ISSN-e: 2737-6419 Revista Athenea
Período: enero-marzo 2026 Vol.7, Número 23, (pp. 08–17)

Artículo de investigación https://doi.org/10.47460/athenea.v7i23.122

# Impacto de plantas de tratamiento de aguas residuales: una evaluación desde la ingeniería ambiental

Ruben Martinez Cabrera*
https://orcid.org/0000-0002-4561-8627
rmartinezc@unfv.edu.pe
Universidad Nacional Federico Villarreal
Lima, Perú

Julio Cesar Minga
https://orcid.org/0000-0002-2880-4954
jcesar@unfv.edu.pe
Universidad Nacional Federico Villarreal
Lima, Perú

María Mercedes Paricoto Simón
https://orcid.org/0000-0002-7675-7558
mparicoto@unfv.edu.pe
Universidad Nacional Federico Villarreal
Lima, Perú

*Autor de correspondencia: rmartinezc@unfv.edu.pe*

Recibido (23/09/2025), Aceptado (05/12/2025)

**Resumen.** El estudio analizó el desempeño ambiental y la eficiencia operativa de plantas de tratamiento de aguas residuales desde un enfoque de ingeniería ambiental, con el objetivo de identificar los impactos asociados a su funcionamiento y nivel tecnológico. La metodología incluyó la observación directa de procesos unitarios y el análisis sistematizado de información operativa, aplicando criterios técnicos de evaluación ambiental y de remoción de contaminantes. Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre las plantas, destacándose un sistema con eficiencia de remoción de sólidos suspendidos inferior al 65 %, asociado a un alto impacto ambiental, frente a otros con eficiencias superiores al 90 % y efectos de magnitud moderada. Se concluye que el desempeño ambiental depende del nivel tecnológico, del control de emisiones y de la gestión integral de residuos.

**Palabras clave:** contaminación ambiental, tratamiento de afluentes, impacto ambiental, plantas de tratamiento.

## Impact of Wastewater Treatment Plants: An Assessment from Environmental Engineering

**Abstract.** The study analyzed the environmental performance and operational efficiency of wastewater treatment plants from an environmental engineering perspective, aiming to identify the impacts associated with their functioning and technological level. The methodology included direct observation of unit processes and a systematized analysis of operational information, applying technical criteria for environmental assessment and contaminant removal. The results showed significant differences among the plants, highlighting one system with suspended solids removal efficiency below 65 %, associated with high environmental impact, in contrast to others with efficiencies above 90 % and moderate effects. It is concluded that environmental performance depends on technological level, emission control, and integrated waste management.

**Keywords:** environmental contamination, wastewater treatment, environmental impact, treatment plants.

# I. INTRODUCCIÓN

En las ciudades modernas caracterizadas por alta densidad poblacional, la gestión del saneamiento urbano constituye un componente crítico de la infraestructura ambiental, siendo el tratamiento de aguas residuales una de sus operaciones fundamentales [1]. Desde la perspectiva de la ingeniería ambiental, estos sistemas no solo cumplen una función sanitaria, sino que actúan como elementos clave para la protección de los ecosistemas acuáticos, la sostenibilidad de los recursos hídricos y la reducción de impactos ambientales asociados al vertimiento de efluentes sin tratamiento adecuado. En este contexto, la modernización de las plantas de tratamiento de aguas residuales se ha consolidado como una prioridad a escala global, impulsada por el incremento sostenido de la demanda de agua limpia y la necesidad de mitigar los efectos ambientales derivados de los procesos urbanos e industriales [2].

De manera similar, en los Estados Unidos de América, se han implementado sistemas que integran herramientas de inteligencia artificial, permitiendo optimizar el monitoreo en tiempo real, la gestión operativa y la precisión en el control de la carga contaminante [3]. En América Latina, diversos estudios han documentado avances recientes en la reutilización de aguas residuales tratadas y en la adopción de enfoques de gestión hídrica circular en sectores industriales y agrícolas [4]. Sin embargo, dicha tendencia no se ha generalizado en toda la región. Investigaciones realizadas en contextos urbanos latinoamericanos evidencian que el vertimiento de aguas residuales y la gestión inadecuada de subproductos del tratamiento continúan generando impactos ambientales significativos sobre las fuentes hídricas y los ecosistemas asociados [5], [6].

En el caso del Perú, la situación presenta similitudes con otros países de la región en términos de brechas entre la capacidad instalada y la demanda real de tratamiento. Estudios técnicos sobre plantas de tratamiento municipales en contextos latinoamericanos han señalado deficiencias recurrentes en el diseño, la operación y el mantenimiento de estas infraestructuras, así como heterogeneidad en los modelos de gestión y control [7]. Estas limitaciones comprometen la eficiencia de los procesos de depuración y la calidad del efluente final, intensificando la contaminación ambiental, afectando la biodiversidad acuática e incrementando el riesgo de enfermedades en la población, además de deteriorar la calidad de vida de las comunidades aledañas debido a la emisión de olores desagradables [8].

