# Evaluation of the Efficiency of the Tamboril Wastewater Treatment Plant: Extended Aeration Activated Sludge System

Vladimir Antonio Rodríguez-Núñez
*Universidad Tecnológica de Santiago, UTESA, República Dominicana*, sostenibilidad@utesa.edu

**Abstract – Wastewater treatment plants (WWTPs) play a crucial role in protecting the environment and public health by ensuring that treated effluents meet regulatory standards. This study evaluates the efficiency of the Tamboril WWTP, designed under the extended aeration activated sludge system, in removing key contaminants: Biochemical Oxygen Demand ($BOD_5$), Chemical Oxygen Demand (COD), Suspended Solids (SS), Total Nitrogen (N), and Total Phosphorus (P). Based on historical data analysis (2010–2024), the average annual influent flow was found to be below the installed capacity of 85 L/s, indicating underutilization of the system. Actual influent values showed significant increases in organic load and nutrients, occasionally exceeding design parameters. Statistical analysis revealed a positive correlation between SS concentration in Tank 2 and the removal of $BOD_5$ (r = 0.43), N-$NH_4$ (r = 0.43), and phosphorus (P-$PO_4$, r = 0.56). These results suggest that operating with SS concentrations between 5,000 and 6,000 mg/L in Tank 2 optimizes phosphorus removal, achieving efficiencies close to 80%, without compromising the removal of other contaminants. The study highlights the need for operational adjustments in the WWTP to maximize efficiency, particularly in nutrient removal, contributing to the achievement of Sustainable Development Goals related to water quality. These findings are relevant for the optimization of plants with similar characteristics.**

**Keywords: wastewater treatment, activated sludge, operational efficiency, nutrient removal, environmental sustainability**

# Evaluación de la Eficiencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Tamboril: Sistema de Lodos Activados con Aireación Extendida

Vladimir Antonio Rodríguez-Núñez
*Universidad Tecnológica de Santiago, UTESA, República Dominicana,* sostenibilidad@utesa.edu

***Resumen–*** ***Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) desempeñan un papel crucial en la protección del medio ambiente y la salud pública, al garantizar que los efluentes tratados cumplan con estándares regulatorios. Este estudio evalúa la eficiencia de la PTAR Tamboril, diseñada bajo el sistema de lodos activados con aireación extendida, en términos de remoción de contaminantes clave: Demanda Bioquímica de Oxígeno ($DBO_5$), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos (SS), Nitrógeno Total (N) y Fósforo Total (P). A partir del análisis de datos históricos (2010-2024), se observó que el caudal influente promedio anual se encuentra por debajo de la capacidad instalada de 85 L/s, indicando subutilización del sistema. Los valores reales del influente presentan incrementos significativos en la carga orgánica y los nutrientes, superando en ocasiones los valores de diseño. El análisis estadístico muestra una correlación positiva entre la concentración de SS en el tanque 2 y la remoción de $DBO_5$ ($r = 0.43$), $N\text{-}NH_4$ ($r = 0.43$) y fósforo ($P\text{-}PO_4$, $r = 0.56$). Estos resultados sugieren que operar con concentraciones de SS entre 5,000 y 6,000 mg/L en el tanque 2 optimiza la remoción de fósforo, alcanzando eficiencias cercanas al 80%, sin comprometer la remoción de otros contaminantes. El estudio resalta la necesidad de ajustes operativos en la PTAR para maximizar su eficiencia, especialmente en la remoción de nutrientes, contribuyendo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con la calidad del agua. Estos hallazgos son relevantes para la optimización de plantas con características similares.***

***Palabras clave-- tratamiento de aguas residuales, lodos activados, eficiencia operativa, remoción de nutrientes, sostenibilidad ambiental***

## I. Introducción

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) son una parte muy importante de toda infraestructura urbana, que debe lograr la calidad deseada de los efluentes con una operación rentable. El control de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) es una tarea compleja debido a las perturbaciones que se producen en las concentraciones y caudales de los afluentes de aguas residuales, el comportamiento complicado de los microorganismos y los requisitos de calidad de los efluentes establecidos [1].

La necesidad de proteger el medio ambiente y garantizar la salud pública ha impulsado el desarrollo de sistemas de tratamiento de aguas residuales más eficientes, atrayendo atención a nivel mundial. Además, los vínculos entre la calidad del agua y los Objetivos de Desarrollo Sostenible han sido reconocidos como prioridades clave en la mayoría de los países, tanto desarrollados como en desarrollo [2].

El aumento de la población y la industrialización han tenido un impacto sustancial en la gestión de las plantas de tratamiento de aguas residuales [3]. Uno de los principales desafíos que enfrentan las plantas de tratamiento de aguas residuales es el efecto de la carga orgánica repentina, ya que un aumento inesperado en la cantidad de materia orgánica que entra en el sistema puede interrumpir todo el proceso de tratamiento [4] y causar que la calidad del agua tratada no cumpla con los estándares regulatorios establecidos [5].

La PTAR Tamboril, diseñada con una capacidad de tratamiento de 85 L/s, utiliza un sistema de lodos activados con aireación extendida para procesar un influente con características de diseño que incluyen una Demanda Bioquímica de Oxígeno ($DBO_5$) de 343 mg/L, una Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 728 mg/L y un contenido de sólidos suspendidos (SS) de 414 mg/L. Sin embargo, los datos históricos revelan que las características reales del influente presentan variaciones significativas, con valores que en algunos casos exceden los parámetros de diseño, como en el caso de la $DBO_5$ y la DQO, mientras que el caudal promedio anual se mantiene por debajo de la capacidad instalada. Estas discrepancias destacan la importancia de evaluar la eficiencia de la planta bajo condiciones reales de operación.

