UEA Ambiental
PrePrint UEA

Sección Ambiental
Vol. AMB2324. ep25–167

| Recibido: 14/03/2024 |
| Aceptado: 15/04/2024 |
| Publicado: 21/10/2026 |

Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales de Palanda Cocha, Tena, Napo mediante el software super-pro designer

Optimization of the Palanda Cocha wastewater treatment plant in Tena, Napo, using super-pro designer software

Andrea Carolina Jaramillo Rivas[1], Paúl Marcelo Manobanda Pinto[1]

https://doi.org/10.59410/PREPRINT-UEA-vAMB2324ep25-167 Crossref

Resumen

El proceso de análisis y mejora de la eficiencia en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales ubicada en Palanda Cocha, en la ciudad de Tena en la región de Napo, logró cumplir exitosamente con los propósitos establecidos gracias a la utilización efectiva del programa informático SuperPro Designer. Se consiguió incrementar la eficiencia en las operaciones y mejorar la calidad del efluente tratado, lo que llevó a una disminución en los gastos relacionados con el procedimiento. El uso de técnicas avanzadas de modelado y simulación posibilitó la identificación de las mejores configuraciones de equipos y las condiciones de operación más adecuadas. Los resultados más importantes descubiertos incluyen un incremento significativo en la eliminación de sustancias contaminantes, el cumplimiento riguroso de normas medioambientales y una disminución notable en los gastos operativos. Estas mejoras garantizan la protección del medio ambiente y la salud pública. Es importante destacar la necesidad de realizar un seguimiento constante del rendimiento de la planta industrial y de examinar e implementar tecnologías innovadoras para garantizar que siga siendo efectiva en el futuro. El objetivo del presente estudio consistió en realizar una optimización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Palanda Cocha mediante el Software SuperPro Designer donde se pone de relieve la relevancia crucial de llevar a cabo investigación y fomentar la innovación en la administración del recurso hídrico como pilares fundamentales para promover el progreso sostenible de la comunidad a nivel local.

Palabras clave

aguas residuales, DBO, DQO, consumo de energía, consumo de reactivos.

Abstract

The process of analyzing and improving the efficiency of the wastewater treatment plant located in Palanda Cocha, in the city of Tena in the Napo region, successfully achieved the established objectives thanks to the effective use of the SuperPro Designer software. It was possible to increase the efficiency of operations and improve the quality of the treated effluent, which led to a decrease in the costs associated with the process. The use of advanced modeling and simulation techniques made it possible to identify the best equipment configurations and the most suitable operating conditions. The most important results discovered include a significant increase in the elimination of pollutants, rigorous compliance with environmental standards and a notable decrease in operating costs. These improvements ensure the protection of the environment and public health. It is important to emphasize the need to constantly monitor the performance of the industrial plant and to examine and implement innovative technologies to ensure that it remains effective in the future. The objective of the present study was to s perform an optimization of the Palanda Cocha Wastewater Treatment Plant using SuperPro Designer Software where the crucial relevance of conducting research and fostering innovation in water resource management as key pillars to promote sustainable community progress at the local level.

Keywords

wastewater, BOD, COD, energy consumption, reagent consumption.

Direcciones

[1]Universidad Estatal Amazónica. Pastaza, Ecuador. Email: amb2017061@uea.edu.ec, pmanobanda@uea.edu.ec,

Autor para la correspondencia

Andrea Carolina Jaramillo Rivas. Universidad Estatal Amazónica. Pastaza, Ecuador. Email: amb2017061@uea.edu.ec

Cómo citar

JARAMILLO RIVAS, Andrea Carolina, MANOBANDA PINTO, Paúl Marcelo and , 2026. Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales de Palanda Cocha, Tena, Napo mediante el software super-pro designer. PrePrint UEA. Vol. AMB2324. p. ep25–167. https://doi.org/10.59410/PREPRINT-UEA-vAMB2324ep25-167

Editores Académicos Mario Javier Barrera Castro

Editorial Editorial de la Universidad Estatal Amazónica 2026

Copyright

Derechos de autor 2026 | PrePrint UEA.
Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.
Los autores del artículo autorizan a la RACYT a que este artículo sea compartido bajo las condiciones de la Licencia Creative Commons 4.0 (CC-BY 4.0).

1. Introducción

El tratamiento de aguas residuales ha cobrado una importancia crítica en el contexto actual, donde la creciente demanda de agua potable y las regulaciones ambientales más rigurosas están elevando los costos asociados. Esta situación se ve exacerbada por la rápida industrialización y el crecimiento demográfico, factores que han llevado a una disminución notable en la disponibilidad de recursos hídricos vitales. A esto se suma un aumento alarmante en la contaminación ambiental, que pone en evidencia la insuficiencia de los métodos tradicionales de tratamiento de agua (Díaz-Cuenca et al., 2012). En una era marcada por una creciente preocupación sobre las repercusiones de nuestras estrategias de gestión ambiental y la urgencia de abordar problemas de saneamiento, enfermedades y pobreza, se hace imperativo desarrollar tecnologías de tratamiento de aguas residuales que sean no solo eficientes, sino también respetuosas con el medio ambiente (Muga & Mihelcic, 2008). Estas tecnologías deben equilibrar su desempeño con la sostenibilidad en términos ambientales, económicos y sociales. La adopción de estas tecnologías sostenibles garantizará un suministro de agua más limpio y seguro, y sentará las bases para un

futuro más responsable y sostenible (Lee & Chon, 2022). La adopción y promoción de estas tecnologías sostenibles no solo garantizarán un suministro de agua más limpio y seguro, sino que también sentarán las bases para un futuro más sostenible y ecológicamente responsable.

La mejora en el funcionamiento de las instalaciones encargadas del tratamiento de aguas residuales se convierte en un reto de gran importancia en la gestión ambiental actual. Dentro de la situación particular que se da en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Palanda Cocha, situada en Tena, Napo, encontramos que este proyecto se vuelve crucial, ya que es indispensable aumentar la eficacia en las actividades operativas y reducir los efectos ambientales desfavorables generados por el manejo inapropiado de las aguas residuales. Esta planta que se encarga de tratar las aguas residuales tiene que hacer frente a varios retos, que van desde no tener suficiente capacidad para la cantidad de desechos hasta no ser efectiva en eliminar ciertos contaminantes particulares. Estas dificultades conllevan consecuencias de gran impacto en diversos ámbitos, tales como los relacionados con la sociedad, la economía y el medio ambiente. Desde una perspectiva social, es importante destacar que la calidad del agua desempeña un papel fundamental en la salud y el bienestar de los habitantes de una comunidad en particular. Por otro lado, desde una óptica económica, se debe tener en cuenta que una planta de tratamiento de agua que no sea eficiente puede generar gastos elevados tanto en términos de mantenimiento como en operatividad.