En síntesis, la evidencia sugiere que la modernización tecnológica, el fortalecimiento de la gestión operativa y la incorporación de enfoques basados en sostenibilidad constituyen factores determinantes para mejorar el desempeño ambiental de las plantas de tratamiento de aguas residuales en contextos urbanos y regionales.

# II. MARCO TEÓRICO

Una planta de tratamiento de aguas residuales constituye una infraestructura esencial de la ingeniería ambiental, diseñada para remover contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en las aguas generadas por actividades domésticas, urbanas e industriales, con el objetivo de producir un efluente compatible con la protección del medio ambiente y la salud pública [9]. Desde el enfoque ingenieril, estas instalaciones representan sistemas complejos en los que convergen procesos hidráulicos, fisicoquímicos y biológicos, cuya correcta integración determina la eficiencia global del tratamiento y la sostenibilidad del sistema.

Los procesos de tratamiento comprenden, en primer lugar, operaciones físicas como la sedimentación y la filtración, orientadas a la separación de sólidos suspendidos y materiales flotantes. A ello se suman procesos químicos, entre los que destacan la coagulación, la floculación y la desinfección, empleados para la remoción de partículas finas, patógenos y compuestos disueltos. Finalmente, los procesos biológicos, como los sistemas de lodos activados y los biodigestores, permiten la degradación de la materia orgánica biodegradable mediante la acción controlada de microorganismos. En términos operativos, el tratamiento de aguas residuales se estructura generalmente en tres etapas. El tratamiento primario se enfoca en la remoción de sólidos sedimentables y flotantes; el tratamiento secundario reduce la carga orgánica a través de procesos biológicos; mientras que el tratamiento terciario tiene como finalidad la eliminación de contaminantes específicos, como nutrientes y microorganismos, mejorando la calidad del efluente y ampliando sus posibilidades de reutilización [10].

Desde la perspectiva del impacto ambiental, numerosos estudios han analizado las consecuencias del vertido directo de aguas residuales sin tratamiento adecuado sobre las cuencas hidrográficas, destacando

el uso de indicadores ambientales físicos, químicos y biológicos como herramientas fundamentales para el monitoreo de los efectos sobre los ecosistemas acuáticos, el paisaje natural y la salud humana [11]. Estos impactos incluyen procesos de eutrofización, degradación de la calidad del agua, alteración de hábitats y riesgos sanitarios asociados a la exposición a contaminantes.

No obstante, la literatura también reconoce que las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden generar impactos ambientales propios cuando su diseño, construcción u operación no se desarrollan bajo criterios técnicos adecuados. En este sentido, se han documentado modificaciones en la fertilidad de los suelos y alteraciones en el entorno inmediato asociadas tanto a la fase constructiva como a la operatividad de estas instalaciones, especialmente en relación con la gestión de lodos, emisiones odoríferas y uso del suelo [12]. Estos antecedentes refuerzan la necesidad de abordar el análisis de las plantas de tratamiento desde un enfoque integral de ingeniería, que considere no solo su eficiencia depuradora, sino también los impactos ambientales derivados de su ciclo de vida.

## III. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló a partir del análisis comparativo de cuatro plantas de tratamiento de aguas residuales, seleccionadas en función de las tecnologías empleadas y su potencial incidencia en la minimización de impactos ambientales durante la etapa de operación y mantenimiento. Las plantas evaluadas incorporan distintos sistemas de tratamiento, entre ellos lagunas aireadas, filtros percoladores, lodos activados con aireación extendida y reactores biológicos de lecho móvil, lo que permitió contrastar el desempeño ambiental asociado a enfoques tecnológicos diferenciados. La evaluación de impactos se realizó mediante la aplicación de la matriz propuesta por Conesa, debido a su enfoque multicriterio, carácter semicuantitativo y capacidad para integrar una visión holística de los efectos ambientales derivados de infraestructuras de saneamiento.

Para la identificación de impactos ambientales se delimitaron las áreas de influencia directa e indirecta en el entorno físico de cada planta, considerando variables como zonas de amortiguamiento, presencia de viviendas, disponibilidad de servicios básicos e infraestructura vial. Se sistematizó la información relacionada con los procesos operativos desarrollados en cada instalación, analizando la forma en que las distintas actividades influyen sobre los componentes ambientales. En esta etapa se priorizaron aquellas actividades con mayor nivel de incidencia y significancia ambiental, particularmente durante las fases de operación y mantenimiento.

