



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE
TRATAMIENTO EN LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES
TABOADA Y SU IMPACTO AMBIENTAL EN EL CUERPO
RECEPTOR DURANTE EL PERIODO DE FEBRERO A ABRIL
DEL 2024”**

Tesis para optar el Título Profesional de Licenciado en Química

Autor

Danny Kevin Jimenez Castañeda

Asesora

MSc. Graciela Silvia Untiveros Bermudez

Lima, Perú

2024

Jurado calificador

Presidente: MSc. Norma Amparo Cuizano Vargas

Vocal: Lic. Enrique Godofredo Guzman Lezama

Secretaria: Lic. Yuri Karina Puicon Campos

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, han ayudado en la realización de esta tesis. En primer lugar, mi gratitud más profunda a mi asesora de tesis, MSc. Graciela Untiveros Bermúdez, cuya invaluable orientación, apoyo incondicional y paciencia han sido esenciales durante todo el proceso de investigación. Sus expertas recomendaciones y orientaciones críticas han sido fundamentales para dar forma y concluir exitosamente este trabajo.

A la empresa PTAR Taboada, le estoy profundamente agradecido por darme la oportunidad de realizar esta investigación. Extiendo mi agradecimiento al Ing. Delmar Rodríguez Vásquez por proveerme con los recursos esenciales para ejecutar este proyecto.

Asimismo, quiero reconocer a mis colegas de PTAR Taboada por su colaboración invaluable. Las ideas y debates que compartimos fueron una fuente continua de inspiración y motivación.

No puedo dejar de reconocer el apoyo constante e incondicional de mi familia y amigos, quienes han sido pilares fundamentales en este arduo camino. Su aliento y comprensión continuos me mantuvieron enfocado y motivado, especialmente en los momentos más desafiantes.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento por su generosidad, comprensión y apoyo constante.

DEDICATORIA


Dedico esta tesis a mi familia, cuya inquebrantable fe en mí y constante apoyo han sido la piedra angular de mis logros. A mis padres, por enseñarme el valor del esfuerzo, la perseverancia y la integridad. Su amor incondicional y sus sabios consejos han sido una guía constante a lo largo de mi vida. A mis hermanos, por su aliento y comprensión en los momentos de estrés y dificultad; su apoyo ha sido una fuente de fortaleza y motivación inagotable.

Feedback Studio - Google Chrome
ev.turnitin.com/app/carta/es/?s=18o=25546001648&lang=es&ro=102&u=1165402885

turnitin

1 de 1: Uigict FAVEZ
"EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO EN ..."

Similitud 19% Marcas de alerta



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

"EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO EN LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES TABOADA Y SU IMPACTO AMBIENTAL EN EL CUERPO RECEPTOR DURANTE EL PERIODO DE FEBRERO A ABRIL DEL 2024"

Tesis para optar el Título Profesional de Licenciado en Química

Autor
Darry Karín Jiménez Castañeda

Aseora
MSc. Graciela Simá Urtiveros Bermudez

Lima, Perú

2024

Descargando...

Página 1 de 120 23794 palabras 138%

Informe estándar
Informe en inglés no disponible [ver información](#)

19% Similitud estándar [Filtros](#)

117 Exclusiones →

Fuentes
Mostrar las fuentes ocultadas

- Internet [hdl.handle.net](#) 2%
27 bloques de texto 762 palabras que coinciden
- Internet [repositorio.espe.edu.ec](#) 1%
2 bloques de texto 408 palabras que coinciden
- Internet [mmrcrcnci.org](#) <1%
18 bloques de texto 189 palabras que coinciden
- Internet [snia.mop.gob.cl](#) <1%
4 bloques de texto 162 palabras que coinciden
- Internet [licenciamento.ibama.gov.br](#) <1%
3 bloques de texto 162 palabras que coinciden
- Trabajo del estudiante [Universidad San Ignacio de Loyola](#) <1%
7 bloques de texto 137 palabras que coinciden
- Internet [repositorio.upct.es](#)

martes, 17 de diciembre de 2024

Índice

RESUMEN ABSTRACT

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
2.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2.2	FORMULACIÓN DE PROBLEMA	3
III.	OBJETIVOS	4
3.1	OBJETIVO GENERAL	4
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
IV.	HIPÓTESIS	4
V.	ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	5
5.1	A NIVEL NACIONAL	5
5.2	A NIVEL INTERNACIONAL	6
VI.	MARCO TEÓRICO	7
6.1	AGUAS RESIDUALES	7
6.2	PTAR TABOADA	23
VII.	MATERIALES Y MÉTODOS	25
7.1	EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS	25
7.2	METODOLOGÍA Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	30
7.3	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	30
7.4	CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA PTAR TABOADA	30
7.5	MUESTREO	31
7.6	DETERMINACIONES ANALÍTICAS	36
VIII.	RESULTADOS	44

8.1	MONITOREO DE LA CALIDAD AMBIENTAL DEL AGUA RESIDUAL	44
8.2	COMPARACIÓN ENTRE LOS LMP Y PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS.	55
8.3	ANÁLISIS DE METALES TOTALES	55
8.4	REMOCIÓN DE CONTAMINANTES	59
8.5	CALIDAD AMBIENTAL DEL CUERPO RECEPTOR	74
IX.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	82
9.1	COMPORTAMIENTO DE LOS CAUDALES	82
9.2	INDICADORES DE CARGA ORGÁNICA	82
9.3	SÓLIDOS SUSPENDIDOS Y TURBIDEZ	83
9.4	NUTRIENTES CLAVE: FÓSFORO Y NITRÓGENO AMONICAL	83
9.5	CONTAMINACIÓN BACTERIANA	83
9.6	PH Y TEMPERATURA	84
9.7	EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD	84
9.8	FRACCIONAMIENTO DE LA DQO	85
9.9	CUMPLIMIENTO DE NORMATIVAS NACIONALES	85
9.10	EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	85
9.11	IMPACTO EN EL CUERPO RECEPTOR	87
X.	CONCLUSIONES	89
XI.	RECOMENDACIONES	90
XII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
XIII.	ANEXOS	95

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. LMP PARA EFLUENTES DE PTAR

TABLA 2. VALORES LÍMITES SEGÚN RJ N° 0291-2009-ANA

TABLA 3 . EQUIPOS

TABLA 4 . MATERIALES

TABLA 5 . REACTIVOS

TABLA 6. COORDENADAS WGS84 DE LOS PUNTOS DE MUESTREO EN LA PTAR TABOADA

TABLA 7. UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN DE MONITOREO DE CALIDAD DE AGUA MARINA

TABLA 8. UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN DE MONITOREO DE CALIDAD DE AGUA MARINA COSTERA

TABLA 9. MÉTODOS ADOPTADOS EN EL ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD

TABLA 10. CAUDALES DEL AFLUENTE Y EFLUENTE DURANTE EL PERIODO MONITOREADO

TABLA 11. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DEL AFLUENTE Y DEL EFLUENTE (DÍAS 1 A 11)

TABLA 12. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DEL AFLUENTE Y DEL EFLUENTE (DÍAS 12 A 22)

TABLA 13. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DEL AFLUENTE Y DEL EFLUENTE (DÍA 23 A 31)

TABLA 14. RELACIÓN DBO_5 Y DQO , DBO_5 SOLUBLE Y DQO SOLUBLE

TABLA 15. CUMPLIMIENTO DE LOS LMP PARA EFLUENTES DE LA PTAR TABOADA

TABLA 16. CARACTERIZACIÓN DE METALES TOTALES DEL AFLUENTE Y EFLUENTE

TABLA 17. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES FISICOQUÍMICOS

TABLA 18. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE GRUBBS PARA DETECCIÓN DE DATOS ATÍPICOS

TABLA 19. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE NORMALIDAD DE ANDERSON-DARLING

TABLA 20. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE METALES

TABLA 21. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE GRUBBS PARA DETECCIÓN DE DATOS ATÍPICOS

TABLA 22. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE NORMALIDAD DE ANDERSON-DARLING

TABLA 23. CONDICIONES DEL AGUA EN EL CUERPO RECEPTOR (ZONA MARINA – ZONA COSTERA)

TABLA 24. CONDICIONES DEL AGUA EN EL CUERPO RECEPTOR (ZONA MARINA – ZONA COSTERA)

TABLA 25. CONDICIONES DEL AGUA EN EL CUERPO RECEPTOR (ZONA MARINA – ZONA COSTERA)

TABLA 26. CONDICIONES DEL AGUA EN EL CUERPO RECEPTOR (AGUA DE MAR – ZONA MARINA)

TABLA 27. CONDICIONES DEL AGUA EN EL CUERPO RECEPTOR (AGUA DE MAR – ZONA MARINA)

TABLA 28. CONDICIONES DEL AGUA EN EL CUERPO RECEPTOR (AGUA DE MAR – ZONA MARINA)

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA DE UNA PTAR (1)

FIGURA 2. COLECTORES QUE DESEMBOCAN ACTUALMENTE EN LA PTAR TABOADA (18).

FIGURA 3. CAUDAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LAS PTAR PARA EL PERIODO DE DICIEMBRE DE 2015 (1).

FIGURA 4. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE CALIDAD DE AGUA DE MAR EN LA ZONA COSTERA (EN ROJO) Y ZONA MARINA (EN VERDE)

FIGURA 5. CAUDALES DEL AFLUENTE Y EFLUENTE

FIGURA 6. CONTRIBUCIONES DE LAS FRACCIONES INDIVIDUALES EN LA DQO TOTAL

FIGURA 7. PROPORCIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS BIODEGRADABLES (COD_s) Y NO BIODEGRADABLES (COD_i) EN LA DQO TOTAL.

FIGURA 8. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE ACEITES Y GRASAS

FIGURA 9. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE SST

FIGURA 10. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE DQO

FIGURA 11. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE DBO₅

FIGURA 12. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COLIFORMES TOTALES

FIGURA 13. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COLIFORMES TERMOTOLERANTES

FIGURA 14. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE NITRÓGENO AMONIACAL

FIGURA 15. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE NITRÓGENO KJELDAHL

FIGURA 16. PORCENTAJE DE REMOCIÓN FÓSFORO TOTAL

FIGURA 17. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE ALUMINIO, BARIO, BORO Y CALCIO.

FIGURA 18. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COBRE, ESTRONCIO, FÓSFORO Y HIERRO.

FIGURA 19. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE LITIO, MAGNESIO, MANGANESO Y POTASIO.

FIGURA 20. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE SILICIO, SODIO, SÍLICE Y ZINC.

FIGURA A- 1. PREPARACIÓN DE MATERIALES PARA MONITOREO DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

FIGURA A-2A. PROCESO DE DIGESTIÓN DE FÓSFORO TOTAL

FIGURA A-2B. PROCESO DE DESARROLLO DE COLOR Y LECTURA MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA UV-VIS PARA LA DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL

FIGURA A-3A. PROCESO DE DIGESTIÓN DEL NITRÓGENO KJELDAHL

FIGURA A-3B. PROCESO DE DESTILACIÓN DEL NITRÓGENO KJELDAHL

FIGURA A-3C. LECTURA MEDIANTE EL MÉTODO DE ION SELECTIVO PARA LA DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO KJELDAHL

FIGURA A-4A. PROCESO DE DIGESTIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DQO

FIGURA A-4B. LECTURA MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA UV-VIS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DQO

FIGURA A- 5A. PROCESO DE SECADO EN ESTUFA PARA LA DETERMINACIÓN DE SST

FIGURA A- 5B. PROCESO DE PESAJE PARA LA DETERMINACIÓN DE SST

FIGURA A-6A. CURVA DE CALIBRACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DEL CROMO HEXAVALENTE

FIGURA A-6B. LECTURA DE MUESTRAS DE AGUA DE MAR MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA UV-VIS

FIGURA A-7. LECTURA DE NITRÓGENO AMONIAICAL MEDIANTE ELECTRODO DE ION SELECTIVO (ISE)

FIGURA A-8. PROCESO DE LECTURA DE TURBIDEZ

FIGURA A-9. PROCESO DE DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES UTILIZANDO CONOS INNOF

FIGURA A-10A. PROCESO DE EVAPORACIÓN DE HEXANO

FIGURA A-10B. RETIRADO DE LA ESTUFA

FIGURA A-10C. PESAJE

FIGURA A-11A. DBO₅ SOLUBLE DESPUÉS DEL FILTRADO

FIGURA A-11B. INCUBACIÓN POR 5 DÍAS.

FIGURA A-11C. LECTURA FINAL

FIGURA A- 12. DETERMINACIÓN DE PH, CONDUCTIVIDAD, OXÍGENO DISUELTO Y TEMPERATURA CON MULTIPARÁMETRO HACH

FIGURA A-13. TUBOS INOCULADOS CON CALDO LAURIL SULFATO TRIPTOSA (LST) PARA LA DETECCIÓN PRESUNTIVA DE COLIFORMES Y TUBOS CON CALDO EC PARA LA CONFIRMACIÓN DE COLIFORMES TERMOTOLERANTES

FIGURA A-14. MONITOREO DE PARÁMETROS DE CAMPO EN LAS ESTACIONES DE MONITOREO EN AGUA DE MAR

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. PREPARACIÓN DE MATERIALES PARA MUESTREO

ANEXO 2. DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL

ANEXO 3. DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO KJELDAHL

ANEXO 4. DETERMINACIÓN DE DQO

ANEXO 5. DETERMINACIÓN DE SST

ANEXO 6. DETERMINACIÓN DE CROMO HEXAVALENTE

ANEXO 7. DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO AMONIACAL

ANEXO 8. DETERMINACIÓN DE TURBIDEZ

ANEXO 9. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES

ANEXO 10. DETERMINACIÓN DE ACEITES Y GRASAS

ANEXO 11. DETERMINACIÓN DE DBO₅

ANEXO 12. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CAMPO

ANEXO 13. DETERMINACIÓN DE COLIFORMES TOTALES Y TERMOTOLERANTES

ANEXO 14. MONITOREO EN AGUA DE MAR

ABREVIATURAS

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

DQO: Demanda Química de Oxígeno

DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días

SST: Sólidos Totales en Suspensión

LMP: Límites Máximos Permisibles

ANA: Autoridad Nacional del Agua

MINAM: Ministerio del Ambiente

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

NMP: Número Más Probable (relacionado con el conteo de coliformes)

NTU: Unidades Nefelométricas de Turbidez

MVCS: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento

pH: Potencial de Hidrógeno

μS/cm: Microsiemens por centímetro (unidad de medida de conductividad eléctrica)

ICP: Plasma Acoplado Inductivamente (método de espectrometría utilizado en análisis químico).