El presente estudio tiene como objetivo analizar el desempeño de la PTAR Tamboril, enfocándose en la remoción de los principales contaminantes, como la $DBO_5$, la DQO, los sólidos suspendidos y los nutrientes (nitrógeno y fósforo). Además, se busca identificar oportunidades de mejora en la operación del sistema, considerando los desafíos asociados con las variaciones en las características del influente y las limitaciones inherentes al sistema de lodos activados. Este análisis proporcionará información valiosa para optimizar el desempeño de la planta y contribuirá al desarrollo de

estrategias más eficientes para el tratamiento de aguas residuales en contextos similares.

## II. METODOLOGÍA

### Zona de estudio

La experimentación se llevó a cabo en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Tamboril, ubicada en el municipio de Tamboril, en la provincia de Santiago, República Dominicana. Las coordenadas exactas de la planta son Zona 19 Q, con coordenadas Este 332291.37 m y Norte 2154171.29 m, y se encuentra a una elevación de 235 msnm.

Esta zona se caracteriza por un clima de veranos largos, cálidos y nublados, mientras que los inviernos son cortos, agradables y generalmente despejados. A lo largo del año, la temperatura varía entre los 19 °C y 33 °C, con pocas ocasiones en las que la temperatura baja de los 17 °C o supera los 34 °C. El clima presenta características de transición entre seco y húmedo, con una precipitación anual que oscila entre 600 y 900 mm [6]. El área urbana del municipio de Tamboril cuenta con un sistema de alcantarillado sanitario. Se han identificado 14,151 propiedades, de las cuales 8,684 son de uso doméstico, 250 comerciales, 26 gubernamentales, 7 industriales, 10 sociales, y 5,174 propiedades sin clasificar. Todas estas propiedades están conectadas a la red de tuberías que dirige las aguas residuales hacia la planta de tratamiento [7].

### Área de estudio

La planta de tratamiento de aguas residuales Tamboril es actualmente la principal unidad de tratamiento del municipio Tamboril. Posee un sistema de lodos activados con aireación extendida, con capacidad instalada, según su manual de operaciones, de 85 L/s.

Tabla 1. Características del influente adoptado para el diseño de la PTAR Tamboril

| Parámetro | Concentración (mg/L) | Concentración Kg/d |
|---|---|---|
| Demanda Química de Oxígeno | 728.0 | 5346.4 |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | 343.0 | 2519.0 |
| Sólidos Suspendidos | 414.0 | 3040.4 |
| Nitrógeno Total | 71.0 | 521.4 |
| Fósforo Total | 5.8 | 42.6 |

Con la carga adoptada y considerando una contribución per cápita de 50 g $DBO_5$/hab.día, se puede estimar una población contribuyente de diseño de 50,380 habitantes, lo que corresponde a una dotación per cápita de agua de 146 L/hab.día.

La depuradora cuenta con un tratamiento preliminar con cribado fino de 6 mm de apertura, seguido de un canal de retirada de arena con descarga hidráulica. Los sólidos flotantes (grasas) son removidos manualmente y dirigidos hacia una tubería horizontal que los transporta al tanque filtrante, desde donde son extraídos periódicamente mediante un camión de limpieza. El lixiviado se envía a un cárcamo equipado con dos bombas sumergibles, las cuales se activan de forma alternada. Este lixiviado es luego recirculado y mezclado con el influente.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Tamboril cuenta con un reactor de lodos activados con aireación por aire difuso, incluyendo dos cámaras de aireación y dos cámaras de sedimentación de flujo alternado. Los tanques de procesos consiste en tanques de aireación equipados con difusores de fondo, medidores de oxígeno disuelto y medidor de sólidos suspendidos, cuyo sistema opera como un sistema de tanques tipo T, conformado por cuatros tanques biológicos conectados entre sí, de los cuales los dos últimos tanques son del mismo volumen y funcionan de manera alternada (aireación y sedimentación). Este sistema de tratamiento no ha sido diseñado específicamente para la remoción de nitrógeno, pero tomando en consideración el largo tiempo de retención y las condiciones anóxicas para los lodos activados durante las fases de sedimentación en los tanques exteriores (tanques 3 y 4), se removerá una cantidad importante de nitrógeno en este punto por medio de la desnitrificación simultánea.

El ciclo completo del proceso consta de cuatro fases: A, B, C y D. Los tanques de proceso se distribuyen de la siguiente manera: los tanques 1 y 2 se utilizan para nitrificación, mientras que los tanques 3 y 4 alternan entre nitrificación y sedimentación. El tiempo de retención hidráulico y biológico es de 4 horas.

