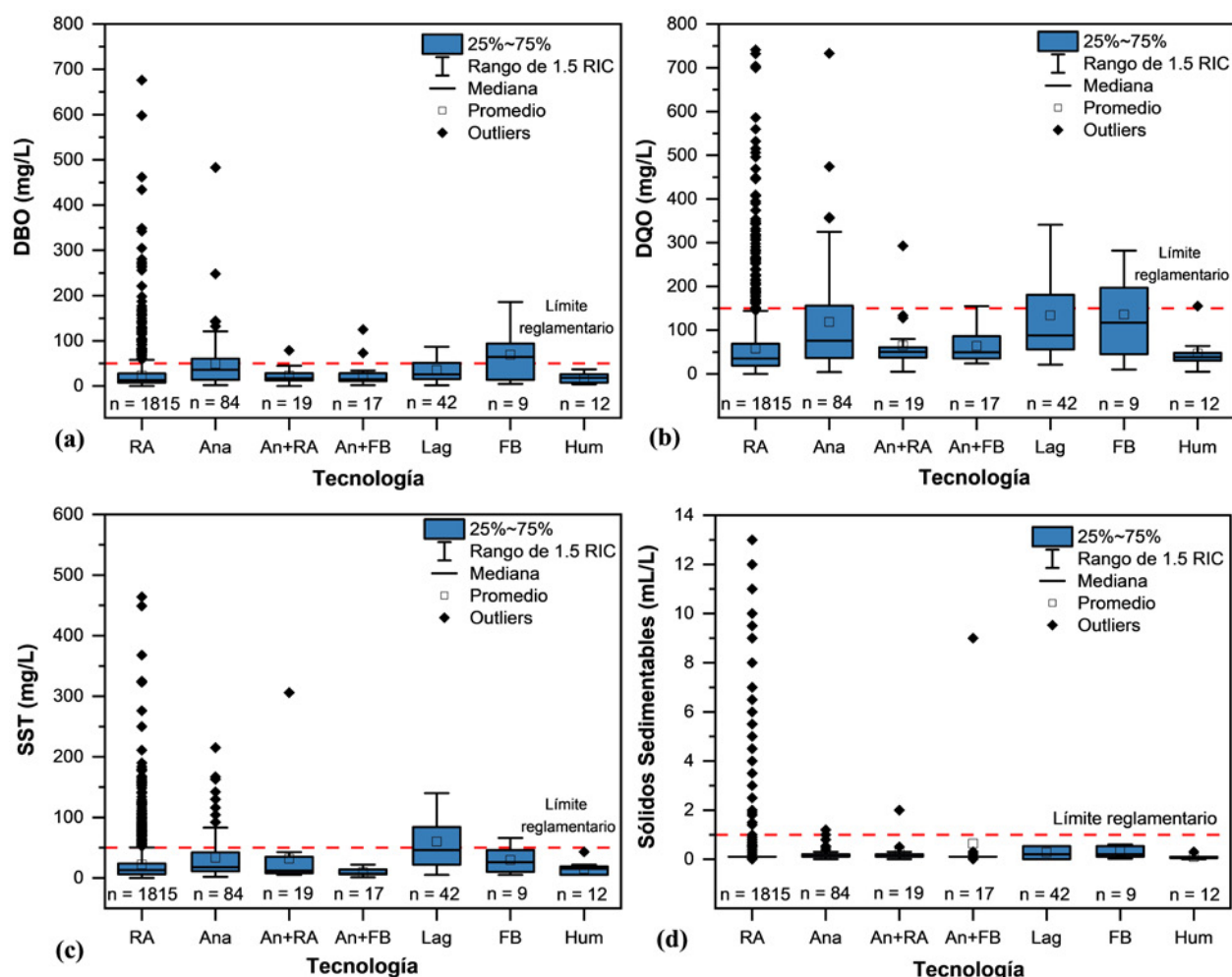
Nota. FAFA: Filtro anaeróbico de flujo ascendente; MBBR: Moving bed biorreactor, en español biorreactor de lecho móvil.

La **Fig. 3** muestra un análisis por tecnología (tratamiento biológico) de la capacidad de las PTARs tramitadas en APC que fueron revisadas en AyA (residenciales, urbanizaciones) y los costos unitarios de inversión reportados por los encargados de tramitar la construcción en APC.

La **Fig. 3** muestra la gran cantidad de sistemas de lodos activados (reactor aeróbico) tramitados con respecto a las otras tecnologías (92 % de los casos), también es clave para este análisis ver que se cuenta con apenas 2 % de sistemas anaeróbicos (filtro anaeróbico de flujo ascendente, FAFA). Con respecto a la distribución de los caudales, la **Fig. 3a** sugiere que no hay diferencia en la distribución de caudales y que todas las tecnologías presentan valores medianos cercanos a los 100-150 m³/d, lo que fue confirmado por medio de una prueba estadística de comparación múltiple de medianas ($p > 0,21$ para todas las comparaciones una a una). Con respecto a los costos por metro cúbico de capacidad diaria, la **Fig. 3b** sugiere que los costos unitarios también son similares, con valores un poco superiores para la tecnología de filtro aireado. Al realizar las pruebas estadísticas de comparación de medianas de Kruskal-Wallis, se concluyó que no existe evidencia estadística, para una significancia de 5 %, de que las medianas de los costos por metro cúbico diario registrados para cada tecnología sea diferente (p

$= 0,0504$). A pesar de que en las bases de datos consultados no hay registro de costos de operación y mantenimiento, diversas fuentes de la literatura [6], [24], [25] confirman que los sistemas de lodos activados y sus variantes tienden a ser más costosos que otras opciones anaeróbicas con postratamiento aeróbico, a causa de los requerimientos energéticos para la aireación y a la mayor producción de lodo, mientras que opciones como las lagunas y los humedales artificiales tienden a presentar los menores costos de operación y mantenimiento, aunque sus demandas de áreas son significativamente mayores.