RESUMEN

El estudio evaluó la eficiencia de la PTAR Taboada, está considerada como la más grande de su tipo en Sudamérica, con una capacidad operativa que maneja un caudal promedio de 14 m³/s y un caudal máximo de 20,3 m³/s. Esta planta trata las aguas residuales de más de 4 millones de personas en Lima Metropolitana y Callao. Se evaluó el impacto ambiental en el cuerpo receptor analizando parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, comparando la calidad del agua antes y después del proceso de tratamiento. Durante el periodo comprendido entre febrero y abril de 2024, se llevaron a cabo 31 días de análisis representativo, en los cuales se midieron parámetros clave como DQO, DBO₅, nitrógeno amoniacal, nitrógeno Kjeldahl, aceites y grasas, cianuro libre, metales totales, coliformes termotolerantes, SST, pH, turbidez y temperatura para evaluar la eficiencia del tratamiento.

Los resultados muestran que la PTAR Taboada logra una remoción significativa en varios parámetros fisicoquímicos: aceites y grasas (24,2%), DBO₅ (23,7%), DQO (26,6%), SST (26,1%). Sin embargo, se observan diferencias en la eficacia de remoción para distintos contaminantes, como el nitrógeno amoniacal (17,6%). Para la remoción de contaminantes microbiológicos, como los coliformes totales (32,6%) y coliformes termotolerantes (31,5%). La remoción es baja para algunos metales, como la sílice (11,4%) y el potasio (11,6%), y mejor para el manganeso (30,7%) y el hierro (31,6%). Al contrastar los resultados del efluente con los LMP determinados por la normativa nacional, se encontró que la planta cumple con los estándares para pH y temperatura. No obstante, los niveles de coliformes termotolerantes, SST, DBO₅, DQO, aceites y grasas superan los permitidos, lo que indica la necesidad de mejorar la eficiencia del proceso de remoción para estos contaminantes.

Se analizó el impacto del vertimiento en el cuerpo receptor, con monitoreos en la zona costera y marítima. Aunque los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos están dentro de los límites establecidos por la regulación ambiental vigente, es esencial mejorar el tratamiento para lograr un cumplimiento completo. Esto incluye mejorar la remoción de metales pesados y la gestión de parámetros microbiológicos, esenciales para proteger los ecosistemas acuáticos y la salud pública.

Palabras clave: Agua residual, tratamiento, calidad de agua, eficiencia, afluente, efluente

ABSTRACT

The study evaluated the efficiency of the Taboada WWTP, which is considered the largest of its kind in South America, with an operational capacity handling an average flow of 14 m³/s and a maximum flow of 20.3 m³/s. This plant treats wastewater from over 4 million people in Lima Metropolitana and Callao. The environmental impact on the receiving body was assessed by analyzing physicochemical and microbiological parameters, comparing water quality before and after the treatment process.

During the period from February to April 2024, a representative analysis was conducted over 31 days, measuring key parameters such as COD, BOD₅, ammoniacal nitrogen, Kjeldahl nitrogen, oils and greases, free cyanide, total metals, thermotolerant coliforms, TSS, pH, turbidity, and temperature were measured to evaluate treatment efficiency.

The results show that the Taboada WWTP achieves significant removal in several physicochemical parameters: oils and fats (24.2%), BOD₅ (23.7%), COD (26.6%), TSS (26.1%). However, there are differences in the removal efficiency for different contaminants, such as ammoniacal nitrogen (17.6%). For the removal of microbiological contaminants, such as total coliforms (32.6%) and thermotolerant coliforms (31.5%). The removal is low for some metals, such as silica (11.4%) and potassium (11.6%), and better for manganese (30.7%) and iron (31.6%). When comparing the effluent results with the national regulations' allowable limits, it was found that the plant meets the standards for pH and temperature. However, the levels of thermotolerant coliforms, TSS, BOD₅, COD, oils, and fats exceed the permitted limits, indicating the need to improve the removal efficiency for these contaminants.

The impact of discharge on the receiving body was analyzed through monitoring in the coastal and marine zones. Although the physicochemical and microbiological parameters are within the limits established by current environmental regulations, it is essential to enhance treatment to achieve full compliance. This includes improving the removal of heavy metals and managing microbiological parameters, which are crucial for protecting aquatic ecosystems and public health.

Keywords: Wastewater, treatment, water quality, efficiency, influent, effluent

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento esencial para la vida, convirtiéndose así en uno de los pilares fundamentales del desarrollo sostenible. La conservación adecuada de este recurso es crucial para garantizar la continuidad de los ecosistemas y el bienestar humano a largo plazo. En este sentido, la preocupación global por la calidad del agua se intensifica debido a la amenaza constante de la contaminación, lo que subraya la necesidad urgente de acciones concertadas a nivel mundial para salvaguardar este recurso vital y promover un equilibrio ambiental sostenible.

En la mayoría de los países desarrollados, especialmente en aquellos densamente poblados e industrializados, las necesidades de agua para uso doméstico y actividades industriales aumentan el consumo de agua y contribuyen a un aumento de vertidos contaminantes cada vez más diversos, lo que requiere un grado de tratamiento más específico y sofisticado.

El crecimiento tecnológico e industrial de las últimas décadas ha incrementado la cantidad de aguas residuales con compuestos peligrosos o tóxicos. Estos compuestos, perjudiciales para la vida humana y marina, han llevado a una mayor conciencia ambiental y, como resultado, a la implementación de restricciones más estrictas sobre sus concentraciones en las aguas residuales, garantizando así un vertido seguro.

En el Perú, se calcula que 3,4 millones de personas en Perú no tienen acceso al suministro de agua potable, y 8,0 millones carecen de un sistema de alcantarillado. En cuanto al porcentaje de tratamiento, únicamente el 63 % de las aguas recolectadas se someten a un proceso de tratamiento eficaz. Existen 96 áreas dentro del alcance de las entidades proveedoras de servicios que carecen de sistemas de tratamiento para sus aguas residuales, lo que resulta en vertidos directos a ríos, mares, canales o drenajes, así como en el uso no autorizado para riego. Estas localidades vertieron en el año 2020 aproximadamente un total de 267 millones de m³/año a algún cuerpo de agua sin ningún tratamiento, lo que representa el 22 % de toda el agua residual vertida al alcantarillado de las empresas prestadoras. La implementación de los sistemas de tratamiento y evacuación de aguas residuales todavía no cumple satisfactoriamente con los objetivos establecidos en la Política Nacional de Saneamiento (1,2).

El objetivo de este estudio fue analizar y evaluar la eficiencia del tratamiento en la PTAR Taboada, considerada la planta de tratamiento de aguas residuales más grande de Sudamérica. Con una capacidad operativa que maneja un caudal promedio de 14 m³/s y un caudal máximo de 20.3 m³/s, la PTAR Taboada trata las aguas residuales de más de 4 millones de personas en Lima Metropolitana y Callao. Su impacto ambiental en el cuerpo receptor se evaluó mediante mediciones de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, comparando la calidad del agua antes y después del tratamiento.

Esta planta, inaugurada en 2013, es clave para el saneamiento de la región, ya que procesa aproximadamente el 75% de las aguas residuales generadas en Lima y Callao, lo que anteriormente se vertía sin tratar al mar y al río Rímac, causando serios problemas ambientales. La necesidad de esta investigación surgió debido a la falta de datos y análisis específicos sobre el desempeño de la planta. A través de este estudio, se pretende aumentar la comprensión de los procesos y tecnologías implementadas en la PTAR Taboada, así como realizar un monitoreo continuo de los parámetros de calidad del agua. Esto permitirá determinar el desempeño de la planta y verificar si cumple con los estándares requeridos por las normativas ambientales vigentes, además de explorar posibles aplicaciones para la reutilización del agua tratada. Este enfoque no solo contribuye al conocimiento científico en el área de tratamiento de aguas residuales, sino que también proporciona datos esenciales para mejorar continuamente la operación de la planta.

II. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

2.1 Planteamiento del problema

Dado el creciente aumento en la demanda de agua dulce y la creciente presión sobre los recursos hídricos debido a la explotación excesiva, la contaminación y el cambio climático, es crucial aprovechar las oportunidades que ofrece una gestión más eficiente de las aguas residuales (3).

Aunque se ha optado por una tecnología respetuosa con el medio ambiente en la planta de tratamiento, es esencial realizar un monitoreo constante y obtener pruebas sólidas del cumplimiento de las regulaciones. Por tanto, resulta esencial comprobar si la planta está alcanzando los objetivos establecidos en su diseño. Para lograr este propósito, es necesario examinar la eficacia de la planta a través de mediciones exactas de los parámetros físicos, químicos y biológicos que definen tanto las aguas residuales al ingreso a la planta como después del tratamiento, de acuerdo con las normativas nacionales correspondientes.

2.2 Formulación de problema

❖ ¿Cuál es la eficiencia actual del proceso de tratamiento en la PTAR Taboada?

2.2.1 Problema General

❖ ¿Cuál es la eficiencia actual de la PTAR Taboada?

2.2.2 Problemas específicos

❖ ¿Qué parámetros del efluente de la PTAR Taboada cumplen con los LMPs?

❖ ¿Cuál es la calidad del agua tratada descargada por la PTAR Taboada en el cuerpo receptor?

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

- ❖ Analizar la eficiencia del tratamiento en la PTAR Taboada y su impacto ambiental en el cuerpo receptor.

3.2 Objetivos específicos

- ❖ Determinar los valores de DQO, DBO₅, aceites y grasas, metales totales, coliformes totales, coliformes termotolerantes, sólidos suspendidos totales (SST), pH y temperatura en el afluente y efluente, y evaluar si los valores del efluente cumplen con los LMP establecidos.
- ❖ Monitorear los parámetros de calidad del agua para evaluar la eficiencia de la PTAR Taboada.
- ❖ Evaluar el impacto de la descarga del efluente en el cuerpo de agua receptor mediante un análisis comparativo de los parámetros de calidad del agua.

IV. HIPÓTESIS

- ❖ **Hipótesis nula (H₀):** La eficiencia promedio de la PTAR Taboada es menor o igual al 50 % ($\mu_0 \leq 50\%$).
- ❖ **Hipótesis alterna (H₁):** La eficiencia promedio de la PTAR Taboada es mayor al 50 % ($\mu_0 > 50\%$).

V. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

5.1 A Nivel Nacional

En Sorochuco, Celendín, Cajamarca, se llevó a cabo una investigación para analizar la eficiencia de la PTAR en varios parámetros clave: DBO₅, DQO, SST, aceites y grasas, pH y temperatura. Durante un periodo de tres meses, se tomaron seis muestras cada 15 días para cada parámetro evaluado. Los resultados mostraron que la planta logró una remoción satisfactoria en los siguientes parámetros: DBO₅ 70 %, DQO 68 %, SST 79 % y aceites y grasas 64 %. Además, el efluente tratado presentó un promedio de temperatura de 17,3 °C y un pH de 7,3. La PTAR en Sorochuco demostró su eficiencia al cumplir con los estándares establecidos en los LMP, obteniendo remociones satisfactorias en los parámetros mencionados (4).

En el distrito de Palca, Huancavelica, se realizó una investigación para analizar la concentración de varios parámetros en el efluente de la PTAR. Los parámetros analizados comprendieron SST, DQO, DBO₅, aceites y grasas, y coliformes termotolerantes. Los resultados se compararon con los LMP establecidos. La planta demostró una alta eficiencia en la remoción de DQO, aceites y grasas, coliformes termotolerantes y SST, cumpliendo con los límites permitidos. Sin embargo, se observó una eficiencia significativamente baja en la remoción de DBO₅, logrando solo una reducción del 4 %, lo cual implica un incumplimiento de los límites establecidos para este parámetro (5).

En esta investigación se evaluó la eficiencia de la PTAR de una empresa minera en Cajamarca. Se analizaron diversos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua doméstica y se compararon con los LMP establecidos. Los resultados indicaron que la planta alcanzó una elevada eficiencia en la eliminación de contaminantes, con valores de aceites y grasas 99 %, SST 89 %, DBO₅ 99 %, DQO 94 %. Estos porcentajes cumplieron con los estándares óptimos de remoción, demostrando que la PTAR es altamente eficiente. Debido a la efectiva remoción de contaminantes, el agua tratada es apta para ser reutilizada en el riego de cultivos y para el consumo de animales (6).

5.2 A Nivel Internacional

El objetivo de esta investigación fue monitorear la calidad del agua en nueve plantas de tratamiento de aguas residuales en México para determinar si los efluentes cumplen con las Normas Mexicanas y son adecuados para aplicaciones como el riego agrícola, el mantenimiento de campos deportivos y las áreas verdes. Se analizaron cinco parámetros: DBO₅, DQO, SST, Temperatura y pH. Los resultados mostraron eficiencias de reducción superiores al 70 % en la mayoría de las PTAR. Sin embargo, se observaron diferencias entre las plantas debido a las etapas de tratamiento, ubicación y gestión. En general, se demostró que las PTAR funcionan eficientemente, aunque la calidad de los efluentes puede variar según estos factores (7).

El propósito principal de esta investigación fue evaluar la eficiencia actual de una PTAR en Ecuador. Esta planta, que procesa las aguas residuales de aproximadamente 3000 personas diariamente, fue examinada para verificar su conformidad con los parámetros establecidos por la normativa ambiental para la descarga de efluentes en el río Santa Clara. La evaluación se enfocó en la efectividad del sistema de tratamiento basado en humedales. Los resultados indicaron que la planta cumple satisfactoriamente con las expectativas para este tipo de sistemas, logrando altos porcentajes de remoción: DBO₅ 89 %, DQO 93 %, sulfatos 96 % y fosfatos 98 % (8).

VI. MARCO TEÓRICO

6.1 Aguas Residuales

Las aguas residuales son aquellas que resultan del uso en distintas actividades humanas, como domésticas, industriales, agrícolas o comerciales, y que han adquirido contaminantes que modifican su calidad original. Estas aguas pueden contener una combinación de sustancias sólidas, líquidas y gaseosas, incluyendo residuos orgánicos e inorgánicos, microorganismos patógenos, productos químicos, metales pesados y otros compuestos peligrosos (9).

6.1.1 Clasificación de Aguas Residuales

6.1.1.1 Aguas Residuales domésticas

Se refieren a las aguas residuales provenientes de residencias y negocios, las cuales contienen desperdicios fisiológicos y otros desechos generados por la actividad humana, y que deben ser eliminadas de manera apropiada. Además, engloban los residuos que son transportados por agua o líquidos provenientes de artefactos de plomería, electrodomésticos y dispositivos como inodoros, baños, lavadoras y lavavajillas (10).