Del total de instalaciones existentes en el área de estudio, la selección de las cuatro plantas respondió a un criterio deliberado basado en la diversidad tecnológica, con el objetivo de evaluar y comparar los impactos ambientales generados por cada sistema de tratamiento. Esta selección permitió analizar de manera representativa las diferencias en eficiencia operativa y presión ambiental asociadas a distintos esquemas de diseño y gestión.

La recolección de información se realizó principalmente mediante observación directa, empleando fichas de registro diseñadas para documentar las condiciones operativas, los procesos de tratamiento y las interacciones con el entorno. La información fue complementada, en casos puntuales, con datos proporcionados por las entidades responsables de la gestión de las plantas y por pobladores ubicados en las áreas circundantes, a través de consultas directas orientadas a identificar percepciones sobre impactos ambientales, especialmente aquellos relacionados con olores y molestias. Adicionalmente, los datos sobre velocidad y dirección del viento fueron obtenidos de registros meteorológicos oficiales, con el fin de apoyar el análisis de dispersión de emisiones.

La cuantificación y análisis de los impactos ambientales se efectuaron a partir de las actividades identificadas, agrupadas en dos categorías principales: tecnología de tratamiento y operación del sistema. Para cada actividad se evaluaron los aspectos e impactos ambientales conforme a los criterios establecidos en la guía metodológica para la evaluación de impacto ambiental, considerando variables como efecto, periodicidad, signo, intensidad, extensión, momento, reversibilidad, persistencia, recuperabilidad, acumulación y sinergia. La importancia de los impactos se determinó mediante la aplicación de la ecuación de ponderación multicriterio (1), la cual permitió obtener valores acumulados para su posterior clasificación en niveles de impacto insignificante, moderado, severo y crítico, facilitando así la comparación integral del desempeño ambiental de las plantas analizadas.

La importancia de los impactos ambientales se determinó mediante la aplicación de una ecuación

de ponderación multicriterio, expresada de la siguiente forma:

$$I = (3IN + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC) \quad (1)$$

donde: $IN$ = Intensidad; $EX$ = Extensión; $MO$ = Momento; $PE$ = Persistencia; $RV$ = Reversibilidad; $SI$ = Sinergia; $AC$ = Acumulación; $EF$ = Efecto; $PR$ = Periodicidad; y $MC$ = Recuperabilidad.

Mediante esta ecuación se obtuvieron puntajes acumulados que permitieron clasificar los impactos conforme al siguiente criterio: *Insignificante* (-1 a -25), correspondiente a impactos sin importancia que no alteran el ambiente; *Moderado* (-26 a -50), para impactos que no generan afectación apreciable sobre el ambiente; *Severo* (-51 a -75), aplicable a impactos que degradan o afectan de manera considerable el ambiente; y *Crítico* (-76 a -100), para impactos que requieren atención inmediata debido al alto riesgo ambiental y sanitario que representan.

## IV. RESULTADOS

El análisis de las características generales y de la capacidad operativa de las plantas de tratamiento de aguas residuales evidencia marcadas diferencias en términos de escala, cobertura y volumen de procesamiento (Tabla 1). En particular, la planta de San Bartolo presenta una capacidad de tratamiento significativamente superior, siendo aproximadamente 2,3 veces mayor que la de menor tamaño considerada en el estudio, correspondiente a María Reiche. Esta diferencia se explica por la extensión de su área de cobertura, que abarca varios distritos urbanos, en contraste con plantas orientadas principalmente a atender zonas residenciales específicas.

No obstante, una mayor capacidad instalada no se traduce necesariamente en un mejor desempeño ambiental. A pesar de su escala operativa, la planta de San Bartolo registra la menor eficiencia de remoción de contaminantes, con valores cercanos al 63 %, asociados al uso de tecnología de lagunas aireadas. Asimismo, incumple los criterios establecidos para la categoría III de los Estándares de Calidad Ambiental aplicables a efluentes tratados, lo que limita su potencial de reutilización, particularmente en actividades agrícolas cercanas.

En contraste, las plantas de Santa Rosa, Manchay y María Reiche presentan eficiencias superiores al 90 %, alcanzando en algunos casos valores cercanos al 98 %, lo que se refleja en el cumplimiento de los estándares ambientales vigentes. Resulta relevante destacar que, a pesar de ser la planta de menor tamaño, María Reiche beneficia a una población considerablemente mayor que Manchay, lo que sugiere diferencias en el origen y tipo de aguas residuales tratadas. Mientras que en zonas residenciales predominan descargas domésticas, en otras áreas se incorporan aportes adicionales provenientes de actividades agrícolas e industriales, lo que incrementa la carga contaminante y condiciona el volumen tratado.