La **Fig. 4** muestra el análisis por tecnología de tratamiento biológico de los distintos parámetros de calidad establecidos en el Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales (DE-33601-S-MINAE). Nótese que el agrupamiento por tecnologías fue distinto al presentado en la **Fig. 3**, debido a divergencias entre ambas bases de datos analizadas. Para este análisis, se excluyeron los reportes que solamente tenían tratamiento primario y/o pretratamiento (ya que el objetivo de esta investigación es analizar los sistemas de tratamiento biológico secundario) y solo se consideraron los que tenían como método de disposición final el vertido a cuerpo receptor, que se rigen con los criterios de calidad de vertido más estrictos que cuando se permite el vertido a alcantarillado sanitario o reúso (para un total de 1998 reportes operacionales).



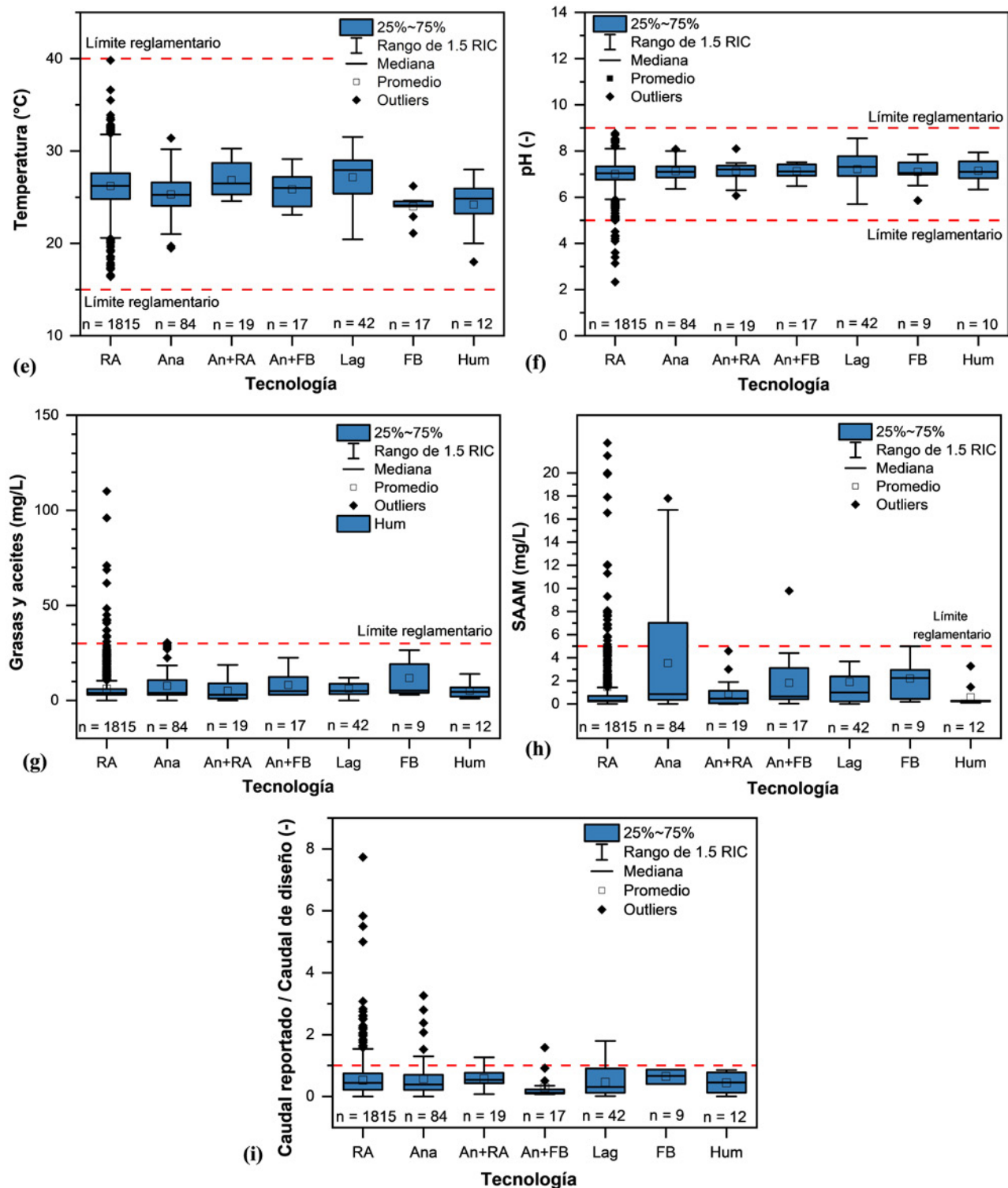


Fig. 4. Análisis de las características del efluente de las PTARs en operación por tipo de tecnología, según la base de datos de SIRROAR (año 2021): (a) DBO; (b) DQO; (c) SST; (d) Sólidos Sedimentables; (e) Temperatura; (f) pH; (g) Grasas y aceites; (h) SAAM; (i) Caudal reportado / caudal de diseño de la PTAR.

Nota. RA: reactor aeróbico; Ana: reactor anaeróbico solo; An + RA: reactor anaeróbico seguido de un reactor aeróbico; Lag: sistema lagunar; FB: filtro biológico; Hum: humedal artificial.

La **Fig. 4** muestra la gran preponderancia de reactores aeróbicos, asociados principalmente a sistemas de lodos activados, con más de 90 % de los reportes. Los sistemas anaeróbicos solos (posiblemente filtros anaeróbicos de flujo ascendente, FAFA) representan apenas un 4 % de la muestra, y las otras tecnologías de tratamiento secundario están en porcentajes aún menores. En el caso de los filtros biológicos, el análisis de la base de datos no permite dejar claro el tipo de sistema al que se refieren, y podría ser un filtro percolador, un FAFA, un biofiltro aireado sumergido o incluso un humedal artificial, considerando que el término filtro biológico es muy general y se puede asociar a cada una de estas tecnologías; por ese motivo, se decidió analizarlo como un grupo aparte. La **Fig. 4** permite observar que una serie de parámetros fisicoquímicos son cumplidos en casi el 100 % de los casos, sin importar el tipo de tecnología de tratamiento biológico: sólidos sedimentables, pH, temperatura y grasas y aceites. En estos parámetros, no se registró una diferencia estadísticamente significativa (α de 5 %, prueba de comparación múltiples de medianas, posterior a la prueba de Kruskal-Wallis) para los sólidos sedimentables ($p > 0,32$ para todas las comparaciones múltiples) de las distintas tecnologías. Para el pH, únicamente se obtuvo una diferencia estadísticamente significativa ($\alpha = 5 \%$) entre la mediana de los sistemas de reactor aeróbico y los sistemas lagunares (resultó mayor el pH para los sistemas lagunares). En el caso de las grasas y aceites, las pruebas no mostraron diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 5 \%$) entre las medianas para cada tecnología ($p > 0,18$ para todas las comparaciones múltiples de medianas).