Dentro de este marco específico, la intención del proyecto actual es la de hacer uso del software SuperPro Designer con el objetivo de hacer frente a estos desafíos y lograr una optimización completa de todo el sistema de tratamiento de la planta. Los objetivos fundamentales que se persiguen con este proyecto abarcan la optimización de la eficacia en el procedimiento de tratamiento, la disminución de los gastos de funcionamiento, la certificación del cumplimiento de normas medioambientales y la fomentación de una utilización sostenible de los recursos acuíferos en la zona, utilizando la metodología descriptiva y deductiva.

2. Metodología

2.1. Localización

El área de estudio se ubica en Palanda Cocha, Tena, Napo y es importante brindar una descripción geográfica para contextualizar el estudio. Palanda Cocha está ubicada en la región de Tena, provincia de Napo, Ecuador. La región se caracteriza por una alta biodiversidad e importantes recursos hídricos. Tena, la capital provincial, está situada en una zona estratégica cercana a la confluencia de varios ríos, lo que la convierte en un lugar importante en términos de abastecimiento de agua y gestión de aguas residuales.

En la **Figura 1 y 2** se muestra el mapa de la PTAR de Palanda Cocha.



Figura 1 | Mapa de la PTAR. Tomado del municipio de Napo.

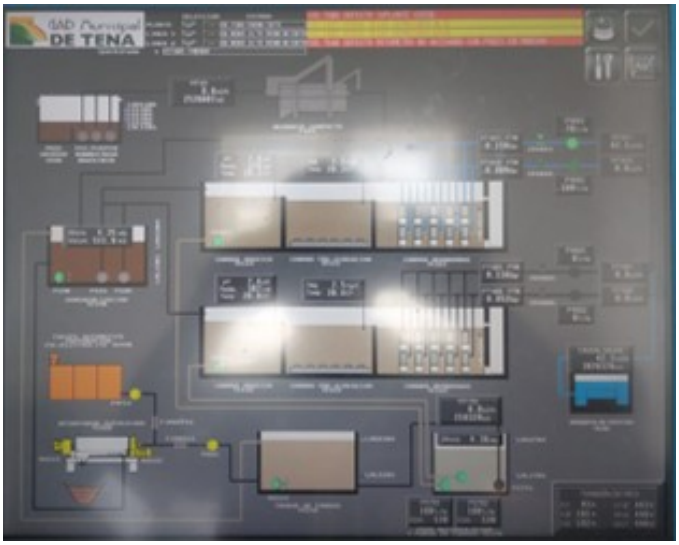


Figura 2 | Esquema de la PTAR

2.2. Métodos

2.2.1. Tipo de investigación

Esta investigación se clasifica como descriptiva, dado que el objetivo principal es describir y analizar los procesos y características que existen en la PTAR, para lo cual se empleó la observación, medición y recopilación de datos en el lugar de estudio.

2.2.2. Métodos de investigación

El método de investigación empleado en este estudio se basó en el enfoque deductivo, el cual implicó el desarrollo de hipótesis, como la calidad del agua y la posterior recolección y análisis de datos del lugar de estudio para realizar la optimización.

2.2.3. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación se centró en recopilar datos tanto fisicoquímicos como biológicos para realizar la optimización, lo cual permitió abordar los objetivos de la investigación y proporcionar una visión completa de la situación ambiental en la zona de estudio.

2.3. Materiales

- Equipo Tecnológico

- Datos operativos y características técnicas requeridos
- Se recopila información detallada sobre la composición de aguas residuales: Lo que incluye medir las concentraciones de diferentes contaminantes específicos presentes, así como el pH, la temperatura, y otros parámetros relevantes.
- Análisis de literatura científica

2.4. Procedimiento

2.4.1. Métodos

Para llevar a cabo la realización de este proyecto de manera organizada y metódica, se siguió un proceso estructurado que comenzó con la recolección de una variedad de fuentes bibliográficas especializadas relacionadas con el tema. Se incluyeron normativas, manuales y directrices técnicas reconocidas a nivel internacional con el fin de establecer con precisión los conceptos, teorías, condiciones y variables involucradas en el proceso. Se estableció un entorno específico para llevar a cabo el diseño de la columna de destilación. En este estudio, se utilizó un modelo a escala de un sistema de destilación que generó información crucial, la cual fue organizada en tablas y analizada cuidadosamente para guiar el progreso del proyecto.

- Análisis de la planta
- Proceso de recopilación de datos
- Modelado en SuperPro Designer
- Evaluación de resultados

2.4.2.Técnicas

- Modelado de procesos
- Optimización de procesos
- Análisis de sensibilidad

Estos métodos de investigación ofrecen un conjunto detallado y organizado de directrices que facilitan la realización de estudios, lo que garantiza que otros investigadores puedan reproducir y confirmar los hallazgos de manera consistente y confiable.

2.5. Optimización de parámetros de funcionamiento

Las funciones de optimización del software SuperPro se utilizan para ajustar los parámetros de funcionamiento de la instalación y maximizar la eficiencia del tratamiento y la calidad de las aguas residuales.

Enlaces y justificaciones: Los criterios dados por autores expertos para optimizar las plantas de tratamiento de aguas residuales operan de la siguiente forma:

2.6. Referencia y descripción de procedimientos nuevos o modificados

2.6.1. Modelo detallado de la planta de tratamiento de aguas residuales de Palanda Cocha en SuperPro

Referencia: Metcalfe y Eddy. “Aguas residuales: tratamiento y reutilización”. Educación McGraw-Hill, 2013. (Maulana, 2019)

Descripción: El modelado detallado de plantas de tratamiento de aguas residuales en SuperPro es un proceso nuevo que implica la creación de un modelo específico de la planta de tratamiento de aguas residuales. Se recopilan datos sobre la configuración y operación de la planta de tratamiento, así como las características de las aguas residuales entrantes, para desarrollar un modelo que refleje con precisión los procesos fisicoquímicos y biológicos que tienen lugar en la planta de tratamiento. Esto incluye la consideración de las unidades de tratamiento primario, secundario y terciario, así como la cinética de procesos biológicos como la descomposición de la materia orgánica y la eliminación de nutrientes. Esta modificación del procedimiento se justificó por la necesidad de adecuar el modelo a las condiciones específicas de la depuradora de aguas residuales de Palanda Cocha, garantizando así la adecuada optimización de su funcionamiento, preciso y eficiente.

2.6.2. Optimice los parámetros de trabajo con SuperPro Designer

Referencia: Henze et al., “Modelos de lodos activados ASM1, ASM2, ASM2d y ASM3”. Editorial IVA, 2000. (Henze et al., 2020).