6.1.1.2 Aguas Residuales Municipales

Estas son las aguas residuales provenientes de hogares que pueden estar combinadas con agua de lluvia o con aguas residuales industriales que han sido tratadas previamente, con el propósito de ser descargadas en sistemas de alcantarillado que son de tipo combinado (10).

6.1.1.3 Aguas Residuales Industriales

Estas aguas son generadas como resultado de diversas actividades productivas, que abarcan desde la minería y la agricultura hasta la producción de energía y la agroindustria, entre otras. También engloban los desechos arrastrados por el agua o líquidos generados en procesos industriales, provenientes de sectores industriales, manufactureros, comerciales, talleres de reparación de automóviles, lavado de vehículos, actividades comerciales o médicas. Estas aguas residuales pueden contener elementos tóxicos o peligrosos (10).

6.1.2 Características físicas, Biológicas y químicas de las aguas residuales

6.1.2.1 Características físicas

- **Turbidez**

Es una evaluación de cómo la luz se transmite a través del agua. La opacidad del agua residual, causada por la presencia de diversos desechos suspendidos, se evalúa mediante la medición de su capacidad para transmitir luz. Esta opacidad está relacionada con la cantidad de materia sólida en suspensión, como heces, papel, grasas y otros residuos. Se utiliza una vara de turbidez o un turbidímetro para medir esta opacidad, expresada típicamente en unidades de turbidez nefelométrica (NTU) (11,12).

- **Color**

El aspecto cromático de las aguas residuales refleja su frescura. Un tono marrón grisáceo o amarillento indica que son recientes, mientras que a medida que comienzan a descomponerse, su color tiende a oscurecerse hasta volverse negro. Las aguas residuales viejas y sépticas suelen tener un tono negro. Además, la presencia de ciertos desechos industriales puede generar colores distintos. Por lo general, la simple observación visual permite identificar el color de las aguas residuales (11,12).

- **Olor**

Los olores en las aguas residuales domésticas generalmente provienen de los gases emitidos durante la descomposición de materia orgánica o de la presencia de ciertas sustancias añadidas al agua. Normalmente, el agua residual recién generada tiene un olor desagradable característico, mientras que, en las aguas sépticas, el sulfuro de hidrógeno es el principal responsable del mal olor. Estos olores suelen ser una de las principales preocupaciones del público en relación con la instalación y funcionamiento de sistemas de tratamiento de aguas residuales (11,12) .

- **Temperatura**

La temperatura de las aguas residuales urbanas suele ser más alta que la del agua de suministro local, debido a la mezcla de agua caliente de hogares y actividades industriales. Este aumento de temperatura afecta a la vida acuática, la velocidad de las reacciones químicas y la saturación de oxígeno en el agua. Para que la actividad bacteriana sea óptima, la temperatura debe estar entre 25 °C y 35 °C. Sin embargo, tanto la digestión aerobia como la nitrificación se interrumpen cuando la temperatura llega a los 50 °C, mientras que la digestión metanogénica se reduce cuando la temperatura desciende por debajo de los 15 °C (11,12).

- **Oxígeno disuelto**

El oxígeno disuelto es crucial para la vida microbiana y otros organismos, pero su disponibilidad en el agua está condicionada por la disolución del gas, la presión atmosférica, la temperatura y la calidad del agua. En verano, con temperaturas más altas y menor caudal en los cuerpos de agua, los niveles de oxígeno disuelto pueden llegar a niveles críticos, lo que puede causar malos olores en las aguas residuales. Por lo tanto, es fundamental asegurar una cantidad adecuada de oxígeno disuelto para prevenir este problema (11,12).

6.1.3 Características químicas

6.1.3.1 Sustancias orgánicas

- **Carbohidratos**

Los carbohidratos, presentes abundantemente en la naturaleza y también en las aguas residuales, son compuestos orgánicos que incluyen almidón, celulosa, azúcares y fibras de madera, compuestos principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno. Mientras los azúcares son solubles en agua, los almidones no lo son. En organismos como bacterias, los carbohidratos se utilizan para sintetizar grasas y proteínas, y como fuente de energía. En condiciones anaeróbicas, la descomposición de los carbohidratos produce ácidos orgánicos, alcoholes y gases como CO₂ y H₂S. Los carbohidratos más relevantes incluyen glucosa, sacarosa y lactosa, junto con cantidades menores de galactosa, fructosa, xilosa y arabinosa, que en conjunto representan el 90-95 % de los carbohidratos presentes, equivalente a 50-120 mg/L (11,12).

- **Proteínas**

Los compuestos proteicos son una parte importante de los biosólidos encontrados en aguas residuales. Estos biosólidos, que no consisten únicamente en proteínas, suelen estar recubiertos por una capa de proteína que afecta su comportamiento químico y físico. La cantidad de proteína en los biosólidos digeridos varía del 15 al 30 %, mientras que en los biosólidos activados oscila entre el 28 y el 50 %. En aguas residuales, las proteínas y la urea son las principales fuentes de nitrógeno. Cuando las proteínas están presentes en grandes cantidades, los microorganismos las descomponen, generando productos finales con olores desagradables. Durante este proceso, las proteínas se descomponen en aminoácidos, que a su vez se degradan en amoníaco, sulfuro de hidrógeno y otros compuestos orgánicos (11,12).

- **Grasas, aceites y ceras**

Los componentes incluidos son grasas, aceites y ceras, compuestos principalmente por ácidos grasos provenientes de fuentes animales y vegetales, como la mantequilla, la margarina, los aceites vegetales y las carnes, además de hidrocarburos; estos son solubles en hexano. Las grasas y aceites provenientes de fuentes vegetales o animales pueden descomponerse biológicamente y ser tratados en instalaciones adecuadas. Por otro lado, los aceites y grasas de origen mineral podrían no ser biodegradables y requieren un tratamiento previo antes de ser eliminados a través de procesos biológicos (11,12).

6.1.3.2 Medición de Materia Orgánica

- **DBO**

Es un indicador ampliamente empleado para evaluar la calidad de las aguas residuales. Refleja la cantidad de oxígeno que los microorganismos necesitan para descomponer la materia orgánica en condiciones aeróbicas y se utiliza para calcular el oxígeno necesario para la biodegradación de esta materia. En el contexto de las aguas residuales municipales, la DBO se usa para dimensionar las plantas de tratamiento, asegurar el cumplimiento de las normativas de descarga y medir la eficacia del tratamiento. La medición se realiza a una temperatura de 20 °C durante un periodo de incubación de 5 días (11,12).

- **DQO**

Se utiliza para medir la cantidad de oxígeno requerida para oxidar químicamente la materia orgánica empleando un potente agente oxidante, como el $K_2Cr_2O_7$, bajo condiciones ácidas y a elevada temperatura. A diferencia de la DBO, la DQO no es directamente comparable, ya que también oxida compuestos inorgánicos como sulfuros, sulfitos, tiosulfatos y nitritos mediante el dicromato. Además, ciertos compuestos orgánicos, como hidrocarburos aromáticos y piridina, no son oxidados por este agente, al igual que otros compuestos orgánicos que no son biodegradables. Es importante señalar que la relación entre DQO y DBO varía entre 1.2 y 2.5 en aguas residuales domésticas (11,12).

Fraccionamiento de la DQO

El análisis de la DQO en aguas residuales es esencial para entender la naturaleza de la materia orgánica presente y su biodegradabilidad. La DQO total se puede dividir en varias fracciones que ayudan a caracterizar los componentes biodegradables y no biodegradables del efluente (13):

Fracciones de la DQO

1. DQO Soluble Biodegradable (S_s):

Representa la fracción de DQO que se encuentra en forma soluble y es fácilmente degradada por los microorganismos. Incluye azúcares, ácidos orgánicos, y otros compuestos de bajo peso molecular.

2. DQO Soluble No Biodegradable (S_I):

Esta fracción está compuesta por compuestos solubles que no son fácilmente degradados por los microorganismos. Incluye sustancias como ciertos fenoles y compuestos aromáticos complejos.

3. DQO Particulada Lentamente Biodegradable (X_s):

Consiste en la materia orgánica particulada que se degrada lentamente. Esta fracción se convierte gradualmente en una forma soluble biodegradable a través de la hidrólisis.

4. DQO Particulada No Biodegradable (X_I):

Compuestos inorgánicos y materia orgánica altamente recalcitrante forman parte de esta fracción. Incluye materiales particulados que no son susceptibles a la biodegradación.

Metodología para la Determinación de Fracciones

La identificación y cuantificación de estas fracciones se realiza a través de pruebas de biodegradación y ensayos fisicoquímicos, siguiendo protocolos estandarizados como los establecidos en la metodología ATV-A 131(13).

Procedimiento

1. Medición de DBO₅ y DQO

Se obtienen valores de DBO₅ y DQO para toda la muestra.

2. Medición de DBO₅ Soluble y DQO Soluble

Se filtra la muestra y se miden los valores de DBO₅ y DQO en la fracción soluble.

3. Cálculos de Fracciones:

❖ **DQO Soluble Biodegradable (S_S):**

$$S_S = \text{DBO}_5 \text{ Soluble}$$

❖ **DQO Soluble No Biodegradable (S_I):**

$$S_I = \text{DQO Soluble} - \text{DBO}_5 \text{ Soluble}$$

❖ **DQO Particulada Biodegradable (X_S):**

$$X_S = \text{DBO}_5 \text{ (Total)} - \text{DBO}_5 \text{ Soluble}$$

❖ **DQO Particulada No Biodegradable (X_I):**

$$X_I = \text{DQO (Total)} - \text{DQO Soluble} - (\text{DBO}_5 \text{ (Total)} - \text{DBO}_5 \text{ Soluble})$$

La identificación precisa de las fracciones de DQO mejora los procesos de tratamiento de aguas residuales, asegurando una eliminación más eficaz de la materia orgánica y permitiendo un diseño más eficiente de los sistemas biológicos de tratamiento. Además, facilita la predicción del comportamiento de los efluentes en las PTAR y apoya el cumplimiento de las normativas ambientales. Este enfoque proporciona una base sólida para el diseño y la operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, optimizando tanto la eficiencia como la efectividad de los procesos biológicos.

6.1.3.3 Sustancias Inorgánicas

- **Cloruros**

La concentración de cloruros en las aguas residuales puede exceder los niveles habituales encontrados en el agua potable. Los cloruros en el agua natural provienen de varias fuentes, incluyendo la disolución de rocas y suelos, la infiltración de aguas subterráneas en sistemas de alcantarillado cercanos a cuerpos de agua salada. Además, las actividades agrícolas, industriales, domésticas y humanas también contribuyen a su concentración. En las aguas residuales, la concentración de cloruro generalmente alcanza los 120 mg/L, mientras que el límite permitido en el agua potable es de 250 mg/L, según las normativas de calidad del agua (11,12).

- **Nitrógeno**

El nitrógeno es esencial para el desarrollo de microorganismos, plantas y animales, y se presenta en diversas formas en las aguas residuales, como nitrógeno orgánico, amoniacal, nitritos y nitratos. El Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) incluye tanto el nitrógeno orgánico como el amoniacal. Dado que el nitrógeno es crucial para la formación de proteínas, es importante conocer su concentración en las aguas residuales para evaluar su tratamiento a través de procesos biológicos. El nitrógeno

orgánico, que predomina en las aguas residuales, es descompuesto rápidamente por bacterias, convirtiéndose en nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos en un ambiente aeróbico. Por lo general, las aguas residuales sin tratar tienen concentraciones de nitrógeno entre 20 y 50 mg/L, según el NTK. Los principales compuestos de nitrógeno en las aguas residuales domésticas son proteínas, aminas, aminoácidos y urea (11,12).

- **Fósforo**

Las principales fuentes de liberación de fósforo al medio ambiente incluyen fertilizantes, detergentes, productos de limpieza y aguas de calderas tratadas con fosfatos. El fósforo se presenta en tres formas diferentes: como fósforo orgánico (vinculado a moléculas orgánicas), ortofosfato (que aparece en forma de anión) y polifosfatos (provenientes de detergentes). Solo el ortofosfato puede precipitarse químicamente; sin embargo, la mayor parte del fósforo orgánico y los polifosfatos se convierten en ortofosfato durante el tratamiento biológico. La concentración de PO_4^{3-} en aguas residuales sin tratar generalmente está entre 5 y 10 mg/L. A pesar de esto, se requieren concentraciones extremadamente bajas de fósforo para el crecimiento de algas. Se ha observado crecimiento no deseado de algas cuando los niveles de fósforo inorgánico están entre 0,01 y 0,05 mg/L (11,12).

- **Sulfuro de hidrógeno**

El sulfuro de hidrógeno se genera cuando la materia orgánica que incluye azufre se descompone o cuando los sulfitos y sulfatos minerales se reducen, aunque su producción se limita en presencia de altas concentraciones de oxígeno. Este gas, que es incoloro e inflamable, tiene un olor distintivo semejante a los huevos podridos. La presencia de sulfuro de hidrógeno puede llevar a la decoloración de aguas residuales y lodos, ya que se combina con el hierro para formar sulfuro ferroso (FeS) u otros sulfuros metálicos. Aunque el sulfuro de hidrógeno es el principal causante de malos olores, durante la descomposición anaeróbica también pueden producirse otros compuestos volátiles como el indol, el escatol y los mercaptanos, que son capaces de producir olores aún más desagradables (11,12).

- **pH**

El pH es un elemento fundamental para determinar la calidad del agua residual, ya que refleja la concentración de iones de hidrógeno. Se calcula como el logaritmo negativo de la concentración molar de estos iones. El intervalo de pH óptimo para la vida biológica es bastante restringido, típicamente entre 6 y 9 unidades (11,12).

- **Sólidos**

El volumen de lodo generado en un sistema de tratamiento o disposición está directamente influenciado por el contenido de sólidos. Los sólidos sedimentables se refieren a la porción de lodo que puede ser eliminada mediante sedimentación simple. Por otro lado, los sólidos disueltos comprenden materiales solubles y coloidales que normalmente requieren métodos como la oxidación biológica, la coagulación y la sedimentación para su eliminación; estos tienen un tamaño inferior a 1,2 μm . En contraste, los sólidos suspendidos tienen un tamaño superior a 1,2 μm . Los sólidos volátiles constituyen la parte orgánica de los sólidos que se vaporizan a temperaturas de aproximadamente 550 °C, y su medición es crucial en diferentes tipos de lodos. La fracción restante después de la calcinación se denomina sólidos fijos, y compone la porción orgánica o mineral de los sólidos (11,12).

- **Carbono orgánico total**

El analizador de carbono total proporciona un análisis directo del carbono soluble total en una muestra de agua. En numerosas ocasiones, el COT puede correlacionarse con la DQO y, a veces, con los valores de DBO. Dado que el análisis de carbono generalmente se realiza en poco tiempo, estas correlaciones resultan ser muy útiles para monitorear los flujos en las plantas de tratamiento y evaluar su eficiencia (11,12).