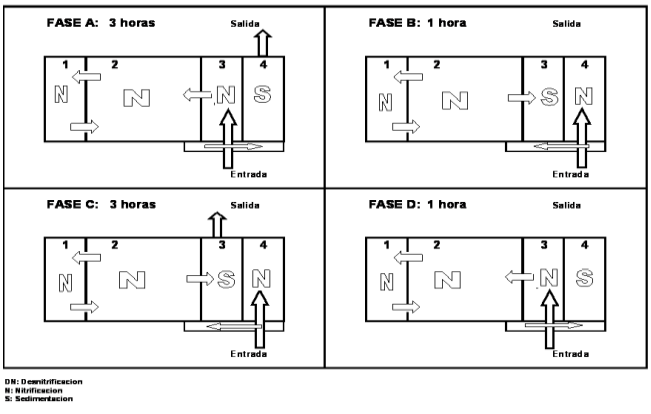


Imagen 1 Fases de proceso de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Tamboril

Fase A
En esta fase, el distribuidor de entrada dirige el agua residual al tanque nro. 3, donde los lodos permanecen en suspensión continua y son aireados por los sopladores a través de difusores de membrana fina instalados en el fondo del tanque (condiciones aerobias). Este proceso provoca la descomposición biológica de la materia orgánica y la conversión del amoníaco presente en las aguas residuales en nitrato.

Cuando las aguas residuales crudas ingresan al tanque nro. 3, desplazan un volumen equivalente de agua y lodos hacia los tanques nro. 2 y, posteriormente, al nro. 4. En los tanques nro. 1 y nro. 2, se lleva a cabo el mismo proceso que en el tanque nro. 3. En el tanque nro. 2, el volumen de agua y lodo desplazado se transfiere al tanque nro. 1 para luego ser recirculado nuevamente hacia el tanque nro. 2.

Las aguas residuales tratadas y los lodos activados pasan al tanque nro. 4, que en esta fase funciona como tanque de sedimentación final. En este tanque no hay mezcla ni entrada de oxígeno. El agua se separa de los lodos activados, los cuales se sedimentan, mientras que el agua residual tratada se dirige hacia la etapa de cloración a través de los vertedores de salida.

Fase B
En esta fase, el agua residual cruda ingresa al tanque nro. 4. En los tanques nro. 1, nro. 2 y nro. 4 se introduce oxígeno (condición aerobia), mientras que en el tanque nro. 3 se lleva a cabo la sedimentación. Durante la fase B, los vertedores de salida de los tanques nro. 3 y nro. 4 se encuentran cerrados, lo que provoca un aumento en el nivel de estos tanques. Esto permite que los lodos activados tengan tiempo suficiente para sedimentarse antes de que se abran los vertedores de salida en la siguiente fase.

Fase C
En esta fase, el agua residual también ingresa al tanque nro. 4. La aeración continúa en los tanques nro. 1, nro. 2 y nro. 4, mientras que la entrada de aire al tanque nro. 3 se cierra, permitiendo que la sedimentación continúe en este tanque. El agua se separa de los lodos activados, los cuales se sedimentan, y el agua residual tratada fluye hacia la etapa de cloración a través de los vertedores del tanque nro. 3.

Fase D
En esta fase, el agua residual cruda entra al tanque nro. 3. La aeración ocurre en los tanques nro. 1, nro. 2 y nro. 3, mientras que la entrada de aire al tanque nro. 4 se cierra, permitiendo que la sedimentación tenga lugar en este tanque. Durante la fase D, los vertedores de salida de los tanques nro. 3 y nro. 4 se mantienen cerrados, lo que provoca un aumento en el nivel de los tanques. Esto proporciona tiempo suficiente para que los lodos activados se sedimenten antes de que se abran los vertedores de salida.

Este proceso, que abarca las fases A, B, C y D, se repite de manera cíclica durante las 24 horas del día. Los lodos en exceso se retiran del tanque nro. 2 y se bombean directamente al proceso de deshidratación de lodos o hacia los lechos de secado. El agua tratada resultante se envía a la unidad de cloración.

Tabla 2 Datos técnicos y de proceso, PTAR Tamboril

| Parámetro | Valor |
|---|---|
| Volumen total de agua en el sistema | 4,900 m³ |
| Volumen de sedimentación | 1,000 m³ |
| Volumen de los tanques de aeración | 3,900 m³ |
| Rango de profundidad de los tanques | 2.8 - 3.3 m |
| Capacidad de los blowers de aire | 9 x 1,200 Nm³/h |
| Número de difusores de membrana fina | 1,812 NOPOL PIK 300 |
| Producción de oxígeno normalizado (SOTR) mínima | 623 Kg $O_2$/h |
| Número de vertederos regulables de 5 metros) | 4 unidades |
| Temperatura mínima de aguas residuales | 20°C |
| Temperatura máxima de aguas residuales | 30°C |
| Concentración de oxígeno en los tanques de aeración | 1.0 mg/l |
| Relación entre la carga de materia orgánica y la masa de lodos activados | 0.19 Kg $DBO_5$/d/kg MLSS |
| Factor de rendimiento de lodos (eficiencia de conversión de la materia orgánica a lodos) | 1.0 Kg SS/kg DBO5 |
| Producción de lodos biológicos | 3,704 kg SS/d |
| Edad mínima de los lodos en 2015 | 5.3 días |
| Concentración de MLSS (concentración de lodos suspendidos en el sistema, tanque nro. 2) | 4 Kg SS/m³ |
| Volumen aerobia (volumen de los tanques dedicados a la aeración) | 3,888 m³ |
| Edad de los lodos aerobios en el sistema | 4.2 días |
| Lodos biológicos en exceso (cantidad máxima de lodos biológicos en exceso producidos) | 3,600 kg/d |
| Consumo promedio de oxígeno por día | 8,879 kg $O_2$/d |
| Consumo promedio de energía por día | 1,700 kWh/d |
| Consumo promedio de oxígeno por hora en el tanque nro. 2 | 209 Kg $O_2$/h |
| Consumo máximo de energía por hora | 90 kW |
| Factor alfa utilizado en el proceso | 0.65 |
| Factor de conversión para cálculos de lodos | 1.9 |
| Porcentaje de tiempo en que los difusores del tanque 2 están en operación | 100% |
| Carga hidráulica de superficie | 540 m³/h |
| Carga en compuerta de vertederos | 540 m³/h (15 L/s/m) |
| Número de vertederos regulables en los tanques nro. 3 y nro. 4 | 2 unidades |