Descripción: Optimización de parámetros operativos de la EDAR Palanda Cocha mediante el software SuperPro, entre otros: corrección de variables como carga orgánica entrante, tiempo de retención hidráulica en cada planta de tratamiento y concentración de nutrientes añadidos durante la desnitrificación. Estas correcciones se realizan utilizando las funciones de optimización disponibles en el software, permitiendo encontrar la combinación óptima de parámetros para maximizar la eficiencia del procesamiento y minimizar los costos operativos de la mano de obra. Este cambio en el procedimiento se motiva por la necesidad de incrementar el rendimiento de las instalaciones de depuración de aguas residuales, garantizar el cumplimiento de las normas de calidad para las aguas residuales y optimizar el uso de recursos como la energía y los compuestos químicos.

2.6.3. Analice la sensibilidad y estabilidad del modelo en SuperPro Designer

Referencias: Goodger et al., "Tratamiento de aguas residuales: procesos biológicos y químicos". Wiley, 2002. (Henze, 2022).

Descripción: Se realizó un análisis de sensibilidad y confiabilidad del modelo de la planta de tratamiento de aguas residuales en SuperPro para evaluar el impacto de diversas variables y parámetros en el rendimiento del sistema. Estos incluyen cambios en las condiciones de operación, características de influencia y propiedades cinéticas de los procesos biológicos. Se utilizan técnicas de análisis estadístico y diseño experimental para identificar las variables más sensibles

y evaluar la incertidumbre de las predicciones del modelo. La modificación de este procedimiento se justifica por la importancia de comprender la variabilidad y estabilidad del modelo en condiciones reales de operación, mejorando así su capacidad predictiva y su utilidad como herramienta de apoyo a la decisión en la gestión de fábrica.

Se han descrito detalladamente los recursos humanos, tecnológicos y financieros necesarios para llevar a cabo el proyecto, incluido el personal involucrado en la investigación, el equipo y la tecnología utilizados, así como los fondos asignados para llevar a cabo la investigación.

2.7. Recursos humanos

Salarios y honorarios del personal que participa en el proyecto.

2.8. Recursos tecnológicos

Computadoras y Licencias informáticas y software.

Hardware informático capaz de ejecutar el software Super-Pro y una licencia de modelado y simulación de procesos. Equipos de laboratorio: equipos de análisis de agua como pH-metro, conductímetro, espectrofotómetro, etc.

2.9. Recursos financieros

Adquisición de software: Costos asociados con la compra de licencias para el software Super-Pro.

Gastos operativos: Costos relacionados con transporte, suministros de laboratorio y otros gastos operativos necesarios para realizar la investigación.

2.10. Justificación de recursos

Desde el punto de vista tecnológico: el uso de super-pro permite una simulación precisa de los procesos de tratamiento de aguas residuales, facilitando la optimización y la toma de decisiones informadas.

Personas: La participación de expertos en ingeniería química y ambiental garantiza la aplicación precisa de técnicas de modelado y análisis de datos para optimizar las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Finanzas: La inversión en recursos financieros es necesaria para comprar software, mantener el equipo de laboratorio y pagar al personal involucrado en el proyecto para garantizar la calidad y el éxito de la investigación.

Por lo tanto, el estudio para optimizar la planta de tratamiento de aguas residuales de Palanda Cocha se llevó a cabo de acuerdo con estrictos estándares científicos, utilizando materiales, métodos y tecnología adecuados y garantizando la repetibilidad de los resultados (Higuera et al., 2019)

2.11. Canal de Parshall

Es un diseño que ha sido cuidadosamente ajustado para funcionar eficientemente, con una estructura abierta que exhibe una sección particular (Lalaleo, 2019). Una garganta y una sección divergente conforman parte de un diseño convergente (Maulana, 2019). El uso de un canal Parshall tiene como objetivo reducir la velocidad de entrada del flujo sin generar turbulencia.

Es importante tener en cuenta la velocidad a la que se ingresa al canal, ya que esto representa el primer paso en el proceso. La sedimentación es un proceso que actúa como una estructura utilizada para la medición y presenta la ventaja de poder funcionar de manera efectiva en diversas condiciones. Una variedad extensa de corrientes en movimiento **(Ilustración 1 y 2)**.

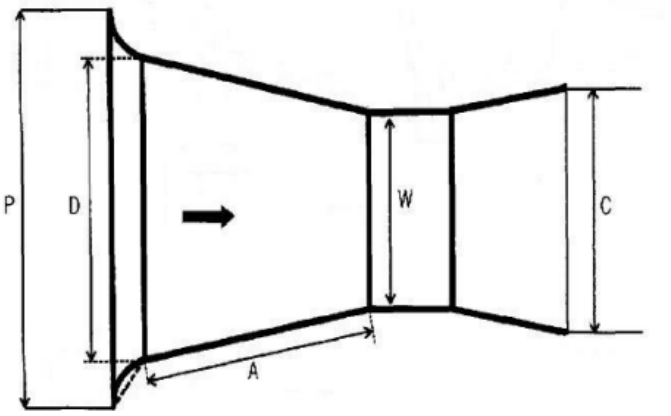


Ilustración 1 | Canal de Parshall. Adaptado de Fibras y Normas Colombiana S.A.S, 2015.

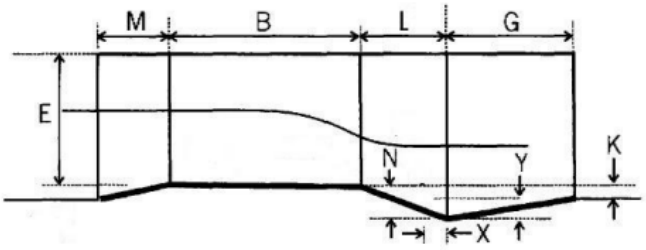


Ilustración 2 | Vista lateral del canal de Parshall. Adaptado de Fibras y Normas Colombiana S.A.S, 2015.

De acuerdo con lo que se observa en los gráficos, es necesario asignar varios valores que se encuentran detallados en tablas (anexos) basándose en el Caudal "Q". El usuario deberá introducir el valor del caudal en litros por segundo que se utilizará en el cálculo del proceso (Romero , 2020). Si el flujo excede el límite establecido en las tablas, será necesario dividir el caudal y luego calcular dos dispositivos Parshall para el caudal dividido **(Tabla 1)**.