6.1.4 Características biológicas de las aguas residuales

Las aguas residuales contienen una variedad de microorganismos, incluyendo bacterias, hongos, protozoos, algas y virus. Muchos de estos microorganismos, especialmente las bacterias y los protozoos, desempeñan un papel beneficioso en los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales. No obstante, también están presentes organismos patógenos, que pueden causar enfermedades como cólera y fiebre tifoidea y que provienen de desechos humanos. Aunque la concentración de estos patógenos suele ser baja y su detección es compleja, se utilizan bacterias indicadoras, como los coliformes totales y fecales, para evaluar la contaminación fecal en el agua. En particular, la presencia de E. Coli es un indicador importante de contaminación fecal reciente y puede llevar al cierre del suministro de agua hasta que se solucione el problema. La presencia y concentración de bacterias coliformes se determina a través de técnicas como el filtrado por membrana y la fermentación en tubos múltiples, que incluyen fases presuntivas, confirmatoria y de prueba completa (11,12).

- **Etapa presuntiva**

Se utilizan tubos de fermentación primaria con caldo de lauril triptosa para analizar muestras. Estas se inoculan con cantidades graduadas de la muestra y se incuban a $35 \pm 0,5$ °C durante 24 ± 2 horas. Se examinan para detectar la formación de gas. Si no hay formación de gas, se continúa la incubación y se examinan nuevamente después de 48 ± 3 horas. La formación de gas en cualquier momento dentro de las 48 ± 3 horas se considera una prueba presuntiva positiva.

- **Etapa confirmada**

Se examinan todos los tubos de fermentación primaria que muestran formación de gas durante los períodos de 24 y 48 horas. Se inoculan tubos de fermentación con caldo de lactosa y bilis verde brillante con el contenido de los tubos que resultaron positivos en la prueba presuntiva. La inoculación se realiza lo antes posible después de la formación de gas. Estos tubos inoculados se incuban durante 48 ± 3 horas a $35 \pm 0,5$ °C. La presencia de gas en cualquier momento indica una prueba positiva confirmada.

- **Prueba completa**

La prueba completa se realiza en muestras que muestran un resultado positivo en la prueba confirmada o como medida de control de calidad en el 20 % de todas las muestras analizadas. Se rayan una o más placas de azul de metileno de eosina con la muestra y se incuban durante 24 ± 2 horas a $35 \pm 0,5$ °C. Luego, se transfieren colonias típicas a tubos de fermentación de caldo de lauril triptosa y a inclinaciones de agar nutritivo, que se incuban durante 24 ± 2 horas, o 48 ± 3 horas si no hay formación de gas. Las inclinaciones de agar correspondientes a los tubos de fermentación con formación de gas se examinan microscópicamente para bacterias gramnegativas. La presencia de formación de gas en el tubo de fermentación y bacterias gramnegativas en el cultivo de agar se considera una prueba completada satisfactoriamente, indicando la presencia positiva de bacterias coliformes en la muestra.

6.1.5 Tratamiento de aguas residuales

Las aguas residuales se tratan mediante una variedad de métodos para que sean adecuadas para el uso previsto, ya sea para regar los cultivos o para el consumo humano (ver Figura 1).

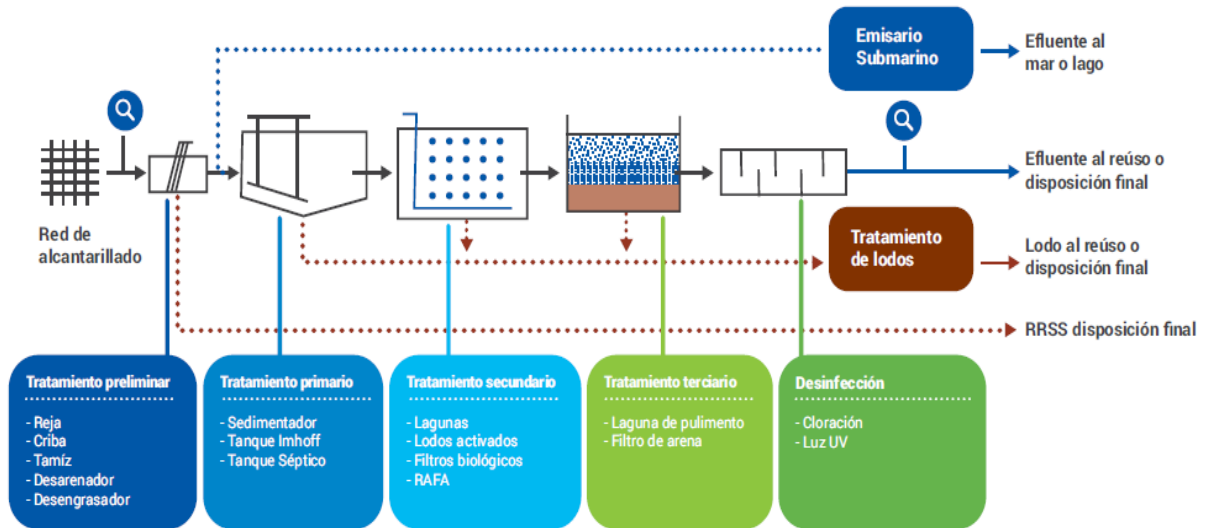


Figura 1. Esquema de una PTAR (1)

6.1.5.1 Métodos de Tratamiento de Aguas Residuales

Las aguas residuales se pueden tratar usando cualquiera o una combinación de los siguientes tipos de métodos de tratamiento, según la naturaleza de los contaminantes y el nivel de eliminación deseado.

- **Tratamiento físico**

El tratamiento físico implica la remoción de impurezas presentes en las aguas residuales a través de procesos físicos básicos, como la sedimentación, el cribado y la filtración. Estos métodos se emplean principalmente para eliminar los sólidos suspendidos (14).

- **Tratamiento químico**

El tratamiento químico implica la incorporación de agentes químicos para modificar o eliminar contaminantes mediante reacciones químicas específicas, como la coagulación-floculación para eliminar sólidos, la desinfección para erradicar patógenos, y la precipitación química para eliminar fósforo, entre otras (14).

- **Tratamiento biológico**

El tratamiento biológico consiste en la conversión o eliminación de contaminantes a través de la acción de microorganismos. Entre los métodos utilizados se encuentran el proceso de lodos activados, el biorreactor de membrana y el filtro percolador, entre otros. El principal objetivo de este tratamiento es disminuir y eliminar la materia orgánica biodegradable en las aguas residuales hasta alcanzar los niveles requeridos por las normativas regulatorias. Además, el tratamiento biológico también se utiliza para eliminar nutrientes como nitrógeno y fósforo de las aguas residuales (14).

6.1.5.2 Niveles de tratamiento de aguas residuales

Un sistema de tratamiento de aguas residuales es una combinación de operaciones y procesos diseñados para reducir los contaminantes a niveles aceptables. El nivel de tratamiento depende del uso previsto del agua tratada, regulado por normativas. Las operaciones unitarias implican métodos físicos, mientras que los procesos unitarios incluyen métodos biológicos y/o químicos. Estos pueden agruparse para ofrecer diferentes niveles de tratamiento (12,14).

- **Tratamiento preliminar**

El tratamiento preliminar busca remover materiales sólidos que no pueden ser tratados y optimizar el rendimiento de las etapas posteriores. Esto se consigue eliminando objetos grandes y medianos, como ramas, rocas y plásticos, así como materiales complicados como arenas, aceites y grasas. Las técnicas empleadas en esta fase incluyen el uso de cribas, trituradores, desarenadores, tanques de ecualización de flujo y desengrasadores (12,14).

- **Tratamiento primario**

El tratamiento primario constituye la etapa inicial en el proceso de tratamiento de aguas residuales, donde se remueven una parte de los sólidos y la materia orgánica en suspensión. Normalmente, se consigue eliminar alrededor del 60 % de los sólidos en suspensión y el 30 % de la DBO. Este proceso es crucial porque reduce la demanda de oxígeno, lo que disminuye el consumo de energía y previene problemas en las etapas posteriores del tratamiento (12,14).

- **Tratamiento secundario**

El tratamiento secundario se enfoca en descomponer la materia orgánica biodegradable que no se elimina durante el tratamiento primario. Este proceso se lleva a cabo mediante métodos biológicos que son tanto eficientes como económicos. En esta etapa, los contaminantes se transforman en materia celular, energía y otros componentes. Las células biológicas se agrupan en flóculos, que posteriormente se separan por sedimentación. Además, el tratamiento secundario puede incluir la eliminación de nutrientes si es necesario (12,14).

- **Tratamiento terciario o avanzado**

El tratamiento terciario se encarga de procesos adicionales para eliminar sólidos en suspensión, nutrientes y materia orgánica que no es biodegradable que queda después de las etapas anteriores. Este tratamiento se utiliza especialmente para lograr una desinfección más completa, lo cual es crucial para prevenir la eutrofización de cuerpos de agua o para recuperar el agua para usos específicos (12,14).

6.1.5.3 Desinfección

Cuando las aguas residuales, ya sea sin tratar o tratadas, se vierten en cuerpos de agua destinados al suministro público o a actividades recreativas, es necesario aplicar un tratamiento adicional para eliminar los patógenos que probablemente aún estén presentes en ellas (12,14).

6.1.5.4 Tratamiento y disposición de lodo

A medida que se incrementa el nivel de tratamiento de las aguas residuales, aumenta la cantidad de residuos generados, lo cual debe ser considerado al elegir el proceso de tratamiento adecuado. Algunos métodos para tratar el lodo incluyen la digestión anaerobia, digestión aerobia, compostaje con residuos celulósicos, estabilización con cal, incineración y pasteurización (12,14).

6.1.5.5 Gestión de Residuos y Biosólidos

El tratamiento de aguas residuales produce lodos, tanto orgánicos como inorgánicos. Los primeros, llamados biosólidos, requieren tratamiento adicional debido a su alto contenido de materia orgánica. Este proceso puede representar hasta la mitad del costo total del tratamiento. Los objetivos del tratamiento de lodos incluyen reducir su contenido orgánico, líquido y patógenos. Si contienen metales pesados u otros compuestos tóxicos, pueden necesitar tratamiento adicional. Se emplean diversas técnicas, como la digestión anaerobia, aerobia, secado y compostaje, según la calidad deseada de los biosólidos (12,14).

6.1.5.6 Sistema de Control de Olores

Los olores desagradables representan el mayor obstáculo para que la población acepte una planta de tratamiento de aguas residuales. Por ende, el control de olores se ha vuelto un desafío en la gestión de aguas residuales y en la implementación de procesos para su tratamiento. Las etapas operativas que pueden generar malos olores incluyen el tratamiento inicial y el tratamiento de lodos (12,14).

6.1.5.7 Disposición final del agua tratada

El producto principal de los sistemas de tratamiento de aguas residuales es el agua tratada, que puede ser liberada en diferentes destinos como el suelo, cuerpos de agua receptores o ser reutilizada directamente. La decisión sobre su destino final recae en el municipio, que establece normativas basadas en las necesidades de tratamiento y los requisitos del agua. La descarga en ríos, lagos o el mar es la opción más común, pero requiere estándares de calidad para garantizar su seguridad tanto para el uso humano como para el medio ambiente, evaluando los componentes y concentraciones del agua (12,14).

6.1.6 Límites Máximos Permisibles (LMP)

Se refiere a la evaluación de la cantidad o nivel de elementos, sustancias o características físicas, químicas y biológicas presentes en una emisión. Cuando estos niveles superan ciertos límites, pueden causar daños a la salud, al bienestar humano y al medio ambiente. El MINAM y los organismos del Sistema de Gestión Ambiental tienen la autoridad legal para hacer cumplir estos estándares. No obstante, estas regulaciones no serán aplicables a las PTAR que tengan un tratamiento preliminar avanzado o un tratamiento primario y que descarguen sus efluentes a través de un emisario submarino, de acuerdo con la normativa OS.090 del Reglamento Nacional de Edificaciones.

La **Tabla 1** muestra los LMP establecidos en el Decreto Supremo 003-2010, los cuales se utilizaron para comparar con las características del efluente de la PTAR.

Tabla 1. LMP para efluentes de PTAR

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de agua
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	10, 000
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	100
Demanda química de oxígeno	mg/L	200
pH	Unidad de pH	6.5-8.5
Sólidos totales en suspensión	mg/L	150
Temperatura	°C	< 35

Fuente: D.S 003-2010-MINAM (15).

Las PTAR deben monitorear sus efluentes siguiendo un Programa de Monitoreo aprobado por el MVCS, que es responsable de verificar el cumplimiento de esta normativa y los LMP. Este programa define la ubicación de los puntos de control, los métodos y técnicas a utilizar, así como los parámetros y la frecuencia de muestreo para cada punto.

6.1.7 Valores límites para cuerpos receptores

La Resolución Jefatural N° 291-2009-ANA, emitida por la ANA en Perú, establece los "Valores Límite Máximos Permisibles para Efluentes de Actividades Productivas". Estos valores límites son concentraciones máximas permitidas de determinados contaminantes en los efluentes líquidos que son descargados por actividades productivas a cuerpos de agua o sistemas de alcantarillado.

En la **Tabla 2** se muestran los valores límites considerados de acuerdo con la normativa vigente al momento del estudio.

Tabla 2. Valores límites según RJ N° 0291-2009-ANA

Límite de sustancias potencialmente peligrosas		
Parámetro	Unidad	Categoría VI
Cianuro wad	mg/L	-
Cianuro libre	mg/L	22
Arsénico	mg/L	50
Esteres Estalatos	mg/L	0,3
Cadmio	mg/L	4
Cobre	mg/L	*
Cromo VI	mg/L	50
Mercurio	mg/L	0,2
Níquel	mg/L	**
Plomo	mg/L	30
Selenio	mg/L	10
Fenoles	mg/L	100
Sulfuros	mg/L	2
Nitratos	mg/L	N. A
Policloruros Bifenilos Totales (PCB)	mg/L	2
Límites de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), 20 °C y de oxígeno disuelto (OD)		
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	4
DBO ₅	mg/L10	10
Límites bacteriológicos		
Coliformes Totales	NMP/100 mL	20000
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	4000

Fuente: RJ N° 0291-2009-ANA (16).