Desde el punto de vista de la ingeniería ambiental, las diferencias observadas en el desempeño de las plantas analizadas se explican principalmente por la configuración tecnológica de sus procesos de tratamiento. La planta de Santa Rosa, basada en filtros percoladores, presenta un esquema de tratamiento convencional que, si bien resulta funcional en términos de remoción de contaminantes, muestra limitaciones asociadas a la generación de olores y a la proliferación potencial de vectores, vinculadas a la gestión de residuos sólidos y a las condiciones operativas del sistema.

Por el contrario, la planta de Manchay incorpora un sistema de lodos activados con aireación extendida por ciclos intermitentes, lo que implica un mayor consumo energético, pero permite un control más eficiente de la carga orgánica y una reducción significativa de impactos asociados a olores y vectores. De manera similar, la planta María Reiche dispone de un esquema tecnológico más avanzado, caracterizado por una separación eficiente de sólidos en la etapa de pretratamiento y la integración de un reactor biológico de lecho móvil con un clarificador de placas. Esta configuración optimiza la retención de sólidos y la degradación biológica de contaminantes, lo que se traduce en una mayor eficiencia global del sistema y menores impactos ambientales durante la operación.

**Tabla 1.** Características generales y capacidad operativa de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

| **Característica** | **San Bartolo** | **Santa Rosa** | **Manchay** | **María Reiche** |
|---|---|---|---|---|
| Tecnología de tratamiento | Lagunas aireadas | Filtros percoladores | Lodos activados de aireación extendida | Reactor biológico de lecho móvil |
| Volumen de agua residual que ingresa ($m^3$/año) | 62 248 995,00 | 309 687,00 | 2 408 905,00 | 273 750,00 |
| Desagües atendidos | 154 830 | 5 279 | 14 335 | 1 002 |
| Cobertura | Ate; Santiago de Surco; La Molina; Villa María del Triunfo; San Juan de Miraflores | Pachacamac | Pachacamac | Miraflores |
| Población beneficiada | 630 161 | 17 691 | 56 143 | 116 526 |
| Volumen de agua tratada ($m^3$/año) | 32 624 698 | 298 627 | 2 323 283 | 750 |
| Cumplimiento normativo | Incumple categoría III de ECA e incumple LMP para efluentes | Cumple categoría III de ECA | Cumple categoría III de ECA | Cumple categoría III de ECA |

Los resultados reflejados en la Tabla 2 confirman que la selección tecnológica y el diseño de los procesos de tratamiento constituyen factores determinantes en el desempeño ambiental de las plantas de tratamiento de aguas residuales, más allá de su tamaño o capacidad instalada.

**Tabla 2.** Configuración de los procesos de tratamiento y parámetros de diseño–operación.

| **Detalle técnico** | **San Bartolo** | **Santa Rosa** | **Manchay** | **María Reiche** |
|---|---|---|---|---|
| Tratamiento preliminar | Rejas automáticas; desarenador automático | Cámara de rejas; tornillo de residuos; desarenador manual | Cuchara bivalva; cámara de rejas gruesas; tornillo mecanizado; desarenador y desengrasador automático | Cámara de rejas; tanque ecualizador |
| Tratamiento primario | Laguna primaria aireada de mezcla completa | Tanque Imhoff | No aplica | Sistema compacto (tamiz rotativo y trampa de grasas) |
| Tratamiento secundario | Laguna secundaria aireada de mezcla parcial + lagunas de sedimentación | Filtro percolador + sedimentador secundario | Tanque ICEAS (aireación extendida por ciclos intermitentes) | Reactor biológico de lecho móvil + clarificador de placas |
| Tratamiento terciario | Laguna de pulimento + desinfección por cloración | Cámara de contacto de cloro | Sistema de filtración + aplicación de polímeros + desinfección por cloración | Ultrafiltración + desinfección con hipoclorito de sodio |
| Parámetros de diseño–operación | Caudal: 1700 L/s; DBO: 250 mg/L; SST: 45 mg/L; aceites y grasas: 4,98 mg/L; coliformes termotolerantes: $1{,}4\times10^5$ NMP/100 mL | Caudal: 10 L/s; DBO: 26 mg/L; SST: 17 mg/L; aceites y grasas: 5,8 mg/L; coliformes termotolerantes: 2,0 NMP/100 mL | Caudal: 60 L/s; DBO: 700 mg/L; SST: 10 mg/L; aceites y grasas: 0,75 mg/L; coliformes termotolerantes: 2,0 NMP/100 mL | Caudal: 6,94 L/s; DBO: 280 mg/L; SST: 10 mg/L; aceites y grasas: 0,75 mg/L; coliformes termotolerantes: 2,0 NMP/100 mL |

