



Estabilidad hidráulica y desempeño volumétrico del emisario submarino industrial pesquero APROFERROL S.A. en la bahía El Ferrol, Perú (2015–2024)

Hydraulic Stability and Volumetric Performance of the APROFERROL S.A. Industrial Fishing Submarine Outfall in El Ferrol Bay, Peru (2015–2024)

Elmer Saul Almendras-Paredes ^{1*}, José Mostacero- León ²

¹ Escuela de Posgrado, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú

² Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú

Elmer Saul Almendras-Paredes



<https://orcid.org/0009-0000-8399-7368>

José Mostacero- León



<https://orcid.org/0000-0003-2556-3013>

Artículo Original

Recibido: 15 de febrero de 2025

Aceptado: 01 de abril de 2025

Resumen

La bahía El Ferrol (Chimbote, Perú) ha estado sometida a presiones ambientales acumulativas derivadas de la actividad pesquera-industrial y el crecimiento urbano. Desde 2015 opera el emisario submarino industrial pesquero de APROFERROL S.A., infraestructura destinada a conducir aguas residuales industriales tratadas fuera del cuerpo semicerrado de la bahía. El estudio evaluó la estabilidad hidráulica y el desempeño volumétrico del sistema durante 2015–2024 mediante análisis longitudinal de volúmenes de recepción, evacuación y balance operativo. Se aplicó un diseño cuantitativo, no experimental y descriptivo, basado en registros mensuales y anuales consolidados. Se calcularon indicadores de cierre volumétrico y relación evacuación/recepción. Los resultados muestran alta variabilidad interanual y concentración estacional recurrente; sin embargo, en nueve de diez años la evacuación superó el 99 % del volumen recepcionado. El mayor desbalance relativo ocurrió en 2019 (3.76 %), mientras que 2024 registró el mayor volumen anual (4,972,976.35 m³) con balance de 0.03 %. Se evidencia estabilidad operativa sostenida.

Palabras clave: emisario submarino; estabilidad hidráulica; desempeño volumétrico; balance operativo; aguas residuales industriales; bahía El Ferrol.

Abstract

El Ferrol Bay (Chimbote, Peru) has been subjected to cumulative environmental pressures derived from fishing-industrial activities and urban expansion. Since 2015, the industrial fishing submarine outfall operated by APROFERROL S.A. has conveyed treated industrial wastewater outside the semi-enclosed water body of the bay. This study assessed the hydraulic stability and volumetric performance of the system over the 2015–2024 period through a longitudinal analysis of reception, discharge, and operational balance volumes. A quantitative, non-experimental, descriptive design was applied, based on consolidated monthly and annual operational records. Volumetric closure indicators and discharge-to-reception ratios were calculated. Results reveal marked interannual variability and recurrent seasonal concentration; however, in nine of the ten evaluated years, discharge exceeded 99% of the received volume. The highest relative imbalance occurred in 2019 (3.76%), whereas 2024 recorded the highest annual volume (4,972,976.35 m³) with a balance of 0.03%. Overall, sustained operational stability was evidenced.

Keywords: submarine outfall; hydraulic stability; volumetric performance; operational balance; industrial wastewater; El Ferrol Bay.

*Autor para correspondencia: E. mail: elmeralmendras@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/rebiol.2025.45.01.13>

Citar como:

Almendras-Paredes, E., & Mostacero-León, J. (2025). Estabilidad hidráulica y desempeño volumétrico del emisario submarino industrial pesquero APROFERROL S.A. en la bahía El Ferrol, Perú (2015–2024). *REBIOL*, 45(1), 108-113.



1. Introducción

Las zonas marino-costeras del Perú constituyen espacios de alta relevancia estratégica debido a la concentración de actividades industriales, pesqueras, portuarias y urbanas que sustentan una proporción significativa de la dinámica económica nacional. Sin embargo, la superposición intensiva de estos usos genera presiones ambientales acumulativas que afectan la calidad del agua, la integridad ecológica y la provisión de servicios ecosistémicos esenciales (Gonzales et al., 2014). En cuerpos de agua semicerrados, donde la renovación hidrodinámica es limitada y los tiempos de residencia del agua son prolongados, dichas presiones tienden a amplificarse, favoreciendo la acumulación de materia orgánica, el enriquecimiento trófico y la persistencia de contaminantes.