*: Pruebas de 96 horas LC50 multiplicadas por 0.1

** : Pruebas de 96 horas LC50 multiplicadas por 0.02

N.A: Valor no aplicable

6.2 PTAR Taboada

La PTAR Taboada cumple con un tratamiento preliminar avanzado según lo establecido en la normativa OS.090. Este tratamiento abarca cribado, desarenado, desengrasado y tamizado. Primero, el agua bruta se bombea y se somete a un pretratamiento que incluye el uso de rejillas de gruesos y tamizado de 6 mm, seguido de desengrasado, desarenado y tamizado fino de 1 mm. Este proceso asegura que solo se envíen al mar sustancias coloidales y disueltas que sean fácilmente asimilables. Se prevé una futura expansión que incluirá tratamiento terciario. La PTAR trata aguas recolectadas por el interceptor norte, el colector Comas - Chillón y la línea de impulsión Sarita Colonia (ver Figura 2). Los efluentes se descargan a través de un emisario submarino de 3 metros de diámetro y casi 4 kilómetros de longitud, sin impacto ambiental negativo, ya que no se utilizan productos químicos o desinfectantes. Todo el proceso cumple con las normativas actuales (17).

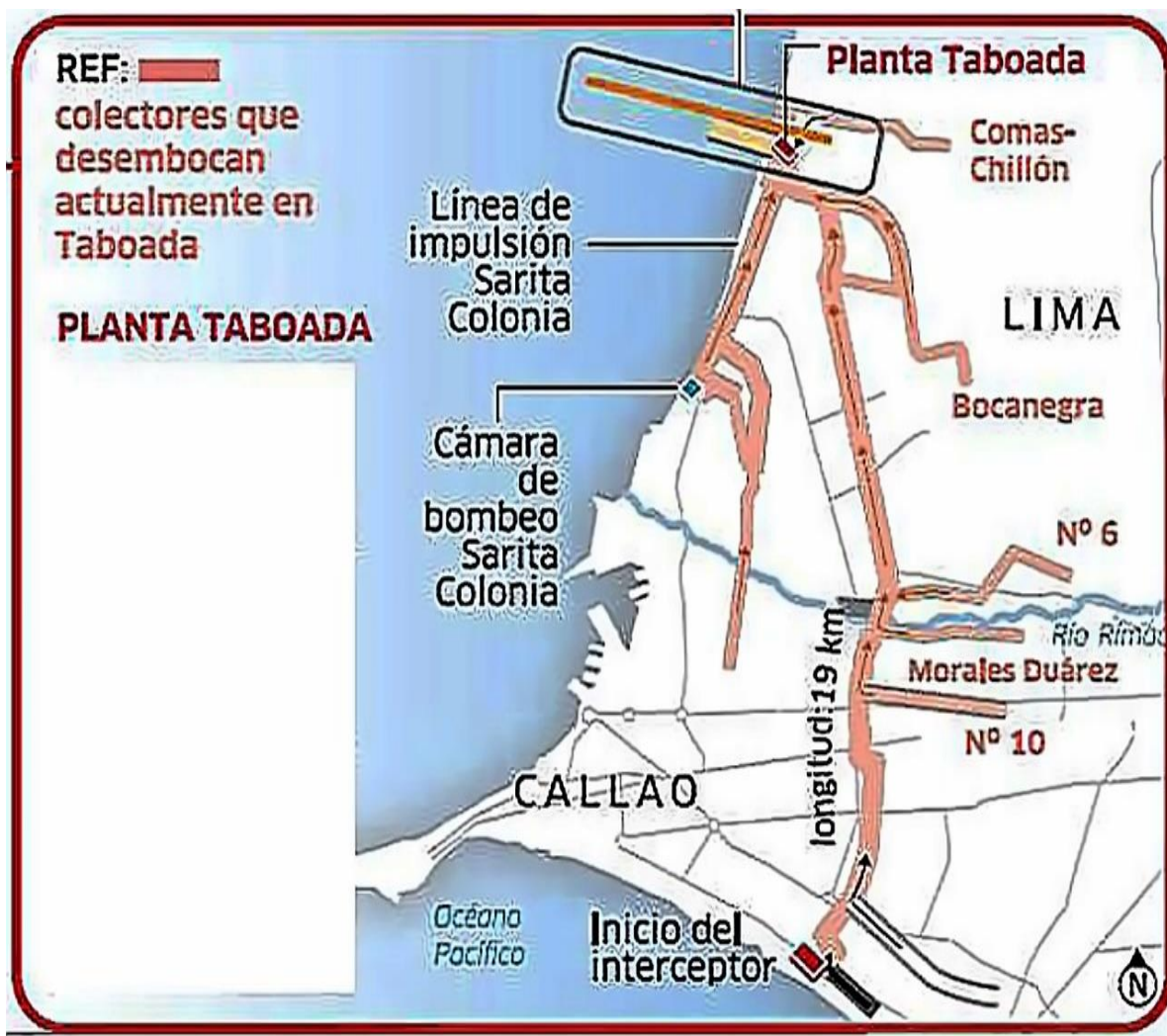


Figura 2. Colectores que desembocan actualmente en la PTAR Taboada (18).

La PTAR Taboada aborda el problema sanitario causado por el vertido sin tratar de aguas residuales al mar y al río Rímac, iniciando el proceso de limpieza del mar peruano. Antes de su puesta en funcionamiento, solo el 16% de las aguas residuales de Lima se trataban mediante plantas convencionales y lagunas de oxidación. Esta planta procesa las aguas residuales de 10,8 millones de habitantes de Lima y Callao, lo que representa el 56% de la población y el 72% de las aguas residuales de las dos ciudades (**ver Figura 3**), con un caudal promedio de 14 m³ por segundo y un máximo de 20.3 m³ por segundo, operando cerca de su capacidad máxima. Se considera PTAR más grande de Sudamérica y genera un efluente que cumple con los estándares de calidad establecidos por la Ley General de Aguas - Clase VI para áreas costeras (17).

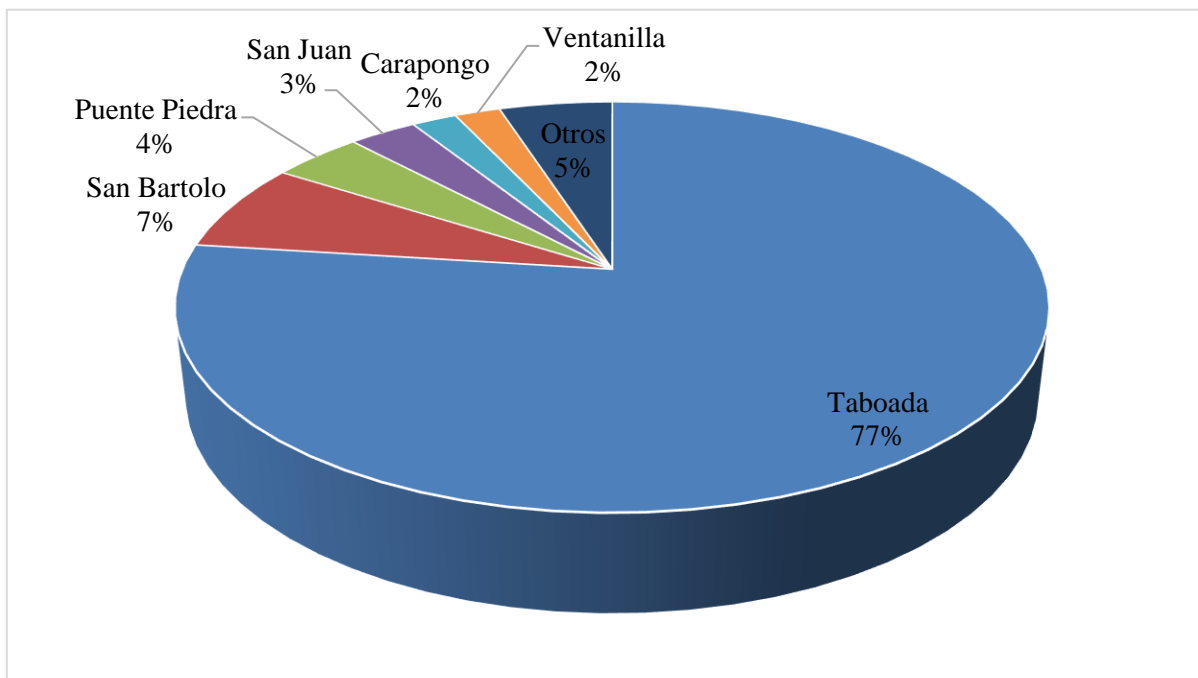


Figura 3. Caudal de tratamiento de aguas residuales en las PTAR para el periodo de diciembre de 2015 (1).

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Equipos, materiales y reactivos

Tabla 3 . Equipos

EQUIPOS	MARCA
Multiparametro	Thermoscientific Orion Versastar Pro
Termómetro químico	ISOLAB
Espectrofotómetro UV/Visible	Thermoscientific Orion AquaMate 8100
Incubadora	VELP Scientifica FOC 2001
Shaker Vertical	YONGLEKANG
Balanza analítica	Sartorius
GPS	Garmin
Multiparámetro	HACH HQ40d
Celular	Samsung
Turbidímetro	EZODO TUB-430
Plancha de calentamiento	Cimarec
Agitador magnético	Cimarec
Digestor Kjeldahl	Hanon SH420F
Destilador Kjeldahl	Hanon K9840
Digestor	HACH DRB 200
Electromanta	VENT SCIENTIFICA
Bomba de vacío	GAST
Estufa	Memmert
Refrigeradora	Ventus
Desionizador	Rovic
Centrifuga	ELMI
Termohigrómetro	Eurolab
Baño de agua	Memmert WTB50
Autoclave	BIOTERM
Microscopio	COLE PARMER
Baño termostático	BIOTERM
Horno de esterilización	Memmert

EQUIPOS	MARCA
Incubadora	Memmert
Vortex	HEATHROW SCIENTIFIC
Desecador	Superior Marienfeld

Tabla 4 . Materiales

MATERIALES	MARCA
Vasos de precipitado 100 mL	ISOLAB
Fiolas de 25 mL, 50 mL, 100 mL, 500 mL, 1000 mL	ISOLAB
Probeta de 50 mL	ISOLAB
Micropipeta de 5 mL	ISOLAB
Micropipeta de 1 mL	ISOLAB
Pipeta graduada de 5 mL, 10 mL, 20 mL	PYREX
Pipetas volumétricas de 5 mL, 10 mL, 20 mL, 25 mL	ISOLAB
Erlenmeyer de 125 mL	ISOLAB
Pinzas, para manipular el balón de evaporación	ISOLAB
Balón de destilación de 250 cm ³	ISOLAB
Embudos de vidrio	ISOLAB
Papel de filtro - Whatman N° 40	Whatman
Tubos de centrifuga de vidrio de 15mL	ISOLAB
Cabeza de destilación Claisen	ISOLAB
Adaptador de destilación	ISOLAB
Peras de decantación de vidrio, 2000 cm ³ con llave PTFE	ISOLAB
Varilla de agitación de vidrio	ISOLAB
Fiola de 100 cm ³	ISOLAB
Botellas de color ámbar de vidrio para colección de muestras	ONLELAB
Propipeta	ISOLAB
Papel filtro de microfibras de vidrio de borosilicato con diámetro de 4.7 cm.	SAMIEX
Pinzas	ISOLAB
Matraz de Kitasato de 1000 mL	ISOLAB

MATERIALES	MARCA
Placas Petri de vidrio de diámetro 4.7 cm	ISOLAB
Probeta de vidrio graduada de 500 mL	ISOLAB
Barra magnética agitadora	Brand
Piseta con agua destilada	Genérico
Botellas de 300 mL con un tapón de vidrio esmerilado.	Kimax
Frascos de vidrio: 250 mL y 500 mL	ISOLAB
Tubos de ensayo: 20 x 150 mm y 16 x 150 mm	Kimax
Pipetas: 10 mL, 1 mL y 5 mL estériles	ISOLAB
Tubos Durham 75 x 10 mm	Viresa
Asa bacteriológica de 3 a 3.5 mm de diámetro	Viresa
Tubos de ensayo con tapa con tapa rosca: 16 x 150 mm	Kimax
Placas Petri de 100 x 15 mm	Biologix
Papel Parafilm 4" x 250'	Bemis
Plumón indeleble punta fina	Faber Castell
Botellas de plástico de 1L, 500	
Guantes de nitrilo	TouchNtuff
Mascarillas tipo quirúrgicas	Kogy
Gelpack	Tipic
Cooler	Basa
Balde para toma de muestras.	Basa
Conos Imhoff	Vitlab

Tabla 5 . Reactivos

REACTIVOS	MARCA
Fenol sólido	J.T Baker
Alcohol etílico	Alkofarma
Nitroprusiato de sodio	Merck
Citrato de sodio	J.T Baker
Hidróxido de sodio	Macron
Hipoclorito de sodio comercial	Clorox
Cloruro de amonio	J.T Baker
Ácido sulfúrico	J.T Baker
Ácido clorhídrico	Fermont
Ácido fosfórico	J.T Baker
Persulfato de amonio	Merck
Molibdato de amonio	Merck
Tartrato de antimonio	Merck
Acido ascórbico	J.T Baker
Fosfato monopotásico	Merck
Celite 545	Merck
Potasio dihidrógeno fosfato	CDH
Fosfato dipotásico	Merck
Fosfato disódico pentahidratado	Merck
Sulfato de magnesio pentahidratado	Merck
Cloruro de calcio	Merck
Cloruro férrico	Sigma- Aldrich
Glucosa	Merck
Ácido glutámico	Merck
Dicromato de potasio	Supelco
Sulfato de mercurio	J.T Baker
Sulfato de plata	J.T Baker
Biftalato de potasio	Merck
n-Hexano	Scharlau
Acetona	J.T Baker

REACTIVOS	MARCA
Sulfato de sodio anhidro granular	J.T Baker
Hexadecano	Merck
Acido estearico	Merck
Caldo lauril triptosa	BD - DIFCO
Caldo EC	BD - DIFCO
Indicador de pupura de bromocresol	Scharlau
Triptosa	BD - DIFCO
Lactosa	BD - DIFCO
Cloruro de sodio	Merck
Peptona	HIMEDIA
Lauril sulfato de sodio	Merck
Reactivos de tinción Gram	Merck
Agar MacConkey	BD - DIFCO
Agar Nutricio	BD - DIFCO
Oxgall	Merck
Verde brillante	Merck
Rojo de metilo	Sigma Aldrich
Cristal violeta	Merck
Soluciones buffer de pH 4, 7 y 10	HANNA
Difenilcarbazida	Scharlau
Sulfato de cobre	Merck
Tiosulfato de sodio	J.T Baker
Sulfato de potasio	J.T Baker

7.2 Metodología y alcance de la investigación

7.2.1 Tipo de investigación

La investigación utiliza un enfoque cuantitativo, centrado en la evaluación detallada de la eficiencia de la PTAR Taboada mediante la recopilación y análisis de datos numéricos. Estos datos incluyen parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, ofreciendo una base sólida y objetiva para medir el rendimiento del sistema de tratamiento de aguas residuales. Esta metodología facilita una evaluación precisa y confiable de la eficacia de la planta, basada en evidencias cuantificables.