Para los parámetros de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendedos Totales (SST) y Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM), la Fig.4 muestra que las tecnologías Reactor Anaerobio solo, Lagunas y Filtros Biológicos presentaron problemas para cumplir con los límites de vertido en muchos de los casos reportados. Es importante recordar que, para el caso de los sistemas lagunares facultativos, el Reglamento de Vertido y Reúso (DE-33601-S-MINAE) establece un límite de 150 mg/L para los SST, considerando la presencia de algas en el efluente. Este límite sí fue cumplido para más del 95 % de los datos registrados de sistemas lagunares. En el caso de la DBO, se observaron únicamente las siguientes diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 5 \%$) entre las medianas de las tecnologías

comparadas: RA < Ana ($p < 10^{-6}$), y RA < Lag ($p = 0,0016$). Para la DQO: RA < Ana ($p < 10^{-6}$), y RA < Lag ($p < 10^{-6}$). Para los SST: RA < Ana ($p = 0,008$), RA < Lag ($p < 10^{-6}$), Ana > Ana + FB ($p = 0,007$), Ana < Lag ($p = 0,013$), Ana + RA < Lag ($p = 0,003$), Ana + FB < Lag ($p = 10^{-6}$), y Hum < Lag ($p = 0,005$). Por lo tanto, el análisis muestra un efluente de peor calidad para los sistemas anaeróbicos solos, los sistemas lagunares y los filtros biológicos, en términos de DBO, DQO, SST y SAAM. Por último, con respecto a la Fig. 4i, el gráfico muestra que, para todas las tecnologías de tratamiento biológico comparadas, la gran mayoría de los reportes (más del 75 % en todos los casos) reportan un caudal inferior al de diseño, con medianas de la relación $Q_{\text{reportado}}/Q_{\text{diseño}}$ que varían entre 0,40 y 0,70 para todas las tecnologías. Esto muestra que en la gran mayoría de los casos los sistemas están sobredimensionados, lo que genera posiblemente ineficiencias a nivel de inversión inicial y posibles dificultades a nivel de operación, debido a dificultades para cumplir con tiempos de retención hidráulicos, relaciones de carga y biomasa, entre otros [7]. La razón de este sobredimensionamiento de las PTARs no está clara. Sin embargo, es posible que se deba a una de las siguientes condiciones o a una combinación de estas: (i) los sistemas no alcanzan su población de diseño proyectada, debido a consideraciones muy conservadoras durante la fase de planeación; (ii) las contribuciones per cápita de agua residual utilizadas para la estimación de los caudales son muy elevadas, lo que produce valores de diseño muy conservadores; (iii) no se planifica un crecimiento por etapas para las PTARs, lo que genera caudales muy bajos en las primeras etapas de los sistemas. Con respecto al punto (ii), es importante mencionar que en la última versión de la norma técnica para diseño de sistemas de abastecimiento de agua potable, de saneamiento y pluvial de AyA (versión del 2021) [22] se redujeron los valores de las dotaciones de agua potable de diseño, lo que confirma que los valores propuestos antes de esta modificación eran muy elevados (hasta 300 L/persona-día y ahora es de 250 L/p-d para zonas urbanas, por ejemplo).

El CUADRO II muestra el porcentaje de cumplimiento de los distintos parámetros de vertido, según las distintas tecnologías comparadas, para las PTARs ordinarias que vertieron sus efluentes en cuerpos superficiales, considerando los límites de vertido establecidos en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales (DE-33601-S-MINAE).

CUADRO II.
Cumplimiento de los parámetros de vertido para las distintas tecnologías, según los reportes operacionales del año 2021, para las PTARs ordinarias

Tecnología	n	Cumplimiento de cada parámetro (%)								Todos
		DBO	DQO	SST	SSed	Temp	pH	Grasas y aceites	SAAM	
Reactor aeróbico	1816	94,5	95,4	93,6	95,6	100,0	99,4	98,8	98,1	88,2
Anaeróbico solo	84	71,4	73,8	84,5	98,8	100,0	100,0	98,8	72,6	59,5
Anaeróbico + FB	17	88,2	94,1	100,0	94,1	100,0	100,0	100,0	94,1	82,4
Anaeróbico + RA	19	94,7	94,7	94,7	94,7	100,0	100,0	100,0	100,0	94,7
Sistemas lagunares	42	73,8	59,5	97,6a	97,6	100,0	97,6	100,0	90,5	45,2
Filtro biológico	9	33,3	55,6	88,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	33,3
Humedal artificial	12	100,0	91,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	91,7

Nota. FB: filtro biológico; RA: reactor aeróbico; DBO: demanda biológica de oxígeno; DQO: demanda química de oxígeno; SST: sólidos suspendidos totales SSed: sólidos sedimentables; Temp: temperatura; SAAM: sustancias activas al azul de metileno.

a considerando el límite de 150 mg/L para lagunas facultativas.

El CUADRO II confirma algunos de los resultados presentados en la **Fig. 4**. Con respecto al cumplimiento de los parámetros de vertido, ninguna de las tecnologías estudiadas reportó 100 % de eficacia, sin embargo, cabe destacar que los sistemas anaeróbicos solos, los sistemas lagunares y los filtros biológicos poseen porcentajes de cumplimiento bastante menores (59 %, 45 % y 33 %, respectivamente). Los datos evidencian que los parámetros de más difícil cumplimiento son la DBO, DQO y SAAM en los sistemas anaeróbicos. Esto demuestra que estas tecnologías podrían requerir un pulimento o postratamiento con el fin de cumplir con los límites nacionales con mayor holgura. En el caso de los sistemas anaeróbicos, la literatura suele recomendar el uso de un postratamiento aeróbico[6]: lodos activados, filtro percolador, biofiltro aireado sumergido, entre otros. En este sentido, el análisis de los datos mostró que el sistema Anaeróbico + RA (reactor aeróbico) presentó resultados muy positivos. Esta combinación permite aprovechar las ventajas de los sistemas anaeróbicos [14]: compacidad, menor consumo de energía, menor generación de lodo, producción de energía a través del metano), con las de un postratamiento aeróbico para la obtención de un efluente de mayor calidad a nivel de DBO, DQO, SST y SAAM. En el caso de los sistemas lagunares, un pulimento del efluente también parece ser necesario para cumplir con la normativa de vertido vigente, a pesar del límite superior para SST.