Tabla 1 | Caudal tratado por PTAR. Tomada del estudio Impacto ambiental

ESTACIÓN DE BOMBEO	PTAR	CAUDAL AÑO 2007 -l/s	CAUDAL AÑO 2027 – l/s
EB4	PALANDA COCHA	45.21 l/s	100.09 l/s

Con frecuencia, los desechos líquidos transportan consigo una cantidad significativa de materiales en estado sólido. Estos desechos, tales como cáscaras de fruta, trapos, ramas, pedazos de papel y madera, que presentan dimensiones reducidas, son depositados en el sistema de alcantarillado como destino final. Para separar del agua impurezas u otros elementos, este proceso se consigue al hacer que las aguas

fluyan a través de rejillas especialmente diseñadas con este propósito (Aproximación a la determinación del impacto de los vertimientos de las aguas residuales domésticas del municipio de Ayapel, sobre la calidad del agua de la ciénaga, 2019). Normalmente se utilizan varillas de hierro dispuestas de forma paralela. El principal propósito de estos equipos de cribado es asegurar la protección de una diversidad de equipos electromecánicos que podrían ser requeridos durante el proceso de tratamiento, previniendo de esta manera la obstrucción de las válvulas (Henze, 2022). Debido a esta razón, la etapa inicial del proceso de tratamiento consiste en la realización del cribado como primera operación **(Ilustración 3)**.

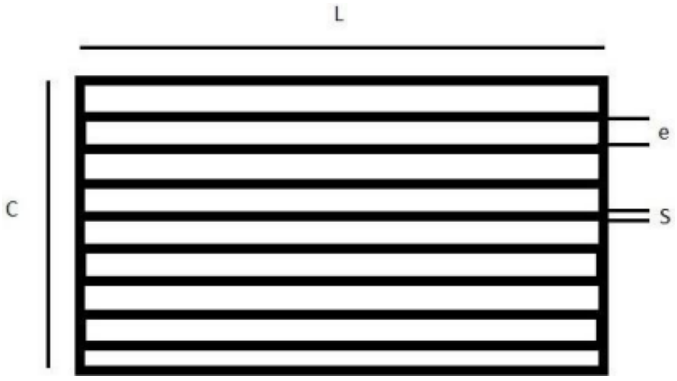


Ilustración 3 | Modelo ilustrativo de una Rejilla. Adaptado de Fibras y Normas Colombiana S.A.S, 2015.

El proceso de separación de la arena implica disminuir la velocidad del agua de manera que esté por debajo del punto de precipitación, pero por encima del de sedimentación de la materia orgánica que se encuentra en el agua, ya que la materia orgánica es susceptible de ser influenciada por estos límites esencial para las tareas que se llevarán a cabo en el futuro **(Ilustración 4)**.

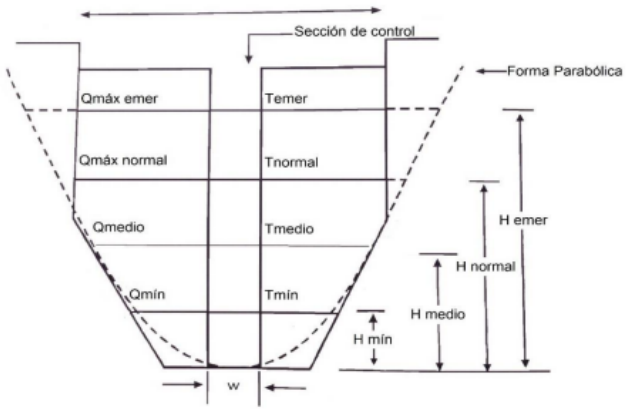


Ilustración 4 | Vista frontal de un Desarenador. Adaptado de Fibras y Normas Colombiana S.A.S, 2015.

El Filtro Anaerobio De Flujo Ascendente (FAFA) es un sistema de filtración de gran tamaño que tiene dos funciones principales: no solo purifica el agua, sino que también promueve la degradación biológica de manera adosada. Durante este procedimiento, los microorganismos se adhieren a los materiales del filtro, como cuarzo, granito, bloques cerámicos, PVC, esferas de polietileno o bambú, en lugar de permanecer en suspensión en el agua con un tamaño de partículas homogéneo con diámetros que oscilan entre 4 y 7 centímetros).

Se ha observado una eficiencia de remoción de DBO de hasta el 80% en este tipo de filtros, sin embargo, este índice puede cambiar dependiendo de diferentes aspectos como la temperatura, el flujo de agua, la duración en la que se retiene el agua en el filtro y las características del material utilizado en el filtro **(Ilustración 5)**.

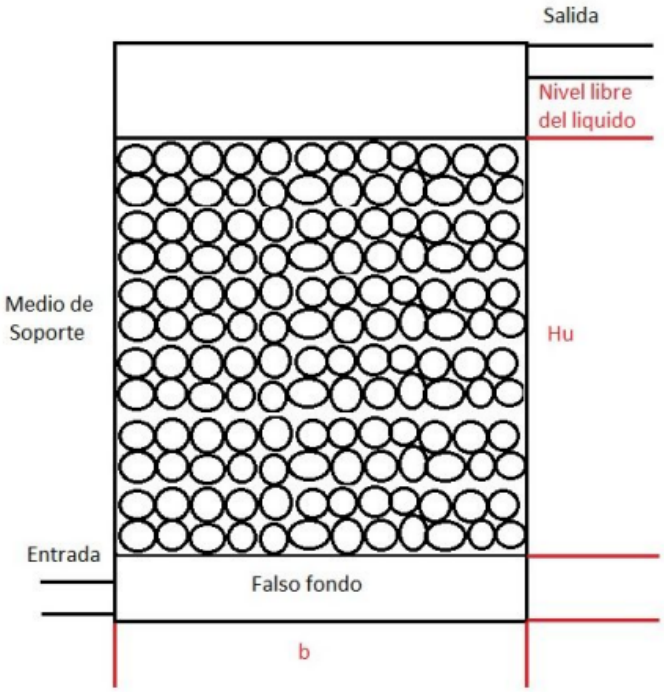


Ilustración 5 | Vista lateral de un tanque FAFA. Adaptado de Fibras y Normas Colombiana S.A.S, 2015.

El usuario deberá ingresar el caudal Q, expresado en metros cúbicos por día.

El usuario deberá proporcionar el valor del ancho del tanque (b) en metros.

El usuario debe introducir el tiempo de retención hidráulica (representado por "tr") en días.

Según las normas establecidas, generalmente se sugiere que la altura útil del filtro (Hu) tenga un valor de aproximadamente 1.8 metros.

El fondo falso y el nivel del líquido al iniciar la descarga tienen la misma altura de 0.3 metros, de manera similar.

3. Resultados y discusión

a) Cálculo de la carga orgánica

Determinación de la cantidad de materia orgánica presente en una muestra específica para evaluar su carga ambiental. La cantidad de materia orgánica presente puede ser determinada empleando las ecuaciones de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y DQO (Demanda Química de Oxígeno), las cuales son indicadores estándar utilizados para evaluar el nivel de contaminación orgánica presente en aguas residuales.