7.2.2 Nivel de investigación

El tipo de investigación se clasifica como descriptivo experimental, que implica combinar una descripción detallada de fenómenos o grupos con el análisis de relaciones causales a través de la manipulación de variables independientes. Este enfoque se destaca por su capacidad para proporcionar una comprensión más profunda y completa de los fenómenos estudiados. No obstante, es esencial tener en cuenta que llevar a cabo este tipo de investigación demanda un control meticuloso de las variables y un diseño experimental robusto para asegurar la validez y confiabilidad de los resultados.

7.2.3 Alcance

7.3 Ubicación Geográfica

La investigación se realizó en la PTAR Taboada, situada en el antiguo fundo Oquendo, en la Provincia Constitucional del Callao. Esta planta está ubicada a 1,5 km del Aeropuerto Internacional Jorge Chávez, en el distrito del Callao. La instalación está delimitada por el Óvalo 200 Millas, en la intersección de las avenidas Néstor Gambeta y Elmer Faucett.

7.4 Cálculo de la eficiencia de la PTAR Taboada

La remoción de contaminantes se mide por la variación porcentual de parámetros de control específicos que se pueden monitorear tanto en la entrada como en la salida de la planta, y se caracteriza principalmente por la cantidad de contaminante removido. Para calcular la cantidad de contaminante removido en los análisis fisicoquímicos y microbiológicos, se considera la relación entre la carga de entrada a la planta o a una de sus unidades y la carga correspondiente en el flujo de salida (19). Se empleó la siguiente ecuación para calcular la remoción de los contaminantes evaluados:

$$E\% = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100$$

E: Eficiencia de remoción del parámetro fisicoquímico o microbiológico

C: Concentración en el efluente (mg/L).

C₀: Concentración en el afluente (mg/L).

Se llevó a cabo el monitoreo de los efluentes de la PTAR para asegurar que se cumplieran los LMP establecidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

7.5 Muestreo

Las determinaciones analíticas se llevaron a cabo en las muestras, incluyeron mediciones in-situ, como temperatura, conductividad, sólidos sedimentables y pH utilizando un medidor multiparamétrico.

7.5.1 Ubicaciones para la toma de muestras

Para la recolección de muestras, tanto la no tratada (afluente) como la tratada (efluente), se llevó a cabo en dos ubicaciones específicas. En primer lugar, se tomaron muestras del afluente, situado antes de la reja de 25 mm, y posteriormente del efluente, localizado en la zona de descarga final.

Los lugares de toma de muestra fueron seleccionados cuidadosamente para asegurar la obtención de un flujo representativo y una mezcla homogénea en cada muestra. Además, se garantizaron el cumplimiento de los requisitos y características específicos establecidos. Es importante señalar que estos puntos fueron georreferenciados para un registro preciso de su ubicación, como se especifica en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Coordenadas WGS84 de los puntos de muestreo en la PTAR TABOADA

Muestras	Coordenadas WGS84	
	Norte	Este
Afluente	267744	8673067
Efluente	267746	8672906

Para evaluar el efecto de la descarga de aguas residuales en el cuerpo receptor, se realizó un seguimiento del agua marina en los puntos georreferenciados indicados en las **Tablas 7 y 8**.

Tabla 7. Ubicación de la estación de monitoreo de calidad de agua marina

N	Monitoreo	Código	Coordenadas UTM (WGS 84, Zona 18)		Categoría RJ N° 0291- 2009-ANA
			Este	Norte	
1	Calidad de agua marina	CA-01	264358	8673219	VI
2		CA-02	263681	8673740	VI
3		CA-03	263500	8674203	VI
4		CA-04	263160	8675138	VI
5		CA-05	263390	8673109	VI
6		CA-06	265243	8673492	VI
7		CA-07	264527	8673726	VI
8		CA-08	264648	8674173	VI
9		CA-09	262814	8676092	VI
10		CA-10	262801	8672841	VI

Fuente: EIAd proyecto “PTAR Taboada”

Tabla 8. Ubicación de la estación de monitoreo de calidad de agua marina costera

N	Monitoreo	Código	Coordenadas UTM (WGS 84, Zona 18)		Categoría RJ N° 0291- 2009-ANA
			Este	Norte	
1	Calidad de agua marina costera	E-09	266956	8671956	VI
2		E-10	265659	8668866	VI
3		E-11	266097	8670080	VI
4		E-13	267333	8677329	VI
5		E-14	266767	8679668	VI
6		E-16	267439	8675225	VI

Fuente: EIAd proyecto “PTAR Taboada”



Figura 4. Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad de agua de mar en la zona costera (en rojo) y zona marina (en verde)

7.5.2 Procedimiento para el monitoreo de aguas residuales

1. Preparación previa al muestreo:

- **Preparación de materiales:** Se prepararon frascos, envases de plástico y vidrio, etiquetas, preservantes, cooler, refrigerantes, equipos de protección personal (EPP), gotero.
- **Calibración de equipos de medición:** Los equipos fueron calibrados según los estándares establecidos por INACAL.
- **Verificación de EPP:** Se verificó la disponibilidad y buen estado de los EPP.

2. Proceso de muestreo en el campo:

a) Etiquetado:

- Se etiquetaron todos los frascos y envases antes del monitoreo.
- Se incluyó en la etiqueta: punto de muestreo, fecha, hora, y nombre del responsable del muestreo.

b) Registro del caudal:

- Se midió y registró el caudal usando el caudalímetro digital instalado en los puntos de monitoreo.

c) Toma de muestra:

- Se llenaron los envases con agua residual hasta el nivel requerido para cada método.
- Se llevó a cabo el muestreo en el afluente y el efluente.

d) Muestras especiales:

- Para coliformes termotolerantes, se usaron frascos de vidrio.
- Para aceites y grasas, se usaron botellas de vidrio de 1 L de color ámbar de boca ancha.

e) Preservación de muestras:

- Se aplicó aproximadamente 1 mL del preservante indicado en los procedimientos usando un gotero.
- Se colocaron las muestras en un cooler con refrigerantes para garantizar su preservación.

f) Desinfección y limpieza:

- Se desinfectaron y enjuagaron con agua destilada los materiales empleados en el muestreo.

3. Transporte y análisis:

- Se enviaron todas las muestras al laboratorio de Fisicoquímica y Microbiología para su análisis correspondiente.

7.5.3 Procedimiento para el monitoreo de agua de mar

1. Preparación previa al muestreo:

- **Preparación de materiales:** Se prepararon frascos, envases de plástico y vidrio, etiquetas, preservantes, cooler, refrigerantes, equipos de protección personal (EPP), gotero, y un multiparámetro marca HACH.
- **Calibración de equipos de medición:** Los equipos fueron calibrados según los estándares establecidos por INACAL.
- **Verificación de EPP:** Se verificó la disponibilidad y buen estado de los EPP.
- **Preparación de la embarcación:** Se aseguró que la embarcación estuviera equipada adecuadamente para el muestreo tanto en la zona costera como en la zona marítima.

2. Proceso de muestreo en el campo:

a) Etiquetado:

- Se etiquetaron todos los frascos y envases antes del monitoreo.
- Se incluyó en la etiqueta: punto de muestreo, fecha, hora, y nombre del responsable del muestreo.

b) Medición de parámetros de campo:

- **Parámetros medidos:**
 - Se midieron los siguientes parámetros de campo: temperatura del agua de mar, pH, conductividad, y oxígeno disuelto (OD) utilizando el multiparámetro marca HACH.
- **Registro de datos:**
 - Se anotaron todos los datos recolectados en un formulario de campo, especificando el lugar de muestreo, la fecha y la hora de la medición.

c) Toma de muestra:

Zona costera y zona marítima:

- Se realizó el muestreo en diferentes puntos estratégicos a lo largo de la zona costera y en la zona marítima utilizando una embarcación.
- Se usaron equipos adecuados para la toma de muestras en diferentes profundidades si fue necesario.

- Se llenaron los envases con agua de mar hasta el nivel requerido para cada método.

d) Muestras especiales:

- Para coliformes termotolerantes, se usaron frascos de vidrio.
- Para aceites y grasas, se usaron botellas de vidrio de 1 L de color ámbar de boca ancha.

e) Preservación de muestras:

- Se aplicó aproximadamente 1 mL del preservante indicado en los procedimientos usando un gotero.
- Se colocaron las muestras en un cooler con refrigerantes para garantizar su preservación.

3. Transporte y análisis:

- Se enviaron todas las muestras al laboratorio de Físicoquímica y Microbiología para su análisis correspondiente.
- Se enviaron todas las muestras correspondientes a los metales totales al laboratorio ALAB para su análisis correspondiente.

7.6 Determinaciones analíticas

Las muestras tomadas durante el monitoreo del afluente y efluente de la PTAR Taboada fueron analizadas en el laboratorio en términos físicos, químicos y microbiológicos, de acuerdo con los procedimientos, protocolos y estándares de calidad establecidos por el INACAL. Los análisis físicoquímicos y microbiológicos se realizaron siguiendo los criterios de muestreo y conservación especificados en el Standard Methods for Examination of Wastewater y la Environmental Protection Agency (EPA), según correspondiera (20–22). Los parámetros analizados incluyeron DQO, DBO₅, nitrógeno amoniacal, nitrógeno Kjeldahl, aceites y grasas, sólidos totales en suspensión, metales totales, pH, turbidez, temperatura, coliformes termotolerantes y coliformes totales. Los análisis de metales totales y cianuro libre fueron realizados por ALAB, un laboratorio externo acreditado, que utilizó métodos estandarizados para garantizar la precisión y fiabilidad de los resultados. En la **Tabla 9** se muestra la metodología empleada.

Tabla 9. Métodos adoptados en el análisis de los parámetros de calidad

Parámetro	Método	Metodología
Conductividad	Conductimétrica	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 2510 B
pH	Potenciométrico	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+B, 24th Ed. 2023.
Oxígeno disuelto	Potenciométrico	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 4500-O G, 24th Ed. 2023.
Temperatura	Termométrico	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2550 B, 24th Ed. 2023.
Demanda Química de oxígeno (DQO)	Reflujo cerrado – Colorimétrico	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5520 D, 24th Ed. 2023.
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	Electrométrico	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5510 B, 24th Ed. 2023.
Aceites y grasas	Gravimétrico	EPA 1664 Rev. B.2010
Sólidos suspendidos totales	Gravimétrico	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed. 2023.
Turbidez	Nefelométrico	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 2130 B, 24th Ed. 2023.
Nitrógeno amoniacal	Electrodo de Ion Selectivo	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 4500-NH3 B SMEWW-APHA-AWWA-WEF 4500-NH3 C
Nitrógeno Kjeldahl	Electrodo de Ion Selectivo	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500- N org C, 24th Ed. 2023.
Fósforo	Colorimétrico	EPA METHOD 365.3 1978
Coliformes Totales		SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 B, 24th Ed. 2023.
Coliformes Termotolerantes		SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part-9221 E-1, 24th Ed. 2023.
Metales Totales	ICP-MS	EPA Method 200.8, Revision 5.4, 1994. / EPA Method 200.8, Revision 5.4, 1994. VALIDATED (Applied out of reach), 2020.
Cianuro Libre	FIAS	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-CN- F, 23rd Ed. 2017 / ASTM D7237-15a (VALIDADO - modificado). 2018

7.6.1 Procedimientos para la determinación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

❖ Conductividad

Procedimiento:

1. Se calibró el conductímetro utilizando soluciones patrón de conductividad conocidas, específicamente las soluciones con conductividades de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 12.85 mS/cm , para asegurar una calibración precisa.
2. Se vertió la muestra directamente en la celda de medición.
3. Se midió la conductividad eléctrica expresada en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a una temperatura estándar de 25 °C.
4. Los valores se corrigieron, si fue necesario, según las condiciones de temperatura.

❖ pH

Procedimiento:

1. Se calibró el potenciómetro con soluciones tampón de pH 4.0, 7.0 y 10.0.
2. Se sumergió el electrodo de vidrio en la muestra previamente agitada.
3. Se registró el valor de pH una vez que el medidor se estabilizó.
4. Se enjuagó el electrodo entre mediciones para evitar contaminación cruzada.

❖ Oxígeno Disuelto (OD)

Procedimiento:

1. Se calibró el oxímetro utilizando soluciones estándar de oxígeno disuelto.
2. Se introdujo la sonda en la muestra sin formar burbujas y se esperó a que la lectura se estabilizara.
3. Se registró la concentración en mg/L , ajustada según la temperatura y presión atmosférica local.

❖ Temperatura

Procedimiento:

1. Se sumergió un termómetro digital en la muestra hasta alcanzar estabilidad en la lectura.
2. Se registró la temperatura en grados Celsius (°C).

❖ DQO

Procedimiento:

1. Se tomó una alícuota de 2.5 mL de la muestra previamente homogenizada.
2. Se añadieron 1.5 mL de reactivo digestor (dicromato de potasio en medio ácido).
3. Posteriormente, se agregaron 3.5 mL de reactivo catalizador (sulfato de plata en ácido sulfúrico).
4. La mezcla se homogenizó cuidadosamente para asegurar una distribución uniforme de los reactivos.
5. La muestra preparada se sometió a digestión térmica en un digestor HACH a una temperatura de 150°C durante 2 horas, siguiendo los parámetros establecidos por el método estándar.
6. Una vez completada la digestión, los tubos se dejaron enfriar a temperatura ambiente antes de proceder con la medición.
7. Los resultados se obtuvieron por lectura directa a 600 nm utilizando un espectrofotómetro, registrando la absorbancia correspondiente.

❖ DBO₅

Procedimiento:

1. Se transfirió una alícuota de la muestra a una fiola de 1 litro.
2. Se añadieron las soluciones de nutrientes requeridas, y la fiola se completó con agua desionizada hasta enrasar.
3. La mezcla se homogenizó, y una porción se transfirió a un Winkler de 300 mL para medir el oxígeno disuelto inicial (OD_i).
4. Se incubó a 20°C ± 1°C en oscuridad durante 5 días.
5. Tras la incubación, se midió el oxígeno disuelto final (OD_f).

❖ Aceites y Grasas

Procedimiento:

1. Se ajustó el pH de 1 litro de muestra a 2-3.
2. Se realizaron tres extracciones consecutivas con 30mL de hexano cada una.
3. La fase orgánica extraída se secó en un baño maría a 70 °C por 1 hora, y luego en el desecador por 45 minutos.
4. El peso final del residuo se utilizó para calcular la concentración en mg/L.