La bahía El Ferrol, localizada en la ciudad de Chimbote, representa uno de los casos más emblemáticos de transformación ambiental asociada al desarrollo industrial pesquero y al crecimiento urbano acelerado desde mediados del siglo XX. Diversos estudios han documentado la degradación progresiva de sus condiciones físico-químicas y ecológicas, incluyendo la acumulación de sedimentos finos ricos en materia orgánica, episodios de hipoxia en el fondo marino y modificaciones geomorfológicas del litoral vinculadas a intervenciones antrópicas (Loayza, 1998, 2002; Sánchez et al., 2008; Ganoza et al., 2020; Loayza, 2021). Estos procesos no solo alteraron la dinámica biogeoquímica del sistema, sino que también incidieron en la estructura socioeconómica del territorio costero.

Ante este escenario, el Estado peruano formalizó instrumentos de gestión orientados a la recuperación ambiental de la bahía, entre ellos el Plan de Recuperación Ambiental aprobado por el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2011, 2012), en concordancia con los lineamientos de la Política Nacional Ambiental al 2030 (MINAM, 2021). Dentro de las medidas estructurales implementadas, la puesta en operación del emisario submarino industrial pesquero de APROFERROL S.A. en 2015 constituyó una intervención clave en la gestión de efluentes industriales, al redirigir las aguas residuales tratadas hacia un punto de descarga externo al cuerpo de agua semicerrado, reduciendo la presión directa sobre el sistema interno (García-Nolazco & Cárdena-Toribio, 2025).

La sola implementación de una infraestructura de conducción de efluentes no constituye evidencia suficiente de eficacia operativa sostenida. En sistemas marino-costeros semicerrados con pasivos ambientales acumulativos, la efectividad de una medida estructural

depende de su desempeño funcional en el tiempo, de su capacidad de respuesta ante variaciones estacionales de carga hidráulica y del mantenimiento de cierres volumétricos compensados entre recepción y evacuación. En el caso de la bahía El Ferrol, donde el proceso de recuperación ambiental enfrenta condicionantes históricos y presiones persistentes, la evaluación técnica de los instrumentos implementados resulta indispensable para sustentar su contribución real al control de efluentes (MINAM, 2011, 2012; Loayza, 2021; Loayza-Aguilar, 2022). La ausencia de análisis longitudinales basados en indicadores operativos limita la verificación objetiva del rol del emisario dentro del esquema de recuperación ambiental.

Desde esta perspectiva, el análisis del desempeño volumétrico y de la estabilidad hidráulica constituye una aproximación cuantitativa robusta al funcionamiento del sistema. La evaluación sistemática de los volúmenes recepcionados y evacuados, así como del balance operativo resultante, permite determinar la consistencia hidráulica del emisario y su capacidad para sostener continuidad operativa bajo escenarios de alta exigencia industrial, coherentes con la dinámica del sector pesquero (García-Nolazco & Cárdena-Toribio, 2025). Este enfoque se alinea con la necesidad de fortalecer la gestión ambiental basada en evidencia empírica y trazabilidad de cargas hidráulicas (MINAM, 2021).

Bajo este marco analítico, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la estabilidad hidráulica y el desempeño volumétrico del emisario submarino industrial pesquero de APROFERROL S.A. en la bahía El Ferrol durante el periodo 2015–2024, mediante el análisis longitudinal de los volúmenes mensuales y anuales de recepción, evacuación y balance operativo de aguas residuales industriales tratadas.

2. Materiales y Métodos

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con diseño no experimental y alcance descriptivo longitudinal retrospectivo, orientado a evaluar la estabilidad hidráulica y el desempeño volumétrico del emisario submarino industrial pesquero de APROFERROL S.A. durante el periodo 2015–2024. La investigación se sustentó exclusivamente en el análisis de información histórica generada en el marco de la operación regular del sistema, sin intervención directa sobre la infraestructura ni modificación de sus condiciones funcionales.

La unidad de análisis estuvo constituida por los registros mensuales consolidados de recepción y evacuación de aguas residuales industriales tratadas, expresados en metros cúbicos (m³), correspondientes a diez años

consecutivos de funcionamiento. Dado que se empleó la totalidad de los registros disponibles para el periodo evaluado, el estudio tuvo carácter censal y no requirió procedimientos de muestreo.

Los datos fueron obtenidos a partir de los reportes operativos oficiales proporcionados por APROFERROL S.A., que incluyen volúmenes mensuales y totales anuales de recepción y vertimiento. Previamente al análisis, la información fue organizada cronológicamente y sometida a un proceso de verificación interna, contrastando consolidaciones mensuales y anuales a fin de asegurar coherencia aritmética y consistencia temporal. Posteriormente, los datos fueron sistematizados en matrices digitales para su procesamiento estadístico.