Muestreo y análisis

Los muestreos fueron realizados por el Departamento de Control de Calidad de las Aguas Residuales de la Corporación del Acueducto y Alcantarillado de Santiago (CORAASAN), entidad encargada de aplicar las técnicas analíticas necesarias para evaluar las características físicas, químicas y biológicas de los influentes, efluentes y de los procesos realizados en los sistemas de depuración de aguas residuales.

Los parámetros de calidad del agua seleccionados para esta investigación se detallan en la Tabla 3, que incluye la unidad de medida, el símbolo correspondiente y el método analítico utilizado.

Tabla 3. Parámetros, símbolo, unidad y método analítico

| **Parámetro** | **Símbolo** | **Unidad** | **Método analítico** |
|---|---|---|---|
| Oxígeno Disuelto | OD | % sat. | SM-4500-O-G |
| Temperatura | | ° C | SM-2550-B |
| Potencial de Hidrógeno | pH | - | SM-4500-H+.B |
| Sólidos Suspendidos | SS | mg/l | SM-2540-B |
| Demanda Química de Oxígeno | DQO | mg/l | SM-5220-B |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | $DBO_5$ | mg/l | SM-5210-B |
| Nitratos | $NO_3$- | mg/l | HACH-8039 |
| Amonio | $NH_4^+$ | mg/l | HACH-8038 |
| Nitrógeno Total | N | mg/l | HACH-10072 |
| Fósforo Total | P | mg/l | HACH-10210 |
| Ortofosfátos | $P\text{-}PO_4$ | mg/l | HACH-8048 |
| Coliformes totales | C.T | NMP/100ml | SM-9221-B |
| Coliformes fecales | | NMP/100ml | SM-9221-E |

## III. Resultados y Discusión

La caracterización del influente que ingresa a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Tamboril es fundamental para evaluar la eficiencia de su sistema de tratamiento y su capacidad de adaptación a las variaciones en las cargas contaminantes. Con una capacidad instalada de 85 L/s, la planta opera bajo un sistema de lodos activados con aireación extendida, diseñado para tratar un influente con parámetros específicos, como una Demanda Bioquímica de Oxígeno ($DBO_5$) de 343 mg/L, una Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 728 mg/L, y concentraciones de nutrientes como nitrógeno total (71 mg/L) y fósforo total (5.8 mg/L). Sin embargo, los datos históricos de los últimos años muestran fluctuaciones significativas en estos valores, reflejando un aumento en las cargas orgánicas y de nutrientes.

Tabla 4 Caudal, características fisicoquímicas y microbiológicas del influente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Tamboril.

| Año | Caudal | pH | $DBO_5$ | DQO | SS | N |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $m^3$/año | | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) |
| 2010 | 811,267.05 | 7.37 | 264.00 | 497.73 | 262.17 | 49.82 |
| 2011 | 549,836.06 | 7.21 | 278.15 | 564.03 | 257.27 | 75.16 |
| 2012 | 888,670.04 | 7.61 | 233.19 | 466.30 | 264.17 | 52.15 |
| 2013 | 739,812.67 | 7.34 | 336.88 | 749.05 | 293.57 | 59.90 |
| 2014 | 747,735.28 | 7.23 | 352.04 | 830.61 | 321.90 | 79.35 |
| 2015 | 540,993.80 | 7.23 | 432.57 | 968.39 | 355.82 | 89.89 |
| 2016 | 535,539.95 | 7.25 | 332.52 | 877.59 | 290.29 | 85.67 |
| 2017 | 932,915.20 | 7.37 | 234.40 | 620.54 | 293.28 | 53.59 |
| 2018 | 1,029,346.51 | 7.44 | 285.35 | 651.73 | 318.68 | 62.35 |
| 2019 | 725,975.99 | 7.47 | 335.57 | 846.88 | 340.12 | 90.25 |
| 2020 | 751,135.16 | 7.51 | 461.45 | 1,072.71 | 404.06 | 92.47 |
| 2021 | 730,766.61 | 7.36 | 603.40 | 1,445.64 | 444.45 | 98.64 |
| 2022 | 679,486.10 | 7.35 | 628.67 | 1,819.47 | 356.37 | 115.04 |
| 2023 | 840,653.68 | 7.04 | 734.00 | 2,003.91 | 375.80 | 116.43 |
| 2024 | 926,326.39 | 7.26 | 575.01 | 1,236.78 | 387.65 | 101.35 |

Continuación de la Tabla 4 Caudal, características fisicoquímicas y microbiológicas del influente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Tamboril.