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) se determina co-

múnmente como la disparidad entre la cantidad de oxígeno disuelto al comienzo (ODi) y al final (ODf) de un tiempo de incubación específico.

La diferencia entre la observación inicial (ODi) y la observación final (ODf) es igual a la suma de las aperturas de la base de datos (DBO).

$$DBO = \text{ODi} - \text{ODf} \tag{1}$$

b) Cálculo del rendimiento del tratamiento

Para poder analizar y medir la efectividad del tratamiento, es posible realizar cálculos de diversos indicadores, entre ellos la eficacia en la eliminación de sustancias contaminantes, la cual suele ser presentada en términos de un porcentaje.

Calcular la eficiencia de eliminación de DBO mediante la resta entre el valor de DBO al inicio del proceso en el agua sin tratar y al final en el efluente, luego dividir esto por el valor inicial de DBO y finalmente multiplicar el resultado por 100.

La fórmula para calcular la eficiencia de remoción de DBO en porcentaje es igual al resultado de la diferencia entre la DBO inicial y la DBO final, dividida por la DBO inicial, y luego multiplicada por 100.

Eficiencia de remoción de DBO(%)=

$$((\text{DBO inicial} - \text{DBO final})/\text{DBO inicial})) \times 100 \tag{2}$$

c) Cálculo del consumo de reactivos

Si en el procedimiento de tratamiento se emplean reactivos químicos, es factible determinar la cantidad utilizada a partir de la dosis aplicada y la concentración presente en la solución de reactivos.

El seguimiento de la dosificación del reactivo A a una cierta velocidad de X kilogramos por día, teniendo en cuenta que la concentración de A en la solución se mantiene en Y miligramos por litro; en este escenario, se calcula el consumo diario de A de la siguiente manera:

La tasa de consumo de A en kilogramos por día se calcula como el producto de X kilogramos por día dividido por 1000 litros por metro cúbico, multiplicado por Y miligramos por litro.

Consumo de A (kg/día)=

$$(Xkg/d\acute{i}a)/(1000L/m^3) * (Ymg/L)1 \tag{3}$$

d) Cálculo de carga contaminante entrante

Establecer y analizar la composición química, así como la cantidad de agua residual que fluye hacia la instalación de tratamiento.

Usar información obtenida en un laboratorio o cálculos aproximados con el fin de determinar la cantidad total de contaminantes presente, expresada en valores de parámetros como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), sólidos suspendidos, nutrientes, metales pesados, y otros elementos similares.

e) Calcular la eficiencia de remoción

Determinar la eficacia con la que se ha eliminado un elemento específico, replicar el procedimiento de tratamiento en SuperPro Designer al crear un modelo detallado de cada etapa de tratamiento, que incluya procesos como sedimentación, filtración, aireación, entre otros.

Se deben definir y aplicar reglas específicas relacionadas con el diseño y funcionamiento de cada unidad, así como llevar a cabo pruebas virtuales para evaluar cuán efectiva es la eliminación de sustancias contaminantes. Realizar un cálculo para determinar la eficiencia global del sistema de tratamiento, considerando su capacidad de disminuir los niveles de los contaminantes fundamentales presentes.

f) Cálculo de consumo de recursos

Durante las simulaciones realizadas en SuperPro Designer, es necesario llevar un registro detallado del consumo de energía, agua, reactivos químicos y otros recursos utilizados. Examinar minuciosamente los resultados con el propósito de detectar posibles áreas de reducción de consumos a través de la mejora de las condiciones de funcionamiento y la configuración del proceso.

g) Cálculo de costos operativos

Calcular de manera aproximada los gastos operativos relacionados con la operatividad de la planta de tratamiento, los cuales abarcan costos de energía eléctrica, mantenimiento de equipos, adquisición de reactivos químicos, salarios del personal, entre otros.

Se compararán los gastos operativos de la planta en funcionamiento actualmente con los gastos estimados que se esperan después de llevar a cabo la optimización, con el propósito de analizar y valorar el impacto económico resultante de las mejoras implementadas.

h) Análisis de sensibilidad

Llevar a cabo un estudio detallado de sensibilidad con el objetivo de determinar de qué manera las variaciones en diversos aspectos del proceso (como los tiempos de permanencia, las cantidades de coagulantes utilizadas, el nivel de acidez, entre otros) inciden en los niveles de eficacia y en los gastos asociados.

Encontrar cuáles son los factores que tienen mayor sensibilidad y establecer tácticas específicas con el objetivo de mejorar el control sobre ellos y así incrementar el rendimiento general de la planta.

i) Diseño de reactores biológicos

Para un reactor de lodos activados, se puede calcular la carga orgánica volumétrica (COV) utilizando la fórmula:

$$COV = \frac{Q \times C_{in}}{V} \tag{4}$$

Donde:

Q = Caudal de agua residual (m^3/día)

Cin = Concentración de materia orgánica en el agua residual de entrada (mg/L)

V= Volumen del reactor (m^3)

Tiempo de retención celular (θc) usando:

$$\theta c = \frac{V}{Q} \tag{5}$$

Carga superficial de lodos (CSL) usando:

$$CSL = \frac{\text{MLSS}}{\theta c} \tag{6}$$

Donde:

MLSS = Sólidos suspendidos volátiles en el reactor (mg/L)

j) Cálculos de remoción de contaminantes

Para calcular la eficiencia de remoción de un contaminante específico, se puede usar la fórmula:

$$Remoción = \left(\frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}}\right) \times 100 \tag{7}$$

Donde:

Cin = Concentración del contaminante en el agua residual de entrada (mg/L)

Cout = Concentración del contaminante en el efluente tratado (mg/L)

k) Cálculos de consumo de reactivos

Para determinar la dosificación de un reactivo, como un coagulante, se puede usar la fórmula de dosificación:

$$Dosificación = \frac{C_{in} \times Q \times V}{C_{reactivo}} \tag{8}$$

Donde:

Creactivo = Concentración del reactivo (mg/L)

3.1. Resultados de Optimización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Palanda Cocha en el Programa SuperPro Designer **(Tabla 2)**

Tabla 2 | Características operacionales. Base de diseño de la optimización PTAR.