❖ SST

Procedimiento:

1. Se tomaron 20 mL de muestra y se filtraron a través de un filtro de fibra de vidrio previamente secado y pesado.
2. Después de filtrar la muestra, el filtro con los sólidos suspendidos se secó en una estufa a 103 °C durante 1 hora hasta alcanzar un peso constante.
3. El filtro se dejó enfriar en un desecador y luego se pesó nuevamente.
4. La concentración de sólidos suspendidos totales se calculó como la diferencia de peso entre el filtro con los sólidos y el filtro vacío, expresada en mg/L.
5. Los resultados se expresaron en mg/L.

❖ Turbidez

Procedimiento:

1. Se calibró el medidor de turbidez utilizando estándares de turbidez conocidos, siguiendo las instrucciones del fabricante.
2. Se vertió la muestra en el vaso de medición, asegurándose de que no tuviera burbujas o partículas visibles en su superficie.
3. Se midió la turbidez de la muestra utilizando un turbidímetro, el cual determina la cantidad de luz dispersada por las partículas presentes en la muestra.
4. Los resultados se expresaron en NTU.

❖ Nitrógeno Amoniacal

Procedimiento:

1. Se preparó una curva de calibración con estándares de amonio.
2. Se ajustó el pH de la muestra a 11 con hidróxido de sodio para liberar amoníaco gaseoso.
3. Se midió el potencial eléctrico con un electrodo de ion selectivo específico para amonio.
4. La concentración de nitrógeno amoniacal se calculó en base a la curva de calibración.

❖ **Nitrógeno Kjeldahl Total**

Procedimiento:

1. Se digirió la muestra a 385 ° C por 30 minutos en presencia de ácido sulfúrico y un catalizador para convertir el nitrógeno en amonio.
2. El nitrógeno amoniacal se destiló y capturó en una solución de ácido sulfúrico 0,04 M.
3. Se midió con el electrodo de ion selectivo para determinar su concentración total.

❖ **Fósforo Total**

Procedimiento:

1. Se tomaron 2 mL de la muestra de agua y se añadieron reactivos digestores, que incluyen persulfato de amonio y ácido sulfúrico, para disolver las partículas de fósforo presentes en la muestra.
2. Se calentó la mezcla en una plancha de calentamiento hasta que el volumen se redujo y el fósforo se convirtió en una forma soluble.
3. Luego, se añadió un reactivo de molibdato de amonio y antimonio, y ácido ascórbico a la muestra digestada para formar un complejo azul, cuyo color es directamente proporcional a la cantidad de fósforo presente.
4. La solución se dejó reposar y se midió la absorbancia del complejo formado a una longitud de onda de 650 nm utilizando un espectrofotómetro.
5. La concentración de fósforo total se determinó a partir de una curva de calibración preparada con soluciones estándar de fósforo.

❖ **Coliformes Totales**

Procedimiento:

1. **Preparación de la muestra:** Se tomaron 10 mL de la muestra para realizar las diluciones en tubos de ensayo estériles.
2. **Diluciones:** Se prepararon diluciones en serie de la muestra en tubos de ensayo con 90 mL de agua estéril. Las diluciones se hicieron en proporciones de 1:10, 1:100, 1:1000 y 1:10000.
3. **Inoculación:** De cada dilución, se inocularon 1 mL en un tubo de ensayo que contenía 9 mL de Lauryl Tryptose Broth (LTB), un medio de cultivo selectivo para coliformes totales.
4. **Incubación:** Los tubos inoculados se incubaron a 35°C durante 24-48 horas.

5. **Interpretación de los resultados:** Al término de la incubación, se evaluó la presencia de gas y turbidez en los tubos como indicativos preliminares de la existencia de coliformes. Los tubos positivos fueron subcultivados en medios más selectivos, como agar Eosina Azul de Metileno (EMB), para confirmar la presencia de coliformes y garantizar la precisión del análisis.
6. **Cálculo del NMP:** Se utilizó la tabla de NMP para calcular el Número Más Probable (NMP) de coliformes totales en la muestra, que se expresó como unidades formadoras de colonias (UFC) por cada 100 mL de muestra.

❖ **Coliformes Termotolerantes**

Procedimiento:

1. **Preparación de la muestra:** Se tomaron 10 mL de la muestra para realizar las diluciones, similares al procedimiento de coliformes totales.
2. **Diluciones:** Se realizaron diluciones en serie de la muestra en tubos de ensayo con 90 mL de agua estéril, en proporciones de 1:10, 1:100, 1:1000 y 1:10000.
3. **Inoculación:** De cada dilución, se inocularon 1 mL en un tubo de ensayo con 9 mL de Brilliant Green Lactose Bile Broth (BGLB), un medio selectivo para coliformes termotolerantes.
4. **Incubación:** Los tubos inoculados se incubaron a 44.5°C durante 24-48 horas.
5. **Interpretación de los resultados:** Tras la incubación, se examinó la formación de gas y turbidez en los tubos como indicadores de la presencia de coliformes termotolerantes. Los tubos positivos fueron subcultivados en un medio selectivo, como agar MacConkey, para validar su presencia de manera más precisa.
6. **Cálculo del NMP:** Se determinó el Número Más Probable (NMP) de coliformes termotolerantes, que se expresó como UFC por cada 100 mL de muestra, utilizando tablas estadísticas de NMP.

❖ Metales Totales

Procedimiento:

1. **Muestreo:** Se tomó una muestra representativa de agua residual o efluente, asegurándose de que fuera homogénea para evitar la presencia de partículas grandes o sedimentos que pudieran interferir con el análisis.
2. **Conservación de la muestra:** La muestra se conservó bajo condiciones adecuadas (en frío y con adición de conservantes como ácido nítrico) para evitar la alteración de los metales presentes antes de su envío.
3. **Envío a laboratorio:** La muestra fue enviada a un laboratorio externo certificado (ALAB), donde se realizó la determinación de metales totales utilizando la técnica de ICP-MS. Esta técnica permite la detección precisa de metales en concentraciones muy bajas.
4. **Resultados:** El laboratorio proporcionó los resultados en unidades de concentración de mg/L para cada metal.

❖ Cianuro Libre

Procedimiento:

1. **Muestreo:** Se extrajo una muestra representativa para la determinación de cianuro libre. Se utilizó un recipiente limpio y estéril para evitar la contaminación de la muestra.
2. **Conservación de la muestra:** La muestra fue conservada con hidróxido de sodio para mantener el cianuro en su forma libre y evitar cualquier alteración de la muestra. Se refrigeró hasta su envío al laboratorio.
3. **Envío al laboratorio:** La muestra fue enviada a un laboratorio externo especializado (ALAB) para el análisis de cianuro libre.
4. **Resultados:** Los resultados fueron entregados por el laboratorio en unidades de concentración de mg/L.

VIII. RESULTADOS

8.1 Monitoreo de la calidad ambiental del agua residual

8.1.1 Caudales

Entre febrero y abril de 2024, se realizaron análisis representativos a lo largo de 31 días para evaluar la eficiencia del tratamiento. Durante este periodo, se registraron los caudales tanto del afluente como del efluente. Los datos recopilados se presentan detalladamente en la **Tabla 10** y se visualizan gráficamente en la **Figura 5**.

Tabla 10. Caudales del afluente y efluente durante el periodo monitoreado

Día	Caudal	
	Afluente (L/s)	Efluente (L/s)
1	13 214,21	12 213,45
2	13 596,16	12 653,27
3	13 781,34	12 838,45
4	13 931,81	12 850,03
5	14 255,88	13 000,49
6	14 406,34	13 266,69
7	13 425,93	12 407,41
8	13 495,37	12 488,43
9	13 518,52	12 604,17
10	13 530,09	12 615,74
11	13 692,13	12 650,46
12	13 715,28	12 662,04
13	13 738,43	12 731,48
14	13 773,15	12 777,78
15	13 807,87	12 800,93
16	13 819,44	12 804,78
17	13 778,32	12 820,64
18	13 823,75	12 814,12
19	13 764,55	12 847,22
20	13 852,10	12 870,37
21	13 817,20	12 939,81
22	13 840,11	12 951,39
23	13 888,89	12 962,96
24	13 900,46	12 986,11
25	13 912,04	12 997,69
26	13 923,61	13 020,83
27	14 004,63	13 032,41
28	14 012,50	13 078,70
29	14 027,78	13 506,94
30	14 085,65	12 812,50
31	14 120,37	13 048,50
Suma (Σ)	428 648,72	391 562,50
Media (\bar{x})	13 827,38	12 845,99
Desviación estándar(σ)	241,62	259,41
Varianza (σ^2)	56 497,70	65 122,52

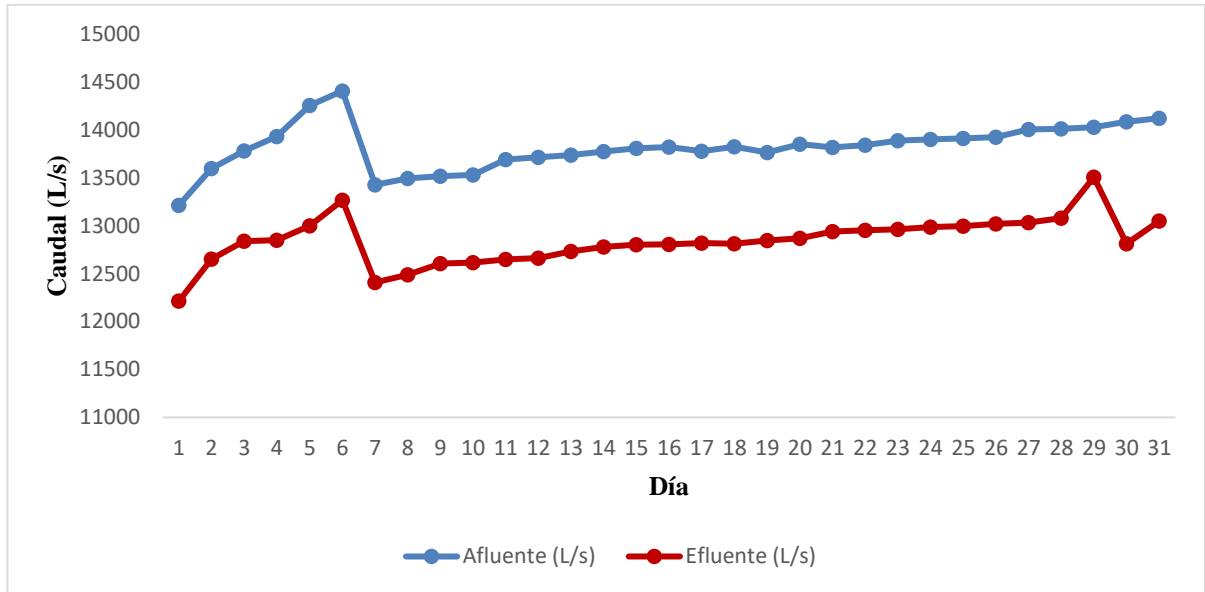


Figura 5. Caudales del afluente y efluente

8.1.2 Análisis fisicoquímico y microbiológico

Se llevó a cabo un análisis fisicoquímico y microbiológico tanto del afluente como del efluente, comparando los resultados con los estándares ambientales vigentes para el vertido de efluentes domésticos. Los hallazgos se sintetizan de manera concisa en las **Tablas 11 a 13**, proporcionando una visión detallada del progreso durante las semanas de monitoreo. Cabe destacar que, además de los parámetros fisicoquímicos requeridos por la normativa en relación con los LMP, se incluyeron variables adicionales para una evaluación más exhaustiva.

Tabla 11. Análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del afluente y del efluente (días 1 a 11)

Parámetros medidos	Unidad	Día																					
		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11	
Aceites y grasas	mg/L	41	25	32	24	36	26	39	32	46	36	29	18	46	34	32	26	37	25	59	49	26	21
DBO ₅	mg O ₂ /L	342,8	223,8	277,5	204,2	381,8	279,8	431,8	350,0	415,5	293,0	264,5	224,8	230,8	199,2	412,0	315,8	408,8	344,2	494,5	396,3	501,5	351,8
DBO ₅ Soluble	mg O ₂ /L	122,4	79,9	95,7	70,4	127,3	93,3	215,9	175,0	134,0	94,5	91,2	77,5	88,8	76,6	137,3	105,3	227,1	191,2	290,9	233,1	250,8	175,9
DQO	mg O ₂ /L	698,4	623,4	538,6	391,8	633,7	538,6	1012,0	649,5	907,6	698,4	551,6	479,9	597,3	528,8	863,9	687,9	914,3	681,3	1014,9	674,8	1008,3	605,9
DQO Soluble	mg O ₂ /L	303,7	271,0	215,4	156,7	226,3	192,4	506,0	324,8	259,3	199,5	172,4	150,0	213,3	188,9	254,1	202,3	247,1	184,1	290,0	192,8	347,7	208,9
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	290	240	235	195	340	225	325	240	550	313	375	228	425	330	328	255	425	290	430	305	293	230
Turbidez	UNT	260	209	253	185	304	235	127	125	295	290	396	356	403	345	426	371	354	329	398	358	195,2	154,6
Fósforo total	mg P/L	8,8	7,5	6,9	6,1	7,6	6,1	8,2	6,3	10,0	7,5	7,0	5,9	9,4	7,7	7,7	5,6	8,5	6,6	8,6	6,6	5,2	4,6
Nitrógeno amoniacal	mg N/L	54,3	43,7	49,0	43,1	55,7	43,9	56,4	46,6	70,8	58,0	62,1	53,4	64,7	54,5	56,8	48,7	65,3	51,7	52,3	45,3	51,5	41,5