| Año | $NH_4$ | $NO_3$ | P | $P\text{-}PO_4$ | C.T |
|---|---|---|---|---|---|
| | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | NMP/ 100ml |
| 2010 | 26.10 | 15.51 | 31.95 | 22.25 | 203,492,424.24 |
| 2011 | 37.91 | 11.24 | 35.79 | 23.11 | 232,715,000.00 |
| 2012 | 28.33 | 5.49 | 32.63 | 20.74 | 339,518,055.56 |
| 2013 | 36.44 | 6.97 | 33.15 | 19.61 | 561,131,944.44 |
| 2014 | 52.78 | 7.65 | 43.79 | 26.66 | 580,100,000.00 |
| 2015 | 66.35 | 13.04 | 48.76 | 35.14 | 267,840,909.09 |
| 2016 | 64.17 | 9.27 | 47.77 | 36.50 | 595,051,388.89 |
| 2017 | 36.36 | 10.70 | 33.76 | 22.50 | 230,054,166.67 |
| 2018 | 33.76 | 6.73 | 33.99 | 17.70 | 334,541,666.67 |
| 2019 | 55.10 | 11.40 | 46.01 | 29.12 | 372,408,333.33 |
| 2020 | 62.86 | 9.02 | 43.56 | 27.76 | 213,720,833.33 |
| 2021 | 71.03 | 5.35 | 52.01 | 34.45 | 361,953,703.70 |
| 2022 | 64.49 | | 54.44 | 31.37 | 385,931,818.18 |
| 2023 | 74.53 | 45.85 | 50.83 | 32.62 | 494,545,454.55 |
| 2024 | 61.27 | 18.26 | 51.58 | 35.97 | 512,872,250.00 |

**Análisis del influente**

Caudal influente: El caudal promedio anual varía significativamente entre 2010 y 2024, con un rango de 540,993.80 m³/año (2015) a 1,029,346.51 m³/año (2018). Esto indica fluctuaciones en el aporte poblacional o descargas externas (industriales o pluviales). La capacidad instalada de la planta es de 85 L/s, lo que equivale a 2,678,400 m³/año. Comparado con este valor, el caudal observado está muy por debajo de la capacidad máxima, lo que sugiere subutilización del sistema.

Demanda Bioquímica de Oxígeno ($DBO_5$): La $DBO_5$ influente muestra un rango de 233.19 mg/L (2012) a 734.00 mg/L (2023). En varios años, los valores exceden el diseño de 343 mg/L, especialmente en 2023, donde se duplica. Un aumento sostenido en la $DBO_5$ sugiere un incremento en la carga orgánica biodegradable, probablemente debido a cambios en las fuentes de agua residual (mayor aporte doméstico o industrial). Los años con menor $DBO_5$ (2012, 2017) podrían estar relacionados con diluciones del influente por aguas pluviales o menor actividad económica. Valores elevados de $DBO_5$ aumentan el requerimiento de oxígeno disuelto, lo que puede sobrecargar los sistemas de aireación y disminuir la eficiencia de la nitrificación.

Demanda Química de Oxígeno (DQO): La DQO presenta un rango de 466.30 mg/L (2012) a 2,003.91 mg/L (2023), excediendo el diseño de 728 mg/L en varios años. La relación $DQO/DBO_5$ varía de 1.77 a 2.73, indicando un aumento en la proporción de materia orgánica no biodegradable en años recientes. En 2023, la DQO es casi tres veces el valor de diseño, lo que sugiere la presencia de contaminantes refractarios (difíciles de degradar biológicamente). La proporción $DQO/DBO_5$ superior a 2.0 en los últimos años implica que el sistema podría necesitar ajustes o pretratamientos para mejorar la degradación de materia orgánica. Altos valores de DQO aumentan la carga orgánica total, lo que podría requerir mayor tiempo de retención o capacidad de aireación para mantener la eficiencia.

Sólidos Suspendidos (SS): El rango de SS es de 262.17 mg/L (2010) a 444.45 mg/L (2021), superando ocasionalmente el diseño de 414 mg/L. Los años con valores elevados (2020, 2021) coinciden con picos en DQO y $DBO_5$.

Nutrientes (N y P): Nitrógeno total (N): Varía entre 49.82 mg/L (2010) y 116.43 mg/L (2023), superando el diseño de 71 mg/L en los últimos años. Fósforo total (P): Oscila entre 31.95 mg/L (2010) y 54.44 mg/L (2022), también superando el diseño de 5.8 mg/L. El sistema de aireación extendida no está diseñado específicamente para la remoción de nitrógeno, aunque puede remover parte del nitrógeno mediante desnitrificación en condiciones anóxicas. Altos niveles de N y P pueden promover eutrofización en cuerpos receptores, aumentando la necesidad de control adicional en la planta.

Contaminación microbiológica: Los coliformes totales (C.T) varían ampliamente, alcanzando valores máximos de 595,051,388.89 NMP/100 ml (2016). Aunque no hay un valor de diseño específico, estos niveles sugieren una alta carga microbiológica que podría requerir mejoras en la etapa de desinfección.

**Análisis del efluente**

El análisis del efluente tratado por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Tamboril es fundamental para evaluar su eficiencia y cumplimiento con la Norma Ambiental Dominicana sobre Control de Descarga a Aguas Superficiales, Alcantarillado Sanitario y Agua Costera Dominicana. Este estudio permite identificar la capacidad del sistema para reducir los contaminantes presentes en el agua residual y garantizar que los parámetros clave, como la Demanda Bioquímica de Oxígeno ($DBO_5$), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos (SS), nutrientes y coliformes totales, se mantengan dentro de los límites permisibles, asegurando la protección de los cuerpos receptores y la sostenibilidad ambiental.