Con respecto al registro de producción de lodo en las PTARs, en la base de datos de SIRROAR del 2021, únicamente un 32 % de los reportes operacionales se refirieron a una producción (de un total de 2639 reportes). De la muestra que sí reportó producción de lodo, un 43 % reportó cero toneladas por año, y 90 % reportó 2 o menos toneladas por año. La suma total fue de 296 609 toneladas en el año, de las cuales 95 % correspondieron a la PTAR de Los Tajos. La falta de datos de producción de lodo, y el hecho de que algunos operadores reporten una producción de

cero toneladas de lodo por año, dificultan el análisis de generación de lodo por tipo de tecnología y muestran que la medición y reporte de la generación de este subproducto no se realiza con la misma relevancia que para el efluente. En ese sentido, todavía es necesario reforzar la importancia del seguimiento de este parámetro a nivel institucional y a nivel de una gran parte de los entes generadores. De otra forma, será difícil gestionar de forma adecuada este subproducto, pensando en su valorización.

Finalmente, luego del análisis presentado, se puede concluir que el uso extendido de los sistemas aeróbicos (particularmente lodos activados) podría estar relacionado con la seguridad de la comunidad técnica en el cumplimiento de los parámetros de vertido (poco menos del 90 % de los reportes operacionales del año 2021 cumplieron con los límites de vertido), mientras que otras tecnologías, menos comunes a nivel nacional, mostraron índices de cumplimiento menores. En el caso de los sistemas anaeróbicos, a pesar de sus ventajas, sin un sistema de postratamiento aeróbico, su índice de cumplimiento es significativamente menor al de los lodos activados. Esto conduce a concluir que, si se desea promover el uso de tecnologías anaeróbicas para las PTARs ordinarias, con el fin de facilitar un saneamiento más sostenible [14], [26], se requiere el estudio, desarrollo, transferencia y aplicación de distintas opciones de postratamiento aeróbico en combinación con ellos. En este tema, existe amplia experiencia en otros países de América Latina que podría usarse como ejemplo [13]–[16], [27].

3.2 Consulta a comunidad técnica nacional

Uno de los principales hallazgos que evidencia esta investigación es que en el país existe una cantidad importante de profesionales relacionados con el saneamiento de aguas residuales que tiene formación académica y experiencia en la materia. De la muestra alcanzada (116 personas técnicas) el 100

% aseguraron contar con conocimientos teóricos generales sobre tratamiento de aguas residuales de los cuales el 85,3 % indicaron conocer sobre digestión anaeróbica a nivel teórico, lo que podría evidenciar un aporte importante desde el punto de vista de grado de conocimiento y experiencia. De la muestra alcanzada, el 43,1 % indicó desempeñarse en la consultoría privada, un 36,2 % en instituciones públicas y un 23,3 % en la academia, entre otras labores con menor grado de participación; también es importante recalcar que, de la muestra consultada, el 76,7 % menciona haber aprendido sobre tratamiento de aguas por su experiencia profesional, algunos de los cuales lo complementan con cursos a nivel de grado y de extensión, lo que evidencia una distribución balanceada en cuanto al rol que ejercen las personas participantes y podría reflejar una primera luz de la necesidad de reforzar los conocimientos abarcados en los planes de estudios de las carreras afines, lo que se discutirá más adelante en la Sección 3.3. Además, de las personas encuestadas, 50 % tenía experiencia en operación, 48 % en asesoría en la operación, 43 % en diseño, 19 % en administración de sistemas y 17 % en construcción de PTARs. Un 32 % se dedicaba a distintos trámites relacionados con PTARs

(permisos, visado sanitario, atención de denuncias), mientras que 23 % tenía experiencia en la investigación en el tema y 10 % en docencia universitaria. Con respecto al tiempo de experiencia, 95 % de la muestra dijo que tenía 3 o más años en el sector, mientras que 50 % dijo tener 11 años o más de experiencia. En ese sentido, la muestra estuvo compuesta por diversos sectores con puntos de vista heterogéneos (sector público, privado, académico, operativo, entre otros) y con bastante experiencia en su trabajo.

Otro resultado relevante para la investigación fue constatar cómo, aunque la mayoría de la muestra (47,4 %) indicaron conocer más de 10 plantas de tratamiento de aguas residuales ordinarias, al consultar específicamente por PTAR ordinarias con reactor anaeróbico, el 50,9 % indicaron conocer solamente de 1 a 3 plantas. Esto concuerda con los registros de las bases de datos analizadas en la **Sección 3.1**, que evidenció un número mucho menor de plantas con reactor anaeróbico y una alta predominancia de reactores aerobios de lodos activados en el país. Como parte de la encuesta, se consultó acerca del nivel de acuerdo/desacuerdo en relación con algunas afirmaciones sobre las PTARs con reactor anaeróbico. La Fig. 5 muestra los resultados obtenidos.