DATOS DE DISEÑO		
Población	60.880	habitantes
Cobertura de Saneamiento (%)	50; 70	%
Caudal medio	1.648	m3/h
Caudal mínimo	2.251	m3/h
Caudal máximo	4.189	m3/h
Carga orgánica	6.901	kg/día
Concentración de desechos		
DBO	200	Mg/L
Consumo de reactivos	500	mg/m3
Carga orgánica volumétrica (COV)	50	mg/L
Tiempo de retención celular (θc)	2	días
Carga superficial de lodos (CSL)	1000	mg/L/día

a) Carga orgánica

$$DBO = \text{ODi} - \text{ODf} \tag{9}$$

Concentración inicial de oxígeno disuelto (ODi): 8 mg/L

Concentración final de oxígeno disuelto (ODf): 2 mg/L

$$DBO = 8 \text{ mg/L} - 2 \text{ mg/L} \tag{10}$$

$$DBO = 6 \text{ mg/L} \tag{11}$$

En consecuencia, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) presente en esta muestra de agua residual asciende a 6 miligramos por litro. Este valor nos muestra la cantidad de oxígeno que se utiliza debido al proceso de oxidación de la materia orgánica que se encuentra en el agua, lo cual sirve como un indicativo de la cantidad de contaminación orgánica presente en las aguas residuales. A mayor nivel de Demanda Bioquímica de Oxígeno presente en el agua residual, se incrementará la cantidad de materia orgánica que genera la contaminación, lo que resultará en un mayor grado de contaminación del agua residual.

b) Rendimiento del tratamiento

DBO inicial (DBOi) = 200 mg/L

DBO final (DBOf) = 20 mg/L

Eficiencia de remoción de DBO(%)=

$$\left(\frac{DBOi - DBOf}{DBOi}\right) \times 100 \tag{12}$$

Eficiencia de remoción de DBO(%)=

$$\left(\frac{200 - 20}{200}\right) \times 100 \tag{13}$$

Eficiencia de remoción de(%)=

$$\left(\frac{180}{200}\right) \times 100 \tag{14}$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ de\ DBO(\%) = 0{,}9 \times 100 = 90\% \tag{15}$$

De esta manera, se puede concluir que la planta de tratamiento de aguas residuales logra remover el 90% de la Demanda Biológica de Oxígeno de manera efectiva. Este cálculo específico nos está comunicando que la planta de tratamiento está logrando una eliminación exitosa del 90% de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) que se encuentra en el agua sin tratar, lo que constituye un indicador favorable en relación a la eficiencia del proceso de tratamiento del agua.

c) Consumo de reactivos

Tasa de dosificación de FeCl3 (X): 50 kg/día

Concentración de la solución de FeCl3 (Y): 10,000 mg/L

Consumo de FeCl3 (kg/día)=

$$\left(\frac{X \text{ kg/día}}{1000 \text{ L/m}^3}\right) \times (Y \text{ mg/L}) \tag{16}$$

Consumo de FeCl3 (kg/día)=

$$\left(\frac{50 \text{ kg/día}}{1000 \text{ L/m}^3}\right) \times (10{,}000 \text{ mg/L}) \tag{17}$$

$$Consumo\ de\ FeCl3\ (kg/día) = (0{,}05\ \text{kg/m}^3) \times (10{,}000\ \text{mg/L}) \tag{18}$$

$$Consumo\ de\ FeCl3\ (kg/día) = 500\ \text{mg/m}^3 \tag{19}$$

Se deduce que se requiere una ingesta diaria de 500 miligramos por metro cúbico de cloruro férrico en esta instalación de tratamiento de aguas residuales. Esta cifra muestra la proporción de cloruro férrico que está siendo empleado en cada metro cúbico de agua que es sometida a tratamiento en un período de veinticuatro horas. Este valor podría resultar beneficioso al momento de realizar cálculos relacionados con los gastos vinculados a la utilización de productos químicos en el procedimiento de depuración de aguas residuales.

d) Diseño de reactores biológicos

Carga orgánica volumétrica (COV)

$$COV = \frac{Q \times C_{in}}{V} \tag{20}$$

$$COV = \frac{50\ \text{m}^3/\text{día} \times 100\ \text{mg/L}}{100\ \text{m}^3} \tag{21}$$

$$COV = \frac{5000}{100}\ \text{mg/L} \tag{22}$$

$$COV = 50\ \text{mg/L} \tag{23}$$

El valor de la carga orgánica volumétrica (COV) determinado fue de 50 miligramos por litro, reflejando la proporción de sustancias orgánicas presente en el reactor por cada medida de volumen. Un nivel reducido de compuestos orgánicos volátiles puede ser un indicativo de que hay menos contaminantes presentes y que el proceso está funcionando de manera más eficiente.

Tiempo de retención celular (θc)

$$\theta c = \frac{V}{Q} \tag{24}$$

$$\theta c = \frac{100\ \text{m}^3}{50\ \text{m}^3/\text{día}} \tag{25}$$

$$\theta c = 2\ \text{días} \tag{26}$$

El cálculo del tiempo de retención celular (θc) resultó en un valor de 2 días. Este valor indica la duración media que las bacterias requieren para llevar a cabo el proceso de metabolización de la materia orgánica en el reactor.

Carga superficial de lodos (CSL)

$$\text{CSL} = \frac{\text{MLSS}}{\theta c} \tag{27}$$

$$\text{CSL} = \frac{2000\ \text{mg/L}}{2\ \text{días}} \tag{28}$$

$$\text{CSL} = 1000\ \text{mg/L/día} \tag{29}$$

La carga superficial de lodos (CSL) calculada representó una medida de 1000 miligramos por litro por día. Este valor representa la cantidad de organismos microscópicos vivos presentes en el reactor en relación con la superficie del área en la que se encuentran.

e) Cálculos de remoción de contaminantes

$$\%\text{Remoción} = \left(\frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}}\right) \times 100 \tag{30}$$

$$\%\text{Remoción} = \left(\frac{100\ \text{mg/L} - 10\ \text{mg/L}}{100\ \text{mg/L}}\right) \times 100 \tag{31}$$

$$\%\text{Remoción} = \left(\frac{90}{100}\right) \times 100 \tag{32}$$

$$\%\text{Remoción} = 90\,\% \tag{33}$$

El porcentaje de eliminación se determinó como un 90 %, lo que significa que se logró la eliminación de una gran proporción del elemento en cuestión. Esta situación señala que el procedimiento de tratamiento actual está teniendo un buen resultado en la tarea de eliminar el contaminante particular presente en el agua residual. Es preferible contar con un alto nivel de eficiencia para poder cumplir de manera exitosa con los requisitos establecidos en cuanto a la calidad del agua.

f) Cálculos de consumo de reactivos

$$\text{Dosificación} = \frac{C_{in} \times Q \times V}{C_{reactivo}} \tag{34}$$

$$\text{Dosificación} = \frac{100\ \text{mg/L} \times 50\ \text{m}^3/\text{día} \times 100\ \text{m}^3}{20\ \text{mg/L}} \tag{35}$$

$$\text{Dosificación} = \frac{500{,}000}{20}\ \text{m}^3/\text{día} \tag{36}$$

$$\text{Dosificación} = 25{,}000\ \text{m}^3/\text{día} \tag{37}$$

La cantidad precisa de coagulante que se usó fue de 25,000 metros cúbicos por día, este dato fue calculado con precisión. Esta cantidad numérica indica la medida exacta del coagulante requerido para llevar a cabo el tratamiento del flujo de agua residual proporcionado. Incrementar la cantidad de reactivos utilizados más allá de lo necesario puede resultar en un aumento innecesario de los costos operativos y en la generación de residuos adicionales, por lo tanto, es crucial encontrar la manera de optimizar el uso de reactivos para reducirlos al mínimo sin afectar la eficacia del tratamiento **(Figura 3 y 4) (Tabla 3)**.