*A. Descripción física y problemas percibidos en las zonas de influencia de las PTAR.*

En los detalles físicos de las zonas de influencia directa de las cuatro PTAR evaluadas se observó que, en el caso de María Reiche, el 80 % de la población evidenció una condición densamente poblada. Ello responde a que el distrito de Miraflores es eminentemente residencial, en contraste con Pachacamac, donde la concentración poblacional se distribuye en áreas relativamente pobladas, siendo atendido por dos PTAR (Santa Rosa y Manchay). Por otra parte, la planta de mayor escala, San Bartolo, que recibe descargas provenientes de cinco distritos populosos, presenta una zona de amortiguamiento clasificada como *relativamente poblada*, con un 100 % de viviendas de un solo nivel. No obstante, es destacable que la mayor parte de estas zonas cuenta con todos los servicios básicos. Asimismo, todos los distritos involucrados en la jurisdicción de esta planta dispusieron como mínimo de servicio de agua y desagüe, permitiendo que la colecta de aguas residuales se realizara en su totalidad.

Dentro de los resultados también se identificaron los problemas potenciales de cada una de las plantas en relación con el área de influencia directa. En este sentido, la emisión de gases de efecto invernadero fue evaluada mediante percepción poblacional, determinándose que todas las PTAR presentaron dicho indicador. Si bien la planta de Santa Rosa reportó un nivel leve, su incidencia no puede ser desestimada debido a su efecto secundario sobre el cambio climático. Adicionalmente, los malos olores fueron reportados en las plantas de San Bartolo y Santa Rosa, pero no en Manchay ni en María Reiche. Este patrón sugiere que, en la medida en que la población aledaña presenta un carácter más residencial, la emisión perceptible de olores disminuye. Aunque la cobertura espacial de dichos olores se distribuye siguiendo la dirección del viento (Sur–Suroeste), es relevante que también sean percibidos en otros distritos, particularmente en el caso de San Bartolo y Santa Rosa (Tabla 3).

**Tabla 3.** Problemas potenciales evidenciados en las PTAR evaluadas.

| **Problema potencial** | **San Bartolo** | **Santa Rosa** | **Manchay** | **María Reiche** |
|---|---|---|---|---|
| Emisión de $CO_2$ y otros gases | Sí | Sí (leve) | Sí | Sí |
| Malos olores | Sí | Sí (persistentes) | No | No |
| Vectores (insectos) | No (presencia) | Sí | No | No |
| Efecto derivado | Contribuye al cambio climático y salud humana | Contribuye al cambio climático y salud humana | Contribución al cambio climático y salud humana debe ser evaluada | Contribución al cambio climático y salud humana debe ser evaluada |
| Velocidad del viento (m/s) | 3,6 | 3,6–5,7 | 5,7–8,8 | 3,6–5,7 |
| Dirección del viento | Sur–Suroeste | Suroeste | Suroeste | Suroeste |
| Población afectada | Villa María del Triunfo | Carabayllo | Villa María del Triunfo | Miraflores |
| Impacto sobre el suelo | Sí (infiltración de contaminantes) | Sí (lixiviados percolados) | Sí (infiltración de contaminantes) | Sí (lixiviados percolados) |
| Cultivos agrícolas colindantes | Sí | No | No | No |
| Disposición final del efluente tratado | Río Lurín + Reúso | Reúso | Río Lurín + Reúso | Parques y jardines (radio $\sim$ 2 km) |

En la etapa de campo se consultó a los pobladores del área de influencia directa (AID) de cada una de las PTAR. En ese sentido, las plantas de San Bartolo y María Reiche fueron calificadas por un número importante de encuestados con un alto nivel de olores desagradables, mientras que la PTAR Manchay fue mayormente asociada a un nivel medio. No obstante, la mayoría de los encuestados del AID de San Bartolo la señaló con un nivel bajo de olores, mientras que en Santa Rosa el 70 % de los participantes indicó la presencia de malos olores.

En relación con la percepción de emisiones gaseosas, la mayor parte de los encuestados clasificó su presencia en niveles medio o bajo; sin embargo, se registró una proporción relevante que la calificó como alta en el caso de María Reiche y San Bartolo. Por otra parte, respecto a la percepción de contaminación de suelos, se observó consenso alrededor de los niveles bajo o sin contaminación, lo que responde a que esta evaluación provino exclusivamente de percepciones y no de mediciones técnicas (Tabla 4).