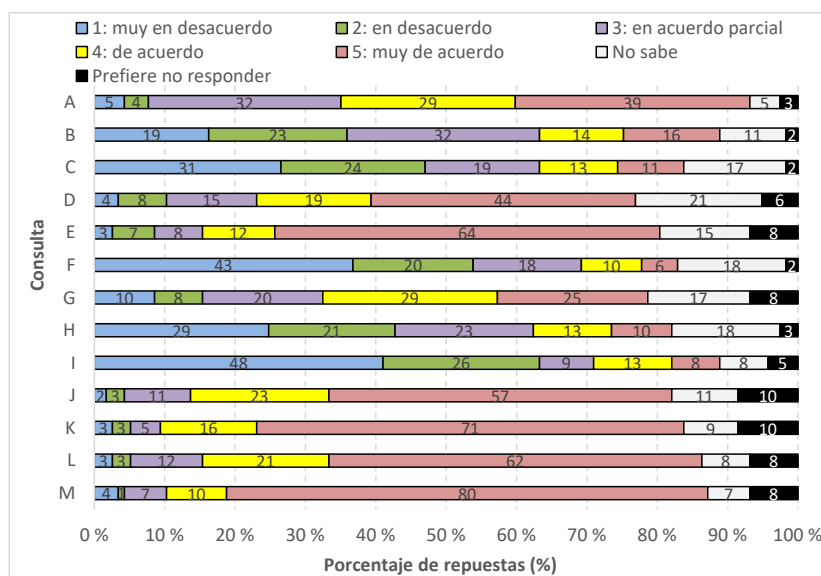


Fig. 5. Nivel de acuerdo con consultas sobre las PTARs ordinarias con reactores anaeróbicos.

Notas: (A) Son adecuadas y recomendables; (B) son más difíciles de operar que los sistemas de lodos activados; (C) son más costosas en su inversión inicial que los sistemas de lodos activados; (D) generan menos lodo que los sistemas de lodos activados; (E) consumen menos energía eléctrica que los sistemas de lodos activados; (F) son más costosas de operar y mantener; (G) requieren de un postratamiento aeróbico para cumplir con los límites de vertido vigentes; (H) no funcionan en zonas urbanas debido a la generación de malos olores; (I) debido a la producción de biogás rico en metano (combustible), deben evitarse por el riesgo de formación de atmósferas explosivas y emisión de gases de efecto invernadero; (J) el efluente anaeróbico y la fase sólida, después de un tratamiento adecuado, pueden ser reusados / dispuestos en la agricultura para aprovechar los nutrientes; (K) el biogás generado es una posible fuente para generación de energía renovable (calor, electricidad); (L) es una vía adecuada para depurar las aguas residuales y recuperar subproductos del saneamiento; (M) es necesario y vale la pena investigar en el tratamiento anaeróbico de aguas residuales para la recuperación de subproductos del saneamiento en Costa Rica.

La Fig. 5 muestra que, de forma general, las personas encuestadas poseen conceptos claros en relación con algunas de las ventajas y desventajas de los sistemas anaeróbicos consolidados

en la literatura [16]: generan menos lodo (D), no son más costosas (F y B), consumen menos energía (E) que los lodos activados, requieren de un postratamiento para el vertido a cuerpo hídrico

(G). Además, consideran la tecnología como una opción viable en Costa Rica (A), y ven algunas ventajas en relación con el aprovechamiento del efluente y el lodo (J), la valorización del biogás (K) para la recuperación de subproductos (L), que vale la pena investigar en el país (M). Aunque no perciben la generación del biogás como un riesgo para la seguridad (explosiones) o el ambiente (emisión de gases de efecto invernadero) que deba evitar su uso (I), una proporción sí reconoce el problema de generación de olores, típicos de procesos anaeróbicos. Con respecto a si son más fáciles de operar que los sistemas de lodos activados, la respuesta estuvo dividida, lo que llama la atención si se considera que la mayor parte de la experiencia en Costa Rica ha sido generada con sistemas de lodos activados (Sección 3.1), por lo que sería esperable que consideren que estos son más fáciles de operar. Algunas personas comentaron sobre la necesidad de más espacio de los sistemas anaeróbicos que los

aeróbicos, además de la preocupación de algunos contaminantes (emergentes) en los distintos subproductos (agua, lodo) como productos farmacéuticos. Además, una persona comentó sobre la poca flexibilidad de la operación de los sistemas anaeróbicos en relación de los sistemas de lodos activados, catalogándolos como “cajas negras”. Esto muestra una necesidad de más investigación en la materia (tratamiento de los subproductos para reducir riesgos ambientales) y en la formación y capacitación de la comunidad técnica para conocer más sobre el diseño, construcción y operación de los sistemas anaeróbicos de tratamiento de aguas residuales.

Por otro lado, la **Fig. 6** muestra el nivel de acuerdo de las personas encuestadas en relación con algunas medidas o cambios requeridos en el país para desarrollar el uso de las tecnologías anaeróbicas para el tratamiento de aguas residuales ordinarias y para la valorización de los subproductos generados.

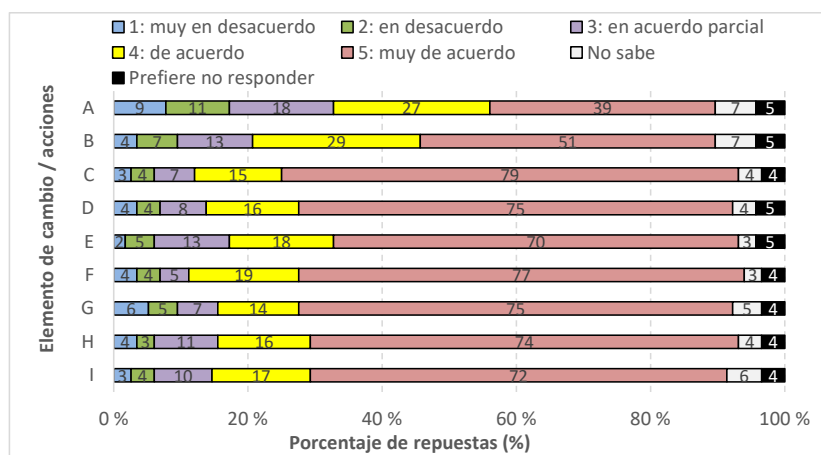


Fig. 6. Nivel de acuerdo con consulta sobre elementos de cambio o acciones a realizar en el país para ampliar el uso de tecnologías anaeróbicas para el tratamiento de las aguas residuales ordinarias.