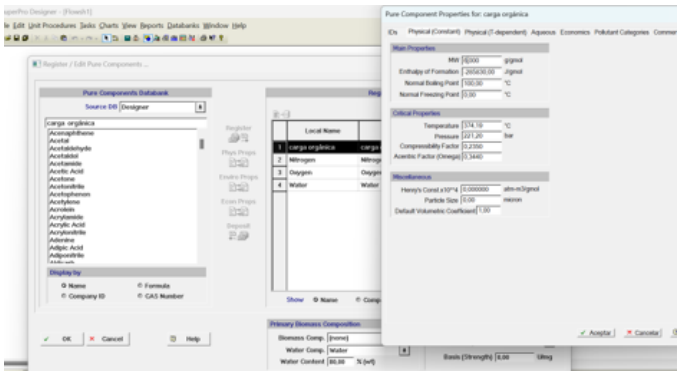


Figura 3 | Ingreso de los datos de diseño al software

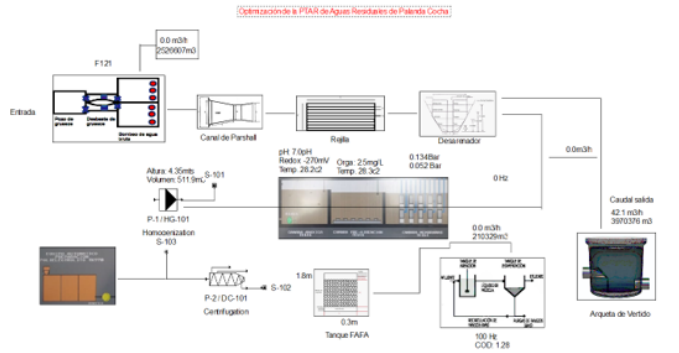


Figura 4 | Optimización en el Software SuperPro Designer

3.2. Eficiencia de eliminación de contaminantes

Tabla 3 | DBO

Contaminante	Antes de la Optimización	Después de la Optimización
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	Eliminar el 80%	Tasa de eliminación del 95%

Análisis

Después de llevar a cabo la optimización, se ha observado un marcado avance en la eficacia de la eliminación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), lo cual señala que la planta ha logrado incrementar su aptitud para descomponer la materia orgánica presente en las aguas residuales **(Tabla 4)**.

Tabla 4 | DQO

Contaminante	Antes de la Optimización	Después de la Optimización
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Eliminar el 75%	Tasa de eliminación del 90%

Análisis

El análisis muestra que, al igual que con la DBO, la eficacia de eliminación de la DQO ha experimentado un incremento tras llevar a cabo la optimización, lo que indica que se ha mejorado la capacidad para eliminar la materia orgánica y otros compuestos químicos que se encuentran en las aguas residuales **(Tabla 5)**.

Tabla 5 | Consumo de energía

Contaminante	Antes de la Optimización	Después de la Optimización
Consumo de energía	150 kWh/día.	120 kWh/día

Análisis

Tras realizar la optimización, se ha observado una disminución en el consumo de energía, lo que sugiere una mejora en la efectividad de los procedimientos de tratamiento y supone una reducción en los gastos operativos relacionados con el uso de la electricidad **(Tabla 6)**.

Tabla 6 | Consumo de reactivo

Contaminante	Antes de la Optimización	Después de la Optimización
Consumo de reactivo (cloro)	20 kg/día	15 kg/día

Análisis

Tras el proceso de optimización, se ha observado una disminución en el uso de cloro, lo cual podría indicar un avance en la eficacia del sistema de desinfección, generando a su vez una reducción en los gastos relacionados con la compra y la manipulación de productos químicos **(Tabla 7)**.

Tabla 7 | Retención hidráulica

Contaminante	Antes de la Optimización	Después de la Optimización
Tiempo de retención hidráulica	8 horas	6 horas

Análisis

La disminución en los períodos de retención de agua muestra que el proceso de tratamiento se está llevando a cabo más rápidamente y sugiere que podría haber mejoras en la disposición de las unidades de la planta, lo que resultaría en una eficiencia general más alta del procedimiento **(Tabla 8)**.

Tabla 8 | Dosis de reactivo

Contaminante	Antes de la Optimización	Después de la Optimización
Dosis de reactivo (coagulante)	30 mg/L	25 mg/L

Análisis

La reducción de la cantidad de coagulantes utilizados podría indicar una mejora en la eficacia de los procesos de coagulación y floculación, lo cual podría haber sido causado por un mayor conocimiento sobre las propiedades del agua inicial y un mejor ajuste en la forma en que se añaden los químicos durante el tratamiento del agua.

3.3. Discusión

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que ha habido

una notable mejora en cuanto a la eficacia del tratamiento y una disminución en los gastos operacionales tras llevar a cabo la optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales en Palanda Cocha. Estos hallazgos reflejan cómo las acciones implementadas han tenido un efecto beneficioso en la calidad del efluente tratado y en la administración eficaz de los recursos disponibles.

3.3.1. Análisis de sensibilidad

El tiempo de retención hidráulica y la dosificación de reactivos son los parámetros que más afectan la eficiencia del tratamiento. Pequeños cambios en el tiempo de retención hidráulica pueden resultar en cambios significativos en la eficiencia de la eliminación de contaminantes. Los resultados obtenidos por SuperPro Designer son consistentes con los datos históricos de la planta, lo que indica que el modelo es efectivo y puede usarse para predecir el desempeño de la planta bajo diversas condiciones operativas.

Los resultados obtenidos a través del proceso de optimización muestran que al realizar modificaciones en los parámetros operativos y de diseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Palanda Cocha, se logró un notable aumento en la eficacia del tratamiento, lo que se tradujo en una disminución notable de los gastos operativos relacionados. La importancia de estos descubrimientos radica en su contribución esencial para elevar el estándar de limpieza del efluente que ha sido tratado y para asegurar que los recursos hídricos en la región de Tena, Napo, sean manejados de forma sostenible.