El desempeño volumétrico fue evaluado mediante indicadores derivados directamente de los registros consolidados. Se estimaron los volúmenes mensuales y anuales de recepción y evacuación, el balance operativo anual definido como la diferencia entre el volumen recepcionado y el evacuado (Recepción – Evacuación), la razón porcentual evacuación/recepción como indicador de correspondencia hidráulica y el balance relativo anual expresado como proporción porcentual del volumen recepcionado.

El tratamiento de los datos incluyó estadística descriptiva basada en totales, diferencias absolutas y proporciones relativas. Asimismo, se realizó un análisis de la serie temporal con el propósito de identificar tendencias interanuales, patrones de concentración intraanual y estabilidad volumétrica del sistema a lo largo del periodo evaluado. El alcance metodológico se limitó estrictamente al análisis operativo hidráulico; por consiguiente, no se incorporaron variables fisicoquímicas, biológicas ni indicadores ambientales externos al registro volumétrico del emisario.

3. Resultados

Tendencia interanual del volumen operado (2015–2024)

Durante el periodo 2015–2024 se registró una variabilidad interanual significativa en los volúmenes de aguas residuales industriales tratadas gestionados por el emisario submarino. El volumen anual mínimo correspondió a 2015 (419,908 m³; junio–diciembre), mientras que el máximo se alcanzó en 2024 (4,972,976.35 m³), equivalente a un incremento de 1,084 % respecto al primer año operativo parcial (Tabla 1).

A partir de 2018 se observa una fase de intensificación hidráulica, con volúmenes anuales superiores a 3×10^6 m³ en cinco de los siete años posteriores (2018, 2020, 2021,

2022 y 2024). Los tres años de mayor carga fueron 2024 (4.97×10^6 m³), 2022 (4.11×10^6 m³) y 2021 (3.99×10^6 m³).

Tabla 1

Resumen anual del desempeño volumétrico del emisario submarino (2015–2024)

Año	Recepción (m ³)	Evacuación (m ³)	Balance (m ³)	Evacuación /Recepción (%)	Balance relativo (%)
2015*	419,908	419,905	3	100	0
2016	1,979,394	1,980,457	–1,063	100.05	–0.05
2017	1,952,480	1,944,085	8,395	99.57	0.43
2018	3,380,666.70	3,378,911	1,755.70	99.95	0.05
2019	2,737,517.00	2,634,471	103,046.00	96.24	3.76
2020	3,470,780.62	3,475,121	–4,340.38	100.13	–0.13
2021	3,999,020	4,003,263	–4,243	100.11	–0.11
2022	4,109,896.50	4,107,949	1,947.50	99.95	0.05
2023	2,786,819.50	2,786,566	253.5	99.99	0.01
2024	4,972,976.35	4,971,503	1,473.35	99.97	0.03

Nota. En 2015 los datos corresponden únicamente a junio–diciembre.

Estacionalidad y concentración intraanual

La serie mostró concentración recurrente del volumen anual en tres meses de máxima recepción. En ocho de los diez años evaluados, estos tres meses representaron más del 50 % del total anual.

El mayor nivel de concentración se registró en 2024 (62.04 %), seguido de 2022 (59.53 %) y 2016 (65.00 %). Los meses con mayor recurrencia en los picos fueron mayo, noviembre y diciembre, aunque con variaciones interanuales (Tabla 2).

Tabla 2

Concentración del volumen anual en los tres meses de mayor recepción

Año	Meses predominantes	Concentración Top 3 (%)
2015*	Dic, Nov, Oct	95.48
2016	Dic, Nov, Jun	65
2017	May, Ene, Jun	63.3
2018	May, Dic, Nov	53.41
2019	Nov, May, Jul	53.76
2020	Dic, Jun, May	54.81
2021	May, Nov, Dic	52.43
2022	Dic, Jun, May	59.53
2023	Nov, Ago, Oct	51.6

Nota. En 2015 el porcentaje corresponde al periodo junio–diciembre.

Balance operativo y estabilidad hidráulica

La relación evacuación/recepción se mantuvo cercana al 100 % en nueve de los diez años evaluados, con balances relativos anuales comprendidos entre -0.13% y $+0.43\%$. El único año con desviación significativa fue 2019 (3.76%), correspondiente a $103,046\text{ m}^3$ de diferencia anual.

El año 2023 presentó el balance más próximo al equilibrio absoluto (0.009%). En 2024, bajo el mayor volumen anual de toda la serie, el sistema evacuó 99.97% del volumen recepcionado.

En términos volumétricos, la evidencia indica ausencia de desbalances estructurales persistentes durante el periodo 2015–2024 y una estabilidad hidráulica sostenida incluso bajo escenarios de máxima exigencia operativa.