Nota: (A) Modificaciones a la reglamentación vigente en temas de tratamiento de aguas residuales; (B) modificaciones a otras reglamentaciones complementarias para viabilizar el aprovechamiento de los subproductos; (C) capacitación en diseño, construcción y operación de PTARs anaeróbicas a nivel de cursos de extensión / actualización; (D) producción de guías nacionales de diseño, construcción y operación de PTARs anaeróbicas y aeróbicas (postratamiento); (E) implantación de sistemas demostrativos (PTARs en escala real) en donde se aprovechen los subproductos de un reactor anaeróbico tratando aguas residuales ordinarias en Costa Rica, que puedan ser usados como ejemplo; (F) investigación aplicada en sistemas de postratamiento para cumplir con normativa de descarga en cuerpos de agua superficiales; (G) investigación en riesgos en la salud / riesgo ambiental relacionados con el reúso del agua en agricultura, uso agrícola de los biosólidos, aprovechamiento del biogás generado; (H) investigación y Desarrollo tecnológico local para la mitigación de los impactos de los reactores anaeróbicos como los olores y corrosión, emisión no controlada de metano, tratamiento y aprovechamiento de biogás, quema de biogás, entre otros; (I) desarrollo tecnológico para que empresas locales produzcan equipos o elementos especializados para las PTARs anaeróbicas y recuperación de subproductos (elementos prefabricados como cajas de distribución o separadores trifásicos, medios de soporte para postratamientos sin consumo energético, quemadores de biogás, entre otros).

Como se puede apreciar en la **Fig. 6**, la gran mayoría de las personas encuestadas considera importante la implementación de las medidas sugeridas, con una respuesta menos favorable para los cambios de reglamentación (A y B). La capacitación de la comunidad técnica en el diseño, construcción y operación (C) de los sistemas fueron la opción con mayor porcentaje de respuestas favorables, con resultados similares para la generación de guías locales de diseño (D) y la investigación y desarrollo local en estos

sistemas (E a I). Algunas personas manifestaron que las guías de diseño deberían ser opcionales con el fin de no limitar al diseñador, mientras que otras personas manifestaron la necesidad de cambiar la ley constitutiva de AyA para que pueda donar o comercializar los distintos subproductos generados durante el tratamiento de las aguas residuales. La necesidad de ampliar la investigación en el uso seguro de los subproductos (contaminantes emergentes) fue mencionada nuevamente.

En relación con el uso de la tecnología anaeróbica para el tratamiento de las aguas residuales ordinarias en Costa Rica, es posible afirmar que las personas encuestadas tienen conocimiento teórico básico en el tema, y reconocen las ventajas y limitaciones de esta práctica. Sin embargo, parece haber un desconocimiento técnico más profundo en relación con el diseño, construcción y operación de estos sistemas según indicaron los encuestados, lo que podría estar limitando su aplicación a mayor escala; este punto se retomó en el taller de validación. En relación con el aprovechamiento de los subproductos, las personas encuestadas manifestaron limitaciones de orden legal y la necesidad de investigar y generar conocimiento local que permita su aplicación sanitaria y ambientalmente segura en el territorio nacional.

3.3 *Triangulación de los resultados y análisis de brechas detectadas*

En la siguiente sección, se presentan las principales brechas encontradas en el estudio, que se agruparon en las dimensiones predefinidas. En la categoría “otras”, se mencionan algunas dimensiones emergentes que son relevantes para la investigación y que no habían sido consideradas inicialmente.

Brechas Técnicas

El grupo de expertos concordó con que se requieren más programas de capacitación continua en el ámbito del tratamiento de aguas (23,3 % de los participantes), en especial, para reforzar el uso de tecnologías anaerobias. Se mencionó que esta capacitación puede ser en diferentes niveles, pero lo primordial es que dé las herramientas necesarias a los profesionales en ramas afines para plantear más opciones de tratamiento diferentes en el país.

Con una frecuencia del 16,6 % de las respuestas, se indicó como segundo punto relevante que los tratamientos tradicionales se han centrado en reducción de carga orgánica y control de coliformes, y no se ve la importancia de tratamientos terciarios para la remoción de nutrientes, la eliminación del riesgo de resistencia microbiana, contaminantes emergentes, entre otros.

Con una menor frecuencia, también se mencionaron brechas importantes como el que existe una deficiencia en el mantenimiento de los sistemas de tratamiento, aunado a la poca inspección que se les da a las obras, los diseños deficientes, la falta de estudios técnicos que los respalden o construcciones poco fiscalizadas de estos sistemas, entre otros.

Brechas Económicas

Parte importante de las reflexiones de los expertos (33,3 % de las intervenciones) rondaban alrededor de que no existe una sostenibilidad financiera para el sistema de saneamiento, en especial, porque los costos operativos suelen ser muy altos (22,2 %), hay una inadecuada gestión del presupuesto para saneamiento (11,1 %), aspectos que dificultan la disponibilidad de recursos. Aunado con ello, se indicó además que existe una

fuerte dependencia del mercado en cuanto a los sistemas de tratamiento disponibles y comercializados (7,4 %), lo que se ha agravado con el aumento de los costos de los equipos importados. Como posible solución a parte de esta brecha, se planteó el establecimiento de alianzas público-privadas para aumentar las opciones disponibles.

En un segundo bloque de la dimensión, se mencionó que se requiere plantear un sistema tarifario escalonado que permita financiar adecuadamente las tecnologías de saneamiento seleccionadas para cada comunidad (11,1 % de la muestra de expertos). En este sentido, se requiere contemplar las características socioeconómicas de los habitantes en cada comunidad.

Se recalcó que un reto importante a valorar como país es mejorar la inversión en saneamiento, en especial para proyectos desarrollados por ASADAS, especialmente para zonas rurales o comunidades alejadas. En la otra arista social, se mencionó que, al momento, la realidad refleja que muchos de los costos de sistemas de tratamiento que están operando los están asumiendo los usuarios de condominios, y esto puede no ser sostenible a largo plazo ni fomenta la equidad de oportunidades.

Brechas Legales e Institucionales

Uno de los principales aportes definidos en esta dimensión considera que la rectoría del sector agua no es clara en el país (21,4 % de las participaciones). Además, existe una duplicidad de funciones relacionadas con el tema de saneamiento y calidad del agua, lo que se refleja en una división del aparataje estatal, que repercute en las trabas país. Los expertos concuerdan en que existe una maraña legal e institucional que impide avanzar en el tema (17,8 %), en especial, respecto a las competencias que tienen MINAE, Ministerio Salud y las municipalidades en este tipo de proyectos. Aunado con ello, se presenta la falta de actualización legal que se discutirá más adelante. Por otro lado, se reflejó como una traba el exceso de tramitología para la ejecución de proyectos en el país.