Tabla 5 Características fisicoquímicas y microbiológicas del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Tamboril.

| Año | pH | $DBO_5$ | DQO | SS | N-$NH_4$ | N-($NH_4$-$NO_3$) | P-$PO_4$ | C.T |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | NMP/ 100ml |
| 2010 | 7.75 | 18.29 | 40.41 | 19.94 | 7.58 | 10.29 | 17.42 | 12,736,151.52 |
| 2011 | 7.34 | 20.99 | 43.74 | 17.23 | 3.98 | 7.53 | 16.31 | 7,380,520.83 |
| 2012 | 7.73 | 8.33 | 24.44 | 14.68 | 2.59 | 10.87 | 10.54 | 7,344,522.22 |
| 2013 | 7.56 | 7.70 | 24.83 | 14.98 | 4.17 | 6.63 | 7.95 | 16,725,277.78 |
| 2014 | 7.39 | 8.47 | 28.45 | 15.42 | 7.71 | 7.54 | 6.86 | 29,423,493.06 |
| 2015 | 7.41 | 11.66 | 36.81 | 15.76 | 10.39 | 5.03 | 10.13 | 14,586,684.09 |
| 2016 | 7.36 | 7.59 | 24.98 | 17.62 | 5.86 | 6.53 | 11.20 | 17,359,520.83 |
| 2017 | 7.52 | 9.46 | 31.38 | 18.53 | 7.27 | 7.17 | 9.90 | 10,610,600.00 |
| 2018 | 7.70 | 7.80 | 22.47 | 26.85 | 6.45 | 4.92 | 4.23 | 7,457,116.67 |
| 2019 | 7.63 | 9.43 | 26.99 | 24.00 | 11.56 | 3.40 | 5.68 | 10,638,527.78 |
| 2020 | 7.58 | 11.55 | 35.67 | 21.00 | 13.52 | 6.94 | 7.76 | 15,613,745.57 |
| 2021 | 7.40 | 9.25 | 31.06 | 16.45 | 14.73 | -0.56 | 7.26 | 826,554.89 |
| 2022 | 7.65 | 15.39 | 45.64 | 14.75 | 19.34 | No hay datos | 11.94 | 6,908,195.29 |
| 2023 | 7.45 | 17.45 | 47.98 | 16.12 | 19.53 | 7.77 | 10.83 | 2,342,475.26 |
| 2024 | 7.60 | 15.96 | 41.61 | 14.85 | 19.54 | 10.16 | 13.46 | 28,643,182.73 |

Potencial de hidrogeno (pH): Los valores de pH del efluente oscilan entre 7.34 y 7.75, cumpliendo consistentemente con el

rango normativo permitido de 6 a 8.5. Esto refleja un adecuado control en el balance químico del proceso.

Demanda Bioquímica de Oxígeno ($DBO_5$): Los valores de $DBO_5$ del efluente varían entre 7.59 y 20.99 mg/L, estando por debajo del límite máximo de 35 mg/L en todos los años evaluados. La eficiencia promedio de remoción de $DBO_5$ es del 97.03%, lo que indica un desempeño sobresaliente en la eliminación de materia orgánica biodegradable.

Demanda Química de Oxígeno (DQO): La DQO del efluente se mantiene entre 22.47 y 47.98 mg/L, cumpliendo con el límite de 130 mg/L. La eficiencia promedio de remoción de DQO alcanza el 96.23%, evidenciando la efectividad del sistema en la oxidación de compuestos orgánicos e inorgánicos.

Sólidos Suspendidos (SS): Los sólidos suspendidos en el efluente se encuentran entre 14.68 y 26.85 mg/L, valores que cumplen con el límite máximo permitido de 40 mg/L. La eficiencia promedio de remoción de SS es del 94.58%, lo que demuestra un buen desempeño del sistema de sedimentación.

Nitrógeno Amoniacal ($N\text{-}NH_4^+$): Los niveles de nitrógeno amoniacal varían entre 2.59 y 19.54 mg/L, con algunos años (2019-2024) superando el límite normativo de 10 mg/L. La eficiencia promedio de remoción de $N\text{-}NH_4^+$ es del 83.37%, lo que indica que, aunque el sistema logra una reducción significativa, en los últimos años del periodo objeto de estudio la nitrificación no ha sido completamente eficiente para lograr alcanzar el valor normativo.

Relación $N\text{-}(NH_4^+ + NO_3^-)$: Este indicador se encuentra dentro del rango permisible de 18 mg/L en la mayoría de los años, excepto en 2020 y 2023, donde se observan valores más altos. La presencia de altos niveles de nitrato podría estar relacionada con procesos de desnitrificación incompletos.

Ortofosfatos ($P\text{-}PO_4$): Los niveles de ortofosfatos oscilan entre 4.23 y 17.42 mg/L, excediendo el límite de 3 mg/L en todos los años evaluados. La eficiencia promedio de remoción de $P\text{-}PO_4$ es del 68.69%, lo que indica una limitación en la capacidad del sistema para eliminar fósforo, probablemente debido a la ausencia de procesos específicos de precipitación química o biológica para este nutriente.

Coliformes Totales (C.T): Los valores de coliformes totales presentan variaciones significativas, con valores que exceden ampliamente el límite de 1000 NMP/100 mL. Esto sugiere que la etapa de desinfección por cloración no está operando de forma completamente eficiente, especialmente en años con cargas más altas.