**Tabla 4.** Percepción de los pobladores del área de influencia directa respecto a las PTAR evaluadas.

| Percepción | Categoría | San Bartolo (%) | Santa Rosa (%) | Manchay (%) | María Reiche (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Malos olores (AID) | Alto nivel | 33,3 | 10,0 | 16,7 | 30,0 |
| | Nivel medio | 0,0 | 20,0 | 58,3 | 35,0 |
| | Nivel bajo | 66,7 | 0,0 | 16,7 | 15,0 |
| | Sin olores | 0,0 | 70,0 | 8,3 | 20,0 |
| Percepción de gases (AID) | Alta | 33,3 | 10,0 | 0,0 | 25,0 |
| | Media | 0,0 | 10,0 | 45,5 | 15,0 |
| | Baja | 66,7 | 10,0 | 27,3 | 40,0 |
| | Sin percepción | 0,0 | 70,0 | 27,3 | 20,0 |
| Contaminación de suelos (AID) | Alta | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,0 |
| | Moderada | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,0 |
| | Baja | 66,7 | 0,0 | 9,1 | 50,0 |
| | Sin contaminación | 33,3 | 100,0 | 90,9 | 15,0 |

### *B. Evaluación de los impactos ambientales de las PTAR*

Para la evaluación de los impactos ambientales de las plantas se empleó la metodología propuesta por Conesa [13], lo que permitió cuantificar los indicadores estipulados para la etapa de operación y mantenimiento. De ese modo, para la planta San Bartolo, la calificación promediada entre los tres indicadores clave (Calidad del aire, salud humana, Calidad de vida de las comunidades cercanas y Calidad del suelo, entorno natural) fue de 51 puntos, que equivale a un nivel "Alto" impacto. En contraste, para Santa Rosa, el promedio obtenido de sus tres indicadores claves arrojó 45,7 puntos, que equivale a un nivel "Moderado" impacto. Para Manchay y María Reiche solo se pudo cuantificar un indicador clave, dando promedios equivalentes a "moderado" nivel de impacto. Este resultado no resulta tan positivo, pues, un nivel moderado es causal de alerta, sobre todo, considerando que las áreas de influencia directa tienen potencial efecto en la salud de las personas y, por otra parte, condiciona los niveles de desarrollo en las actividades que cotidianamente los ciudadanos realizan en esos territorios.

### *C. Propuesta de alternativas de mitigación de los impactos ambientales de las PTAR*

De la evaluación de los impactos ambientales inherentes a las PTAR, se definió las opciones de mejora que puedan solucionar o mitigar estos impactos. De ese modo, la propuesta de empleo de energías renovables fue común tanto para San Bartolo como Manchay, en donde se busca la reducción de los costos producto del proceso de aireación en la planta. El empleo de tecnologías de tratamiento adicional fue común para todas las plantas evaluadas, siendo implícita la propuesta de mejorar de la tecnología de control automatizado para el ajuste de tiempo en San Bartolo; mejora de los sistemas de nanofiltración y de ósmosis inversa en Santa Rosa y técnica de monitoreo de emisión de gases malolientes en el tanque ecualizador de María Reiche.

### *D. Discusión*

Los resultados obtenidos en la evaluación comparativa de las plantas de tratamiento de aguas residuales confirman que el desempeño ambiental de estas infraestructuras no depende exclusivamente de su capacidad instalada, sino de la integración adecuada entre tecnología de tratamiento, condiciones operativas y gestión ambiental. Este hallazgo es coherente con los enfoques contemporáneos de la ingeniería ambiental, que conciben el tratamiento de aguas residuales como un sistema complejo orientado no solo a la remoción de contaminantes, sino también a la sostenibilidad de los recursos hídricos y la minimización de impactos secundarios [1], [2].

A nivel internacional, diversos estudios han demostrado que la modernización tecnológica y la incorporación de sistemas avanzados de monitoreo permiten mejorar de manera significativa la eficiencia de los procesos de tratamiento y el control de contaminantes [1], [2]. En este sentido, los resultados observados en las plantas que incorporan tecnologías biológicas más avanzadas son consistentes con la literatura, la cual destaca que los sistemas de mayor complejidad técnica tienden a presentar mejores indicadores de desempeño ambiental, aunque a costa de mayores requerimientos energéticos y de operación [6], [7]. Esta relación entre eficiencia y demanda operativa subraya la necesidad de evaluar las plantas de tratamiento desde un enfoque costo–beneficio integral, especialmente en contextos urbanos de países en desarrollo.