Adicionalmente se señaló que la normativa existente no se ajusta ni se actualiza tan rápidamente como surgen nuevas tecnologías (16 %); específicamente se mencionó que existen limitaciones legales para el uso de tecnologías emergentes y para el aprovechamiento de subproductos; se resaltó que hay un vacío legal que permitiría desarrollar alternativas de aprovechamiento de subproductos o de las mismas aguas residuales.

Otras brechas emergentes del proceso

Uno de los puntos emergentes más importante que salen a la luz con la investigación es la necesidad de trabajar en la conciencia en la población, lo cual podría mejorar si se instaura una educación global y permanente en temas de saneamiento desde la infancia, opción mencionada por 27,8 % de las respuestas. Esto ayudaría a combatir el temor que tiene la población al uso de los subproductos de los sistemas de tratamiento (11,6 % manifestaron dicho temor).

Entre otros puntos relevantes, pero mencionados con menor frecuencia, están:

- La falta de bases de datos de registros de los sistemas existentes y de acceso abierto.
- El problema de conexiones ilícitas del sistema de saneamiento y el de aguas pluviales.
- La falta de ética en los procesos de operación de las plantas y monitoreo de las descargas.
- El desconocimiento técnico de algunos operadores.
- La falta de registros y documentación de las diferentes plantas y la triangulación de la información entre los sistemas de información existentes.

Perspectivas y retos a futuro

Se consultó ¿cómo lograr un saneamiento en aguas residuales universal y sostenible en Costa Rica?, a lo que se indicó, entre las principales recomendaciones, que se requiere, primeramente, una actualización de la legislación en saneamiento en el país para que se flexibilice en cuanto al uso de tecnologías innovadoras. Paralelamente, los expertos consultados concuerdan en la necesidad de propiciar más la investigación e innovación.

Por otro lado, se plantea el reto de trabajar en la creación de manuales técnicos y capacitación en las diferentes tecnologías emergentes en el mundo, desde un enfoque multidisciplinario, para que así se tengan mayores herramientas para concretar proyectos sostenibles en el tiempo. Las personas profesionales requieren un respaldo para proponer el uso de tecnologías modernas y de aprovechamiento de subproductos, y ese respaldo debería venir de la academia con mayores investigaciones que logren ser transferidas al ejercicio profesional.

Una segunda pregunta generadora consultó ¿cómo incorporar elementos de economía circular (como recuperación de subproductos) a partir de las aguas residuales? A esta, los expertos indicaron que primeramente se requiere modificar el marco jurídico y trabajar en un cambio cultural para lograr romper el tabú que frena a la población para que las personas en general acepten y apoyen procesos de revaloración de subproductos a partir del tratamiento de aguas residuales. Bajo la perspectiva de los expertos, el papel de la academia debe ser preponderante en educar a los técnicos y profesionales que podrían trabajar en el tema de saneamiento universal y fortalecer sus investigaciones en el campo con miras a que estas se divulguen más en todos los ámbitos de acción.

4. CONSIDERACIONES FINALES

En Costa Rica, el saneamiento de aguas residuales está poco desarrollado: menos del 15 % la población está conectada al alcantarillado sanitario con planta de tratamiento de aguas residuales. Adicionalmente, de los datos analizados, se desprende que menos del 40 % del total del agua tratada cumplió con los

límites de vertido establecidos en la reglamentación vigente y se observó una gran cantidad de sistemas de muy pequeña capacidad (por debajo de los 20 m³/d), lo que muestra una sobredescentralización de la gestión de las aguas residuales. Adicionalmente, el país se ha volcado más al uso de sistemas aerobios, en especial lodos activados, por aspectos de tradición y de la expertise que el sector técnico tiene de estas tecnologías. El uso de sistemas anaerobios es bajo en el país, existen muy pocos casos reportados y se mostró que para que cumplan de forma consistente con la reglamentación de vertido estos sistemas deberían estar complementados con un postratamiento (aeróbico). En ese sentido, la selección de tecnologías y distribución espacial de los sistemas de tratamiento no ha respondido a una planificación estratégica, sino más bien a condiciones de oportunidad y de experiencias previas de la comunidad técnica.

Aunado con ello, el aprovechamiento de subproductos es muy limitado en términos de agua tratada (aproximadamente 20 % de las PTARs en operación) y no hay información clara en relación con el aprovechamiento de los lodos y biosólidos, en parte, por una cultura de desecho de las aguas residuales y por falta de incentivos que propicien la circularidad en los sistemas.

Una de las principales conclusiones de la investigación recalca que la academia debe tomar mayor protagonismo para ayudar a solventar muchas de las brechas, en especial las técnicas, y en guiar procesos para que se evalúen opciones para minimizar aspectos de índole legal e institucional, así como en el desarrollo y transferencia de conocimientos tecnológicos que permitan una gestión sostenible de las aguas residuales ordinarias en el país.

Se requiere aún mucho trabajo en promover espacios para la divulgación de información y la educación a todo nivel, tanto técnicamente como a nivel de la población en general, para que los procesos de aprovechamiento de subproductos de las aguas residuales puedan ir ganando terreno en el país y tengan aceptación por la población. Además, se evidenció que se requiere de fomentar la aplicación del concepto de economía circular en el ámbito del saneamiento.

Finalmente, se llega a la conclusión de que no hay incentivos que propicien la innovación o premien la eficiencia en los sistemas implementados, lo que genera un desafío importante para que el país logre el cambio de paradigma, buscando una ruta sostenible hacia la universalización del saneamiento.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las siguientes personas por el suministro de la información de las bases de datos institucionales: Ana Victoria Giusti del Ministerio de Salud, Arquitecta Kathy Borges Umaña del AyA y Ing. Marcial Rivera Rodríguez de APC.

Asimismo, se agradece el apoyo recibido por parte de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica para el desarrollo de los proyectos C2167 y C3608, que permitieron la realización de esta investigación.

ROLES DE LOS AUTORES

Erick Centeno Mora: conceptualización, investigación, curación de datos, análisis formal, metodología, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.