**Análisis de la relación entre la concentración de sólidos suspendidos (SS) en el tanque nro. 2 y la eficiencia de remoción de contaminantes**

El análisis de la relación entre la concentración de sólidos suspendidos (SS) en el tanque nro. 2 y la eficiencia de remoción de contaminantes en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) resulta fundamental para evaluar el desempeño del sistema. Con un valor de diseño establecido en 4,000 mg/L de SS en el tanque nro. 2, se busca determinar cómo las variaciones reales en esta concentración influyen en la eliminación de parámetros clave como sólidos suspendidos, nitrógeno amoniacal ($N\text{-}NH_4$), fósforo ($P\text{-}PO_4$), demanda bioquímica de oxígeno ($DBO_5$) y demanda química de oxígeno (DQO).

Tabla 6 Concentración de sólidos suspendidos en el Tanque nro. 2 de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Tamboril.

| **Año** | **Sólidos Suspendidos** |
|---|---|
| | mg/L |
| 2010 | 3,403 |
| 2011 | 3,761 |
| 2012 | 4,841 |
| 2013 | 5,388 |
| 2014 | 6,037 |
| 2015 | 5,627 |
| 2016 | 4,768 |
| 2017 | 4,535 |
| 2018 | 4,176 |
| 2019 | 6,360 |
| 2020 | 6,114 |
| 2021 | 5,656 |
| 2022 | 3,874 |
| 2023 | 2,803 |
| 2024 | 3,504 |

Los resultados del análisis permiten identificar patrones de correlación que pueden orientar ajustes operativos para maximizar la eficiencia del tratamiento.

- Correlación entre SS en el tanque 2 y remoción de sólidos suspendidos (SS): es baja ($r = 0.08$). Esto sugiere que no hay una relación significativa entre estas dos variables en los datos analizados.

- Correlación entre SS en el tanque 2 y remoción de $N\text{-}NH_4$: $r=0.43$, lo que indica una correlación positiva

moderada. A medida que la concentración de sólidos suspendidos en el tanque aumenta o disminuye, hay un efecto moderado en la eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal. Esto puede estar relacionado con la actividad biológica de los microorganismos, que depende de una adecuada concentración de lodos en el tanque. Se puede optimizar la nitrificación manteniendo concentraciones de SS dentro de un rango que favorezca la actividad de las bacterias nitrificantes.

- Correlación entre SS en el tanque 2 y remoción de P-$PO_4$: r=0.56, lo que sugiere una correlación positiva más fuerte en comparación con N-$NH_4$. Esto implica que los sólidos suspendidos en el tanque 2 tienen una influencia más marcada en la remoción de fósforo. La correlación positiva más fuerte en comparación con otros parámetros indica que la remoción de fósforo está significativamente influenciada por la concentración de SS en el tanque. Esto podría deberse a que el fósforo se elimina mediante mecanismos como la adsorción en los lodos y la precipitación química, que dependen de una concentración adecuada de sólidos. Este resultado resalta la importancia de mantener una concentración de SS adecuada para maximizar la eficiencia de remoción de fósforo, posiblemente ajustando la recirculación de lodos o el uso de agentes precipitantes.

- Correlación entre SS en el tanque 2 y remoción de $DBO_5$: r=0.43, indicando una correlación positiva moderada. Esto implica que los cambios en la concentración de sólidos suspendidos en el tanque 2 tienen un efecto moderado sobre la eficiencia de remoción de $DBO_5$. Una correlación positiva moderada sugiere que la concentración de SS tiene un efecto significativo en la remoción de DBO5, aunque no es el único factor determinante. Esto puede reflejar la relación entre la biomasa activa en el tanque y la capacidad del sistema para degradar materia orgánica.

- Correlación entre SS en el tanque 2 y remoción de DQO: r=0.32, indicando una correlación positiva baja. Esto sugiere que la influencia de los sólidos suspendidos en la remoción de DQO es más débil en comparación con $DBO_5$. La correlación positiva baja indica que la concentración de SS tiene un impacto limitado en la remoción de DQO. Esto podría deberse a que la DQO incluye fracciones no biodegradables que no son influenciadas por la actividad biológica en el tanque.

El análisis de la relación entre la concentración de sólidos suspendidos (SS) en el tanque 2 y la eficiencia de remoción de contaminantes de la PTAR evidencia que la influencia de los SS varía según el parámetro analizado. La correlación baja entre los SS y la remoción de sólidos suspendidos (r = 0.08) sugiere que esta variable no tiene un impacto significativo en la eficiencia de remoción de sus propios valores, probablemente debido a otros factores operativos que predominan en este proceso.

Por otro lado, se identificaron correlaciones positivas moderadas con la remoción de nitrógeno amoniacal (r = 0.43) y demanda bioquímica de oxígeno ($DBO_5$) (r = 0.43), lo que resalta la importancia de mantener concentraciones adecuadas de SS para optimizar la actividad biológica de los microorganismos encargados de estos procesos. En el caso del fósforo (P-$PO_4$), la correlación positiva más fuerte (r = 0.56) subraya la influencia significativa de los SS en su remoción, probablemente debido a mecanismos como la adsorción en lodos y la precipitación química.

Finalmente, la correlación baja entre los SS y la remoción de demanda química de oxígeno (DQO) (r = 0.32) refleja que los SS tienen un impacto limitado en la eliminación de compuestos no biodegradables, lo que sugiere que este parámetro depende de factores adicionales fuera del control directo de la concentración de lodos. En conjunto, los resultados destacan la necesidad de un manejo preciso de la concentración de SS en el tanque 2 para maximizar la eficiencia de remoción de contaminantes clave, ajustando parámetros operativos como la recirculación de lodos y el control de la biomasa activa.