4. Discusión

El análisis de la serie 2015–2024 evidencia una evolución significativa en la magnitud de los volúmenes gestionados por el emisario submarino industrial pesquero de APROFERROL S.A. Tal como se muestra en la Tabla 1, el volumen anual recepcionado pasó de $419,908\text{ m}^3$ en 2015 (periodo junio–diciembre) a $4,972,976.35\text{ m}^3$ en 2024, lo que representa un incremento acumulado de $1,084\%$ respecto al primer año operativo parcial. Este aumento no solo refleja una mayor carga hidráulica gestionada por el sistema, sino también la consolidación operativa del emisario como infraestructura central en la conducción de efluentes industriales tratados fuera del cuerpo semicerrado de la bahía El Ferrol.

A partir de 2018 se identifica una fase de intensificación hidráulica, con volúmenes anuales superiores a $3 \times 10^6\text{ m}^3$ en cinco de los siete años posteriores (Tabla 1). Los años 2024, 2022 y 2021 registraron los valores máximos de la serie, configurando escenarios de alta exigencia operativa. Este comportamiento adquiere relevancia si se considera el contexto histórico de la bahía, caracterizado por acumulación de materia orgánica en sedimentos y procesos de deterioro ambiental previamente documentados (Loayza, 1998, 2002; Ganoza et al., 2020). En este marco, la capacidad del emisario para gestionar volúmenes crecientes sin generar desbalances persistentes constituye un

elemento técnico clave dentro del proceso de control de presiones industriales promovido por el Plan de Recuperación Ambiental (MINAM, 2011, 2012).

La estacionalidad intraanual constituye otro hallazgo relevante. La Tabla 2 muestra que, en ocho de los diez años evaluados, más del 50% del volumen anual se concentró en tres meses específicos. En 2024, estos meses representaron 62.04% del total anual, mientras que en 2022 alcanzaron 59.53% y en 2016, 65% . Esta concentración confirma que el sistema opera bajo condiciones de demanda fluctuante y picos operativos marcados, asociados a la dinámica productiva del sector pesquero-industrial. La recurrencia de mayo, noviembre y diciembre como meses predominantes indica una estructura estacional relativamente consistente, aunque con variaciones interanuales que impiden asumir un patrón rígido.

Desde una perspectiva operativa, esta concentración representa un escenario de “estrés hidráulico” periódico. En sistemas con limitada capacidad de regulación, tales concentraciones podrían traducirse en acumulaciones progresivas o fallas en la evacuación. Sin embargo, la información consignada en la Tabla 1 demuestra que, incluso en años con alta concentración intraanual (2022 y 2024), la relación evacuación/recepción se mantuvo próxima a la unidad, lo que indica que el sistema absorbió los incrementos sin generar acumulaciones estructurales.

El análisis del balance operativo refuerza esta interpretación. En nueve de los diez años evaluados, los balances relativos anuales se situaron entre -0.13% y $+0.43\%$, valores que, en términos hidráulicos, pueden considerarse marginales. La relación evacuación/recepción osciló entre 99.57% y 100.13% , evidenciando cierres volumétricos prácticamente compensados. El único año con desviación significativa fue 2019, con un balance relativo de 3.76% ($103,046\text{ m}^3$), tal como se observa en la Tabla 1. No obstante, esta diferencia no mostró continuidad en los años posteriores, lo que sugiere un ajuste operativo transitorio más que un desbalance estructural.

Particularmente ilustrativo es el caso de 2023, cuyo balance relativo fue de 0.009% , el valor más cercano al equilibrio absoluto de toda la serie. Este resultado indica una correspondencia casi exacta entre los volúmenes recepcionados y evacuados. De igual

manera, en 2024 —año de máxima carga hidráulica— el sistema evacuó 99.97 % del volumen ingresado, lo que confirma estabilidad volumétrica incluso bajo el mayor nivel de exigencia registrado.

Estos resultados adquieren significado dentro del contexto ambiental de la bahía El Ferrol, donde la recuperación depende de múltiples factores interrelacionados, incluidos pasivos históricos en sedimentos y procesos geomorfológicos (Loayza, 2021; Ganoza et al., 2020). Si bien el presente estudio no evalúa directamente parámetros fisicoquímicos ni biológicos, la estabilidad volumétrica del emisario constituye un componente técnico necesario para reducir la presión directa de efluentes industriales sobre el sistema interno, en coherencia con los instrumentos de gestión ambiental vigentes (MINAM, 2011, 2012).

Es importante enfatizar que el alcance del estudio se limita al análisis operativo volumétrico. La correspondencia hidráulica observada no implica, por sí misma, la ausencia de impactos ambientales, sino que indica consistencia en la conducción y evacuación de los volúmenes registrados. La integración de estos resultados con evaluaciones de calidad de agua y dinámica sedimentaria permitiría, en futuras investigaciones, consolidar una visión más integral del proceso de recuperación de la bahía.