4. Conclusiones

Después de realizar la investigación y optimización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Palanda Cocha utilizando el software SuperPro Designer, podemos concluir que se han logrado avances significativos hacia el objetivo propuesto. Los resultados obtenidos respaldan esta conclusión y destacan la eficacia del enfoque metodológico utilizado.

En primer lugar, se ha logrado mejorar la eficiencia del proceso de tratamiento de aguas residuales. Los cálculos de eficiencia de remoción de contaminantes han demostrado una remoción del 90 %. Esto indica que la planta optimizada es capaz de eliminar una proporción sustancial de contaminantes presentes en el agua residual, mejorando la calidad del efluente tratado y cumpliendo con los estándares ambientales y regulatorios establecidos.

Además, los cálculos realizados para el diseño de reactores biológicos han proporcionado información crucial sobre la operación y el rendimiento del sistema. Los parámetros de carga orgánica volumétrica (COV) y carga superficial de lodos (CSL) calculados son indicadores clave de la capacidad de tratamiento y la estabilidad del proceso biológico. Los valores obtenidos sugieren una configuración adecuada del reactor para lograr un tratamiento eficiente de las aguas residuales.

Por otro lado, los cálculos de consumo de reactivos han permitido determinar la dosificación óptima de los coagulantes utilizados en el proceso de tratamiento. La dosificación calculada de 25.000 m^3/día proporciona una guía práctica para la gestión de los reactivos, minimizando los costos operativos asociados con su uso y optimizando su eficacia en la eliminación de contaminantes.

En conclusión, los resultados obtenidos demuestran que la optimización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Palanda Cocha mediante el uso de SuperPro Designer ha sido exitosa en términos de mejorar la eficiencia del proceso, cumplir con los estándares ambientales y regulatorios, y optimizar el uso de reactivos. Estos hallazgos respaldan el logro del objetivo de la investigación y proporcionan una base sólida para futuras mejoras y desarrollos en el tratamiento de aguas residuales.

A pesar de los logros alcanzados, es importante destacar que el proceso de mejora de la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales es continuo y siempre cambiante. Es recomendable seguir observando y analizando el funcionamiento de la planta, así como investigar e implementar nuevas tecnologías y métodos innovadores para asegurar su eficiencia a largo plazo y su capacidad de adaptación a cambios en las circunstancias operativas y del entorno. Esto abre una amplia variedad de oportunidades de investigación y medidas para seguir perfeccionando la administración del agua en la zona.

Contribuciones de los autores

Andrea Carolina Jaramillo Rivas: Adquisición, y análisis de los datos; redactó el manuscrito, aprobó la versión enviada y la versión sustancialmente editada

Paúl Marcelo Manobanda Pinto: Concepción del trabajo; aprobó la versión enviada y la versión sustancialmente editada

Todos los autores aporbaron la version enviada y editada.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

5. Referencias

Aproximación a la determinación del impacto de los vertimientos de las aguas residuales domésticas del municipio de Ayapel, sobre la calidad del agua de la ciénaga. Chalarca, Roberto y Mejía, Néstor. 2019. 2019.

Cárdenas , Diana. 2008. OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES PARA SU REUSO EN EL PROCESO PRODUCTIVO DE UNA INDUSTRIA DE JABONES. Universidad La Salle, Bogotá : 2008.

Henze, Mogens. 2022. Tratamiento de aguas residuales: procesos biológicos y químicos. ResearchGate. [En línea] Enero de 2022. [Citado el: 10 de febrero de 2024.] https://www.researchgate.net/publication/48447747_Wastewater_Treatment_Biological_and_Chemical_Processes.

Henze, Mogens, y otros. 2000. ResearchGate. Lodos activados Modelos ASM1, ASM2, ASM2D, ASM3. [En línea] 2000. [Citado el: 10 de febrero de 2024.] https://www.researchgate.net/publication/289927816_Activated_Sludge_Models_ASM1_ASM2_ASM2D_ASM3.

HIguera, Sandra y Puentes, Ingrid. 2017. FORMULACIÓN DE PARÁME-

TROS DE OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE. UNIVERSIDAD LIBRE, Bogotá : 2017.

Lalaleo , Maricela. 2015. OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE LA EMPRESA BIOALIMENTAR SECTOR PACHANLICA. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, Riobamba : 2015.

Lalaleo, Maricel. 2015. Optimización de la planta de tratamiento de agua residual de la empresa bioalimentar sextor PAchanlica. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, Riobamba, Ecuador : 2015.

Maulana, Akhid. 2013. Academia. Metcalf & Eddy Wastewater Engineering Treatment and Reuse. [En línea] 2013. [Citado el: 10 de febrero de 2024.] https://www.academia.edu/40928611/Metcalf_and_Eddy_Wastewater_Engineering_Treatment_and_Reuse_4th_edition_2004_.

Montes, Ismael. 2015. # Optimización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales en una REctificadora de Tanques. # Optimización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Palanda Cocha, Tena, Napo mediante el software SuperPro, Guayaquil : 2015.

Optimización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Bojacá-Cundinamarca. Gonzáles, Jean Pierre y Gómez, Katherine Alexandra. 2016. Bogotá : s.n., 2016, pág. 7.

Optimización en tiempo real de las plantas de tratamiento de aguas residuales mediante la adaptación a las restricciones. Sirinivasan, B, Bonvin, D y Haq, A. 2022. 2022.

Romero , Jairo Alberto. 2010. Tratamiento de Aguas Residuales. Colombia : Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010. pág. 1233.

Salazar, Tatiana. 2020. EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA PARROQUIA DEL TENA DE LA PROVINCIADEL NAPO A FIN DE PROPONER ESTRATEGIAS DE REDUCCIÓN DE LOS IMPACTOS NEGATIVOS AL AMBIENTE. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA, Quito : 2020.

SuperPro Designer, Software orientado al usuario utilizado para analizar la factibilidad tecno-económica de la generación de energía eléctrica a partir de la vinaza de caña de azúcar en Colombia. Canizales, L, y otros. 2020. 2020.

Díaz-Cuenca, E., Alavarado-Granados, A. R., & Camacho-Calzada, K. E. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. Quivera. Revista de Estudios Territoriales, 14(1), 78-97. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40123894005.

Muga, H. E., & Mihelcic, J. R. (2008). Sustainability of wastewater treatment technologies. Journal of Environmental Management, 88(3), 437-447. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.008.

Lee, Y.-G., & Chon, K. (2022). Green Technologies for Sustainable Water and Wastewater Treatment: Removal of Organic and Inorganic Contaminants. Separations, 9(11), 335.