## IV. Conclusiones

La evaluación de la eficiencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Tamboril, diseñada bajo el sistema de lodos activados con aireación extendida, revela importantes discrepancias entre las condiciones de diseño y las características reales del influente tratado. Aunque la planta cuenta con una capacidad instalada de 85 L/s (equivalente a 2,678,400 m³/año), el caudal influente observado en el período 2010-2024 ha sido consistentemente inferior, alcanzando un promedio de aproximadamente 750,000 m³/año, lo que indica una subutilización del sistema.

En términos de calidad del influente, los parámetros analizados muestran que, en varios años, los valores reales han excedido los adoptados en el diseño, especialmente en la Demanda Bioquímica de Oxígeno ($DBO_5$), Demanda Química de Oxígeno (DQO), sólidos suspendidos (SS), nitrógeno total (N) y fósforo total (P). Por ejemplo, en 2023, la $DBO_5$ y la DQO alcanzaron valores de 734 mg/L y 2,003.91 mg/L, respectivamente, duplicando o triplicando los valores de diseño. Estas condiciones plantean desafíos operativos

significativos, como el incremento en la carga orgánica biodegradable y la presencia de compuestos no biodegradables, que pueden comprometer la eficiencia del tratamiento y la estabilidad del proceso.

La correlación entre la concentración de sólidos suspendidos (SS) en el tanque 2 y la eficiencia de remoción de contaminantes destaca aspectos clave del desempeño del sistema. Si bien la remoción de sólidos suspendidos no muestra una relación significativa con la concentración de SS ($r = 0.08$), se observan correlaciones positivas moderadas con la remoción de $N\text{-}NH_4$ ($r = 0.43$) y $DBO_5$ ($r = 0.43$), y una correlación más fuerte con la remoción de fósforo ($r = 0.56$). Esto evidencia la necesidad de optimizar el manejo de los lodos y las condiciones de operación para maximizar la eficiencia del tratamiento de nutrientes y compuestos orgánicos.

Con base en la correlación observada y los datos históricos, se evidencia que trabajar con una concentración de sólidos suspendidos en el tanque 2 de 5,000 a 6,000 mg/L, sería conveniente, ya que este rango favorece una mayor remoción de fósforo, alcanzando eficiencias cercanas al 80% bajo la configuración actual de la depuradora y no compromete la eficiencia de remoción en los otros parámetros objeto de estudio. Sin embargo, se recomienda implementar esta estrategia de manera controlada, con monitoreo continuo de los parámetros clave, para garantizar la estabilidad del sistema y optimizar el manejo de lodos.

Además, los niveles elevados de nitrógeno y fósforo en el influente resaltan la importancia de implementar estrategias adicionales para el control de nutrientes, como la optimización de la recirculación de lodos y el uso de agentes precipitantes.

Por otro lado, los altos niveles de contaminación microbiológica en el efluente, reflejados en los coliformes totales, subrayan la necesidad de fortalecer la etapa de desinfección para cumplir con los estándares de descarga y mitigar los riesgos ambientales.

En conclusión, aunque la PTAR Tamboril demuestra capacidad para tratar eficientemente aguas residuales dentro de ciertos rangos, las variaciones en las características del influente y la subutilización del sistema limitan su desempeño óptimo. Se recomienda realizar ajustes en la operación y mantenimiento de la planta, así como considerar la implementación de tecnologías complementarias para mejorar la remoción de materia orgánica refractaria, nutrientes y microorganismos patógenos. Estas acciones son fundamentales para garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad del efluente y la sostenibilidad ambiental del sistema.

## REFERENCIAS


[1] M. Várhelyi, V. M. Cristea, and M. Brehar, "Improving Waste Water Treatment Plant Operation by Ammonia Based Aeration and Return Activated Sludge Control," in Computer Aided Chemical Engineering, A. A. Kiss, E. Zondervan, R. Lakerveld, and L. Özkan, Eds. Elsevier, vol. 46, pp. 1165-1170, 2019. doi: 10.1016/B978-0-12-818634-3.50195-8.

[2] J. Alcamo, "Water quality and its interlinkages with the Sustainable Development Goals," Current Opinion in Environmental Sustainability, vol. 36, pp. 126-140, 2019, doi: 10.1016/j.cosust.2018.11.005.

[3] B. Adibimanesh, S. Polesek-Karczewska, F. Bagherzadeh, P. Szczuko, and T. Shafighfard, "Energy consumption optimization in wastewater treatment plants: Machine learning for monitoring incineration of sewage sludge," Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 56, p. 103040, 2023.

[4] M. Bahramian, R. K. Dereli, W. Zhao, M. Giberti, and E. Casey, "Data to intelligence: The role of data-driven models in wastewater treatment," Expert Systems with Applications, vol. 217, p. 119453, 2023.

[5] V. Ganthavee and A. P. Trzcinski, "Artificial intelligence and machine learning for the optimization of pharmaceutical wastewater treatment systems: a review," Environmental Chemistry Letters, pp. 1-26, 2024.

[6] MMAyRN. Provincia Santiago de los Caballeros. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Santo Domingo. 2009.

[7] V. A. Rodríguez-Núñez, F. Orgaz-Agüera, A. D. J. Martínez-Durán, and C. M. Domínguez-Valerio, "Estudio de la cobertura de tratamiento de las aguas y lodos residuales en la provincia de Santiago, República Dominicana," Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2024), p. 182, 2024.