En el contexto latinoamericano, los hallazgos del presente estudio se alinean con investigaciones previas que evidencian avances heterogéneos en la gestión y reutilización de aguas residuales tratadas [4], [7]. Si bien existen experiencias exitosas orientadas a la economía circular y al reaprovechamiento del recurso hídrico, estas prácticas aún no se encuentran generalizadas, y persisten brechas significativas asociadas a limitaciones técnicas, institucionales y financieras. Los impactos ambientales identificados, particularmente aquellos clasificados como moderados y severos, reflejan problemáticas estructurales similares a las reportadas en estudios urbanos realizados en Colombia y otros países de la región, donde el vertimiento de aguas residuales y la gestión inadecuada de subproductos del tratamiento continúan afectando la calidad de los cuerpos de agua y los ecosistemas asociados [5], [11].

Asimismo, los resultados ponen en evidencia que incluso las plantas de tratamiento pueden generar impactos ambientales propios cuando no se aplican criterios rigurosos de diseño, operación y mantenimiento. Este aspecto ha sido ampliamente documentado en evaluaciones de impacto ambiental asociadas tanto a la construcción como a la fase operativa de estas infraestructuras, especialmente en relación con la gestión de lodos, la emisión de olores y la alteración del entorno inmediato [8], [12]. La percepción social negativa registrada en áreas de influencia de algunas plantas evaluadas refuerza la necesidad de incorporar variables sociales y territoriales en el análisis del desempeño ambiental, más allá de los indicadores técnicos tradicionales.

Desde el punto de vista metodológico, la aplicación de un enfoque multicriterio para la identificación y valoración de impactos permitió integrar de manera sistemática aspectos físicos, biológicos y sociales, facilitando una interpretación más completa de los resultados. En este sentido, el uso de la metodología propuesta por Conesa resulta pertinente, ya que proporciona una estructura robusta para jerarquizar impactos, identificar efectos acumulativos y orientar la toma de decisiones en proyectos de infraestructura ambiental [13]. La incorporación de este enfoque fortalece la validez del análisis y permite comparar los resultados obtenidos con evaluaciones desarrolladas en otros contextos geográficos y tecnológicos.

Los resultados confirman que la mejora del desempeño ambiental de las plantas de tratamiento de aguas residuales requiere una visión integral de ingeniería, en la que la selección tecnológica, la gestión operativa y la evaluación sistemática de impactos ambientales se articulen como componentes inseparables. Este enfoque resulta fundamental para avanzar hacia sistemas de saneamiento más eficientes, sostenibles y socialmente aceptables, en línea con los desafíos actuales de la gestión hídrica urbana.

## CONCLUSIONES

Las plantas de tratamiento de aguas residuales evaluadas evidenciaron diferencias significativas en términos de eficiencia operativa, magnitud de los impactos ambientales generados en sus áreas de influencia y percepción social asociada a su funcionamiento. Si bien, desde el punto de vista técnico, la mayoría de las plantas alcanzó niveles de tratamiento compatibles con las especificaciones normativas para la calidad del efluente, los resultados ponen de manifiesto que el cumplimiento de estándares no garantiza, por sí solo, un desempeño ambiental integral ni una adecuada aceptación social.

La cuantificación de impactos ambientales mostró que el 73 % de los criterios evaluados se clasificó en un nivel de impacto moderado, mientras que los impactos insignificantes y severos representaron el 11,5 % cada uno, y los impactos críticos alcanzaron el 4 %. No obstante, la intensidad y relevancia de estos impactos variaron en función de las características sociales y territoriales de las áreas de influencia de cada planta, evidenciando la necesidad de incorporar variables contextuales en los procesos de evaluación ambiental. Desde la perspectiva de la población aledaña, el principal impacto negativo identificado estuvo asociado al deterioro de la calidad de vida, particularmente en el entorno de la planta de San Bartolo, donde la emisión de olores constituye una fuente recurrente de molestia. En este sentido, se recomienda la implementación de sistemas de control de emisiones odoríferas, sustentados en mediciones sistemáticas que permitan establecer líneas base y vincular de manera objetiva la emisión con el tipo de fuente y las condiciones operativas.

Los resultados confirman que la incorporación de tecnologías de tratamiento más avanzadas, el fortalecimiento de los mecanismos de control de emisiones y una gestión más eficiente de los residuos generados en las plantas de tratamiento pueden contribuir de manera significativa a la mitigación de impactos ambientales y a la mejora del desempeño global de estos sistemas. No obstante, la adopción de estas medidas debe estar precedida por evaluaciones técnicas y económicas rigurosas que orienten la toma de decisiones de inversión por parte de las autoridades competentes, garantizando soluciones sostenibles, eficientes y socialmente aceptables a largo plazo.

## REFERENCIAS

[1] V. Novotny, "Sustainable urban water management," in *Water and Urban Development Paradigms: Towards an Integration of Engineering, Design and Management Approaches*, J. Feyen, K. Shannon, and M. Neville, Eds. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2008, pp. 37–50, doi: 10.1201/9780203884102-9.