Nidia Cruz Zúñiga: conceptualización, investigación, análisis formal, metodología, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.

Paola Vidal Rivera: conceptualización, investigación, metodología, redacción – revisión y edición.

REFERENCIAS

- [1] AyA, MINAE, y MS, *Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales 2016-2045*, vol. 85, no. 2. San José, 2016.
- [2] D. Mora Alvarado y C. F. Portuguese B., “Agua para consumo humano por provincias y saneamiento por regiones manejados en forma segura en zonas urbanas y rurales de Costa Rica al 2018”, Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, San José, Costa Rica, pp.1-28, Rep. CEDO AyA 5252, 2019.
- [3] R. W. Crites y G. Tchobanoglous, “Decentralized Wastewater Management Systems and Management”, en *Small and decentralized wastewater management systems*, Ed. Boston, USA: McGraw-Hill, 1998, pp. 1-21.
- [4] A. J. Englande, P. Krenkel, y J. Shamas, “Wastewater Treatment & Water Reclamation”, *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, B978-0-12-409548-9.09508-7, 2015. [en línea]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7158167/>
- [5] Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales, Decreto Ejecutivo 33601-S-Minae, San José, Costa Rica, pp. 56, 2007.
- [6] M. von Sperling, *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*, 4ta ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2014.
- [7] Metcalf & Eddy y AECOM, *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*, 5ta ed. New York: McGrawHill, 2014.
- [8] Water Environment Federation, *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*. WEF, 7ma ed., New York, USA: McGraw-Hill, 2010.
- [9] M. Henze, M. van Loosdrecht, G. Ekama, y D. Brdjanovic, *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. London: IWA Publishing, 2008.
- [10] E. Centeno Mora y A. Murillo Marín, “Tipología de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales ordinarias instaladas en Costa Rica”, *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 53, no. 2, pp. 97–110, 2019, doi: 10.15359/rca.53-2.5.
- [11] A. Campos Castillo, “Experiencias institucionales en el uso del Sistema APC para la aprobación de plantas de tratamiento de aguas residuales”, *Hidrogénesis*, vol. 11, no. 1, pp. 97–109, 2015.
- [12] A. Noyola, J. Morgan, y L. Guereca, “Procesos anaerobios”, en *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*, 1 ed. México DF: Editorial UNAM, 2013, capítulo 1.3, pp. 24-33.
- [13] A. Noyola, A. Padilla-Rivera, J. M. Morgan-Sagastume, L. P. Güereca, y F. Hernández-Padilla, “Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America”, *Clean*, vol. 40, no. 9, pp. 926–932, 2012, doi: 10.1002/clen.201100707.
- [14] C. A. L. Chernicharo, “Anaerobic Reactors”, en *Principios do tratamento biológico de águas residuárias*. Belo Horizonte, Brasil: IWA Publishing, 2007, doi: 10.2166/9781780402116.
- [15] C.A. L. Chernicharo y T. Bressani, Eds., *Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, Construction and Operation*. IWA Publishing, 2019, doi: 10.2166/9781780409238.
- [16] C. A. L. Chernicharo, J. B. van Lier, A. Noyola, y T. Bressani Ribeiro, “Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges”, *Rev Environ Sci Biotechnol*, vol. 14, no. 4, pp. 649–679, 2015, doi: 10.1007/s11157-015-9377-3.
- [17] C. A. L. Chernicharo, J. B. van Lier, A. Noyola, T. B. Ribeiro, y I. L. America, “Anaerobic Sewage Treatment in Latin America”, en *Anaerobic Biotechnology*, F. Herbert y T. Zhang, Eds., Imperial College Press, 2015, pp. 263–296. doi: doi:10.1142/9781783267910_0012.
- [18] Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, “Datos de proyectos tramitados en el sistema de Administrador de Proyectos de Construcción APC, 2011 a 2022”, San José, Costa Rica, reporte solicitado a la institución, 2022.
- [19] Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, “Datos de proyectos de planta de tratamiento de aguas residuales tramitadas ante la institución, 2011-2018”, San José, Costa Rica, reporte solicitado a la institución, 2022.
- [20] Ministerio de Salud, “Datos del Sistema de información que permite la generación de los Reportes Operacionales en Aguas Residuales, período 2021-2022”, San José, Costa Rica, 2022.
- [21] “Estadísticas vitales 2021: población, nacimientos, defunciones y matrimonios”, Instituto Costarricense de Estadísticas y Censos, reporte anual, San José, Costa Rica, 151 p., 2022.
- [22] Acueductos y Alcantarillados, “Norma técnica para diseño y construcción de sistemas de abastecimiento de agua potable, desaneamiento y pluvial”, www.pgrweb.go.cr/DOCS/NORMAS/1/VIGENTE/R/2010-2019/2017/14B-5C/1467C0.HTML. (accesado en abril del 2023).

- [23] D. Mora y C. F. Portuguez, “Agua para uso y consumo humano y saneamiento en Costa Rica al 2019: brecha al 2023”, Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, San José, Costa Rica, pp.1-28, Rep. CEDO AyA 5383, 2020.
- [24] E. Centeno Mora y A. Murillo Marín, “Comparación de tecnologías para el tratamiento sostenible de aguas residuales ordinarias en pequeñas comunidades de Costa Rica”, *Revista Ingeniería*, vol. 30, no. 1, pp. 1–24, 2019, doi: 10.15517/ri.v30i1.38898.
- [25] M. von Sperling y C. A. L. Chernicharo, *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*. International Water Association, 2005.
- [26] A. Soares et al., “Closing cycles in anaerobic-based sewage treatment systems”, en *Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, Construction and Operation*, C. A. L. Chernicharo y T. Bressani-Ribeiro, Eds., IWA Publishing, 2019, p. 0, doi: 10.2166/9781780409238_0367.
- [27] T. Bressani-Ribeiro, L. A. Chamhum-Silva, y C. A. L. Chernicharo, “Constraints, performance and perspectives of anaerobic sewage treatment: Lessons from full-scale sewage treatment plants in Brazil”, *Water Science and Technology*, vol. 80, no. 3, pp. 418–425, 2019, doi: 10.2166/wst.2019.285.