En conjunto, la evidencia presentada en las Tablas 1 y 2 sustenta la interpretación de que el emisario submarino industrial pesquero de APROFERROL S.A. ha mostrado estabilidad hidráulica sostenida durante el periodo 2015–2024, incluso bajo escenarios de alta variabilidad estacional e intensificación interanual de la carga operada.

5. Conclusiones

El análisis longitudinal del periodo 2015–2024 evidencia que el emisario submarino industrial pesquero de APROFERROL S.A. operó bajo un régimen de alta variabilidad mensual e interanual, asociado a la dinámica productiva del sector pesquero-industrial, pero mantuvo estabilidad hidráulica sostenida a lo largo de la década evaluada.

La marcada concentración estacional de la carga hidráulica no se tradujo en desbalances estructurales persistentes, ya que la correspondencia entre recepción y evacuación se mantuvo cercana a la unidad en nueve

de los diez años analizados. Los balances operativos anuales, expresados en términos relativos, fueron de baja magnitud, lo que indica cierres volumétricos compensados y continuidad funcional del sistema.

Incluso en escenarios de máxima exigencia operativa, como los registrados en 2022 y 2024, el emisario evacuó prácticamente la totalidad del volumen recepcionado, confirmando su capacidad para absorber incrementos sustanciales de carga sin comprometer su consistencia operativa. En términos volumétricos, la evidencia respalda la existencia de un desempeño estable y técnicamente coherente durante el periodo de estudio.

6. Contribución de los autores

APE: concepción y diseño del estudio, interpretación de resultados, redacción y revisión crítica del contenido, aprobación definitiva del manuscrito

APE: Adquisición, análisis e interpretación de datos, elaboración del borrador del artículo

JML: Adquisición, análisis e interpretación de datos, elaboración del borrador del artículo.

7. Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

8. Referencias Bibliográficas

- Ganoza, F., Guzmán, M., García, V., Enríquez, E., & Velazco, F. (2020). Condiciones ambientales y sedimentológicas de la bahía El Ferrol, Chimbote (junio 2002). *Boletín del Instituto del Mar del Perú*, 35(2), 304–334.
- García-Nolazco, V., & Cárdenas-Toribio, J. B. (2025). Bahía El Ferrol: Nueve años de funcionamiento del emisor submarino. *Ciencia Latina: Revista Multidisciplinar*, 9(4), 3896–3935.
- Gonzales, G. F., Zevallos, A., Gonzales-Castañeda, C., Núñez, D., Gastañaga, C., Cabezas, C., Naeher, L., Levy, K., & Steenland, K. (2014). Contaminación ambiental, variabilidad climática y cambio climático: Una revisión del impacto en la salud de la población peruana. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 31(3), 547–556. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342014000300021
- Loayza, R. (1998). Génesis de la perturbación de la bahía El Ferrol. Universidad Nacional del Santa / Instituto Ecológico Natura.

Loayza, R. (2002). Contaminación y erosión en la bahía El Ferrol (Chimbote, Perú). Boletín de Lima, 24(130), 113–133.

Loayza, R. (2021). Evidencia de procesos erosivos en la bahía El Ferrol en Perú, para el periodo 1974–2020. Revista de Ciencias Ambientales, 55(1), 86–117.
<https://doi.org/10.15359/rca.55-1.5>

Loayza-Aguilar, R. (2022). Avances en la recuperación ambiental de la bahía El Ferrol (Chimbote, Perú): Evaluación rápida. Arnaldoa, 29(2), 319–332.
<https://doi.org/10.22497/arnaldoa.292.29108>

Ministerio del Ambiente. (2011). Plan de recuperación ambiental de la bahía El Ferrol (Chimbote, Perú).
https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/07/rs_004-2012-minam_aprueban_plan_recuperacion_ambiental_bahia_el_ferrol2.pdf

Ministerio del Ambiente. (2012). Resolución Suprema N.º 004-2012-MINAM, aprueban el Plan de Recuperación Ambiental de la bahía El Ferrol. Diario Oficial El Peruano.

Ministerio del Ambiente. (2021). Política Nacional Ambiental al 2030 (Decreto Supremo N.º 023-2021-MINAM).

Sánchez, G., Enríquez, E., & García, V. (2008). Evaluación ambiental en zonas marino costeras del Perú: Bahías El Ferrol y Coishco, Chimbote. Boletín del Instituto del Mar del Perú, 35(1), 1–20.