[2] P. Kokkinos, J. R. Comia Jr., S. Caucci, H. Hettiarachchi, F. C. Ballesteros, G. Oron, M. Salgot, and I. K. Kalavrouziotis, "Wastewater and sludge reuse: Selected case studies across the globe," *Desalination and Water Treatment*, vol. 250, pp. 65–79, 2022, doi: 10.5004/dwt.2022.28183.

[3] A. O. Baarimah, M. A. Bazel, W. S. Alaloul, M. Y. D. Alazaiza, T. M. Al-Zghoul, B. Almuhaya, A. Khan, and A. W. Mushtaha, "Artificial intelligence in wastewater treatment: Research trends and future perspectives through bibliometric analysis," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 10, p. 100926, 2024, doi: 10.1016/j.cscee.2024.100926.

[4] M. Félix-López, M. Ormaza-Murillo, C. Álvarez-Santana, and C. Banchon, "Exploring the impact of reclaimed water on Latin America's development," *Journal of Ecological Engineering*, vol. 24, no. 10, pp. 157–173, 2023, doi: 10.12911/22998993/169962.

[5] F. D. Cuadros Segura, A. J. Moyano Salcedo, A. M. Pabon Laverde, and J. V. Trujillo Arias, "Impacto ambiental del vertimiento de aguas servidas en aglomerados urbanos ilegales del municipio de Villavicencio, Colombia," *Tecnura*, vol. 25, no. 68, pp. 43–62, 2021, doi: 10.14483/22487638.16273.

[6] J. M. Morgan-Sagastume and M. T. Orta-Ledesma, "Tratamiento de aguas residuales municipales: ¿son los sistemas UASB + lagunas con microalgas una opción?" *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 16, no. 3, pp. xx–xx, 2025, doi: 10.24850/j-tyca-2025-03-10.

[7] A. Cáñez-Cota, "Municipal wastewater treatment plants in Mexico: Diagnosis and public policy challenges," *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 13, no. 1, pp. 184–245, 2022, doi: 10.24850/j-tyca-2022-01-05.

[8] J. J. Espinoza Eche and E. G. Santos de la Cruz, "Innovación en la gestión de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico en Lima-Perú," *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, vol. 24, no. 48, pp. 205–215, 2021, doi: 10.15381/iigeo.v24i48.21773.

[9] V. Lahera Ramón, "Infraestructura sustentable: Las plantas de tratamiento de aguas residuales," *Quivera*, vol. 12, no. 2, pp. 58–69, 2010, disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40115676004.

[10] A. Cáñez-Cota, "Municipal wastewater treatment plants in Mexico: Diagnosis and public policy challenges," *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 13, no. 1, pp. 184–245, 2022, doi: 10.24850/j-tyca-2022-01-05.

[11] F. D. Cuadros Segura, A. J. Moyano Salcedo, A. M. Pabon Laverde, and J. V. Trujillo Arias, "Impacto ambiental del vertimiento de aguas servidas en aglomerados urbanos ilegales del municipio de Villavicencio, Colombia," *Tecnura*, vol. 25, no. 68, pp. 43–62, 2021, doi: 10.14483/22487638.16273.

[12] F. S. Montero-Vega, C. S. Molina-Cedeño, B. M. Pillco-Herrera, L. B. Sarduy-Pereira, and K. Diéguez-Santana, "Evaluación del impacto ambiental de la construcción de una planta

de tratamiento de aguas residuales: Caso río Pindo Chico, Puyo, Pastaza, Ecuador," *Ciencia, Ambiente y Clima*, vol. 3, no. 1, pp. 23–39, 2020, doi: 10.22206/cac.2020.v3i1.pp23-39.

[13] V. Conesa-Fdez.-Vítora, *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*, 4th ed. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa, 2011.

## AUTORES

**Ruben Martinez Cabrera** es Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible; cuenta con una Maestría en Gestión Ambiental y es Ingeniero Geógrafo. Actualmente se desempeña como docente en la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo de la Universidad Nacional Federico Villarreal.

**Julio Cesar Minga** es Doctor en Ingeniería Ambiental e Investigación, Modelización y Análisis del Riesgo en Medio Ambiente; cuenta con una Maestría en Administración de Empresas y se desempeña como docente en la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo de la Universidad Nacional Federico Villarreal.

**María Paricoto Simón** es Magíster en Ingeniería Sanitaria y de profesión Ingeniera Sanitaria. Actualmente se desempeña como docente en la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo de la Universidad Nacional Federico Villarreal, además de ejercer labores de asesoramiento y revisión de tesis, así como funciones de proyectista.