Parámetros medidos	Unidad	Día																					
		Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11											
Nitrógeno Kjeldahl total	mg N/L	86,5	76,7	80,3	70,5	99,7	88,0	93,8	85,4	107,7	87,3	84,3	68,3	90,9	81,4	78,9	66,5	100,0	86,9	91,6	81,8	92,0	83,6
Coliformes Totales (35-37 °C)	NMP/100mL	4.6E+7	3.3E+7	4.9E+7	3.3E+7	7.9E+7	4.9E+7	1.1E+8	7.9E+7	4.9E+7	3.3E+7	2.2E+7	1.7E+7	1.7E+8	1.1E+8	7.E+7	4.9E+7	1.3E+8	7.9E+7	7.9E+7	4.9E+7	1.1E+7	7.9E+6
Coliformes Termotolerantes (44,5 °C)	NMP/100mL	2.6E+7	1.7E+7	4.9E+7	3.3E+7	3.3E+7	2.3E+7	7.9E+7	4.9E+7	4.6E+6	3.3E+6	1.7E+7	1.1E+7	4.6E+6	3.3E+6	7.E+6	4.9E+6	4.9E+7	3.3E+7	2.2E+7	1.7E+7	7.9E+6	4.9E+6
pH	Unidad de pH	7,61	7,43	7,11	6,87	7,17	6,76	7,42	7,37	7,73	7,68	8,01	7,57	7,22	7,1	7,51	7,61	6,92	6,89	7	6,97	7,3	7,11
Temperatura	° C	21,3	21,2	22,2	22,1	22,4	22,3	22,5	22,5	22,3	22,2	22,1	22	22,4	22,3	22	22,2	21,3	21,2	21,3	21,2	21,2	21
Solidos sedimentables	mg/L	8	3	5	4,5	6	5	2	1,5	5,5	5	6	3,5	4,5	4	6,5	5	5	4	5	4,5	4	2
Conductividad eléctrica (C.E)	µS/cm	2010	1769	1941	1829	1822	1778	2100	2042	1920	1862	1619	1592	1692	1647	2012	1847	1755	1644	1795	1762	1633	1619
Oxígeno disuelto (OD)	mg/L	0,17	0,14	2,58	0,77	1,37	1,13	0,59	0,14	0,03	0,02	0,1	0,06	0,12	0,04	0,08	0,07	0,12	0,09	0,31	0,05	0,13	0,1

Tabla 12. Análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del afluente y del efluente (días 12 a 22)

Parámetros medidos	Unidad	Día																					
		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
		12		13		14		15		16		17		18		19		20		21		22	
Aceites y grasas	mg/L	37	25	59	49	26	21	32	25	37	26	29	22	36	28	43	30	70	54	60	40	40	31
DBO ₅	mg O ₂ /L	408,8	344,2	494,5	396,3	501,5	351,8	302,2	250,5	412,0	315,8	324,3	263,2	352,2	287,3	241,7	195,2	358,7	259,2	361,0	255,0	367,5	257,5
DBO ₅ Soluble	mg O ₂ /L	104,2	86,4	147,1	112,8	124,7	101,2	146,8	119,7	120,9	97,6	102,5	74,1	128,9	91,1	183,8	128,8	144,7	91,2	150,9	109,5	163,9	129,3
DQO	mg O ₂ /L	619,0	432,0	955,8	645,3	713,0	546,8	968,9	500,9	537,0	481,2	733,9	563,2	963,6	559,9	655,1	484,5	642,0	425,4	747,0	615,7	802,8	579,6
DQO Soluble	mg O ₂ /L	187,6	130,9	434,5	293,3	264,1	202,5	312,5	161,6	233,5	209,2	229,3	176,0	344,1	200,0	344,8	255,0	188,0	125,1	276,7	228,0	267,6	193,2
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	425	290	430	305	293	230	305	243	360	285	285	190	400	275	420	290	455	325	478	255	355	293
Turbidez	UNT	104,2	57,9	218	157,1	258	223	167	136,3	225	193,4	350	305	267	261	273	156,6	307	241	314	299	287	210
Fósforo total	mg P/L	8,5	6,6	8,6	6,6	5,2	4,6	8,2	6,5	8,6	7,5	5,4	4,7	8,5	6,3	9,9	8,4	9,0	7,0	10,5	8,5	6,1	4,8
Nitrógeno amoniacal	mg N/L	65,3	51,7	52,3	45,3	51,5	41,5	54,3	47,5	56,1	43,7	44,9	36,6	50,9	39,8	57,4	50,0	71,4	55,7	73,6	53,2	55,5	46,6

Parámetros medidos	Unidad	Día																					
		Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente
		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22											
Nitrógeno Kjeldahl total	mg N/L	100,0	86,9	91,6	81,8	92,0	83,6	85,8	77,4	85,8	74,9	86,9	77,8	87,6	75,6	89,1	77,8	102,6	88,4	105,1	87,3	87,6	79,6
Coliformes Totales (35-37 °C)	NMP/100mL	1.3E+8	7.9E+7	7.9E+7	4.9E+7	1.1E+7	7.9E+6	7.E+7	4.9E+7	4.9E+7	3.3E+7	4.9E+7	3.3E+7	7.E+7	4.9E+7	2.2E+8	1.7E+8	7.9E+7	4.9E+7	7.9E+7	4.9E+7	1.3E+8	9.4E+7
Coliformes Termotolerantes (44,5 °C)	NMP/100mL	4.9E+7	3.3E+7	2.2E+7	1.7E+7	7.9E+6	4.9E+6	3.3E+7	2.2E+7	4.6E+6	3.3E+6	3.3E+7	2.3E+7	7.E+6	4.9E+6	4.9E+6	3.3E+6	3.1E+7	2.3E+7	7.9E+6	4.9E+6	2.3E+7	1.7E+7
pH	Unidad de pH	7,09	7,04	7,54	7,34	7,7	7,5	6,94	6,86	7,05	7,02	7,04	6,96	7,55	7,42	6,92	6,73	7,43	7,34	7,6	7,29	7,48	7,33
Temperatura	° C	20,9	20,5	20,5	20,4	20,4	20,4	22,4	22,4	22,6	22,5	22,7	22,5	22,5	22,4	23,2	22,9	22,9	22,7	22,3	22,2	21,9	21,7
Solidos sedimentables	mg/L	4	3,5	6	4,5	4,5	4	4	3,5	5	4,5	5,5	4	4	3,5	4	2,5	7	6	4,5	4	6,5	2,5
Conductividad eléctrica (C.E)	µS/cm	1924	1878	2280	2270	2540	2122	2060	2046	1982	1965	2041	2035	2190	1583	1942	1920	2500	2104	2370	1936	2138	1772
Oxígeno disuelto (OD)	mg/L	0,2	0,18	0,08	0,02	0,25	0,07	0,17	0,14	0,03	0,02	0,02	0,01	0,42	0,2	0,08	0,07	0,14	0,1	2	0,64	0,3	0,17

Tabla 13. Análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del afluente y del efluente (día 23 a 31)

Parámetros medidos	Unidad	Día																		Media (\bar{x})	
		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
		23		24		25		26		27		28		29		30		31			
Aceites y grasas	mg/L	23	19	45	36	18	13	22	17	60	47	23	20	26	20	21	18	33	27	37,1	28,0
DBO ₅	mg O ₂ /L	348,8	265,2	412,5	318,3	393,2	309,5	391,7	282,2	376,0	299,8	358,2	305,0	350,0	257,0	338,8	258,3	350,8	248,5	366,1	278,6
DBO ₅ Soluble	mg O ₂ /L	145,3	110,5	229,2	176,8	171,0	134,6	163,9	117,6	144,6	115,3	143,3	122,0	145,8	107,1	135,5	103,3	116,9	82,8	151,4	115,6
DQO	mg O ₂ /L	655,1	523,8	773,2	622,3	786,4	441,8	786,4	559,9	632,1	428,7	907,8	681,3	903,3	546,8	760,1	553,4	694,5	573,1	773,5	558,9
DQO Soluble	mg O ₂ /L	297,8	238,1	368,2	296,3	413,9	235,5	327,7	233,3	243,1	164,9	378,3	283,9	392,7	237,7	281,5	205,0	248,0	204,7	292,6	211,1
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	310	230	345	285	285	235	370	270	433	320	245	168	330	235	385	305	353	290	359,9	263,1
Turbidez	UNT	302	188,9	272	86,1	212	161,6	198,5	164,4	421	354	437	392	372	276	113,9	112	383	357	286,9	235,2
Fósforo total	mg P/L	7,0	5,6	8,6	7,1	5,0	4,3	8,7	6,9	9,1	7,3	5,8	5,1	5,0	4,0	8,1	7,0	9,3	8,1	7,8	6,4

Parámetros medidos	Unidad	Día																		Media (\bar{x})	
		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
		23		24		25		26		27		28		29		30		31		Afluente	Efluente
Nitrógeno amoniacal	mg N/L	54,5	43,9	67,8	53,3	53,5	47,0	54,1	44,7	61,0	53,5	58,0	49,0	54,7	46,2	57,2	45,5	60,4	51,7	57,6	47,4
Nitrógeno Kjeldahl total	mg N/L	85,1	76,3	102,9	90,5	88,7	78,1	78,9	68,3	93,5	84,0	88,0	74,9	96,4	80,7	88,7	73,4	99,3	80,7	90,8	78,9
Coliformes Totales (35-37 °C)	NMP/100mL	4.9E+7	3.3E+7	1.7E+8	1.1E+8	7.9E+7	4.9E+7	3.3E+7	2.3E+7	3.3E+7	2.3E+7	1.4E+8	1.1E+8	7.9E+7	4.9E+7	1.3E+8	7.E+7	4.9E+7	3.3E+7	8,6E+7	75,8E+7
Coliformes Termotolerantes (44,5 °C)	NMP/100mL	3.3E+6	2.3E+6	1.4E+7	9.4E+6	1.1E+7	7.9E+6	4.6E+6	3.3E+6	1.7E+7	1.3E+7	2.3E+7	1.4E+7	4.9E+6	3.3E+6	3.3E+7	2.2E+7	7.9E+6	4.9E+6	2,0E+7	1,4E+7
pH	Unidad de pH	6,92	6,87	7,12	6,89	7,48	7,15	7,18	6,96	7,25	7,18	6,76	6,6	6,8	6,72	7,29	7,06	7,13	7,11	7,3	7,1
Temperatura	° C	23,1	22,9	22,8	22,7	22,7	22,2	22,6	22,5	23	22,9	22,7	22,6	22,9	22,7	23,1	23	22,6	22,5	22,2	22,1
Solidos sedimentables	mg/L	4	2	7	3,5	6	1,5	1	0,5	6,5	6	3,5	2,5	7	4,5	5	3,5	4	2,5	5	3,6
Conductividad eléctrica (C.E)	μS/cm	1769	1708	1839	1712	1535	1531	1783	1664	1862	1858	1810	1801	2048	1848	2200	2003	1862	1859	1966,9	1838,9
Oxígeno disuelto (OD)	mg/L	0,47	0,39	0,17	0,04	0,12	0,09	0,1	0,06	0,08	0,06	0,07	0,04	0,16	0,07	0,35	0,22	0,04	0,03	0,35	0,17

8.1.3 Fracciones de la DQO Total y la biodegradabilidad

La **Tabla 14** muestra la relación de la DBO₅/DQO, cuyo objetivo es evaluar la biodegradabilidad del agua residual. Para este análisis, se tomaron en cuenta los valores de DBO₅ soluble y DQO soluble, y se estableció la relación entre estos parámetros.

Tabla 14. Relación DBO₅ y DQO, DBO₅ soluble y DQO soluble

Día	Relación			
	DBO ₅ /DQO	DBO ₅ soluble/ DQO soluble	DBO ₅ /DBO ₅ soluble	DQO/DQO soluble
1	0,5	0,6	2,8	2,3
2	0,4	0,4	2,9	2,5
3	0,4	0,6	3,0	2,8
4	0,5	0,5	2,0	2,0
5	0,5	0,7	3,1	3,5
6	0,5	0,7	2,9	3,2
7	0,5	0,6	2,6	2,8
8	0,4	0,7	3,0	3,4
9	0,4	0,8	1,8	3,7
10	0,4	0,8	1,7	3,5
11	0,5	0,8	2,0	2,9
12	0,5	0,6	2,9	3,3
13	0,4	0,5	2,8	2,2
14	0,6	0,6	2,6	2,7
15	0,5	0,7	2,4	3,1
16	0,5	0,7	2,0	2,3
17	0,6	0,8	3,5	3,2
18	0,5	0,6	2,8	2,8
19	0,4	0,7	2,0	1,9
20	0,3	0,7	2,5	3,4
21	0,4	0,5	2,5	2,7
22	0,4	0,6	2,5	3,0
23	0,6	0,8	2,4	2,2
24	0,6	1,3	1,8	2,1
25	0,6	0,6	2,3	1,9
26	0,3	0,5	2,4	2,4
27	0,5	0,5	2,6	2,6
28	0,6	0,5	2,5	2,4
29	0,4	0,5	2,4	2,3
30	0,6	0,6	2,5	2,7
31	0,6	0,6	3,0	2,8
Media (\bar{x})	0,5	0,7	2,5	2,7

En la **Figura 6** se muestra las contribuciones de las fracciones de la DQO. Para hallar cada componente se utilizó las fórmulas descritas en la sección 6.1. Los cálculos se realizaron tomando en cuenta el DQO total, de todo el periodo de monitoreo. La **Figura 7** muestra la proporción de compuestos orgánicos biodegradables (COD_S) y no biodegradables (COD_I).

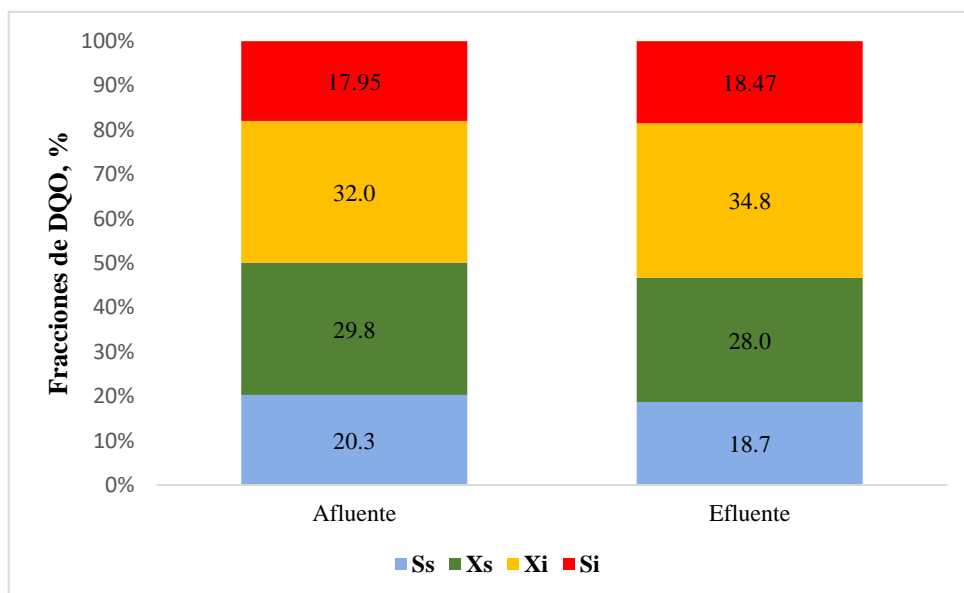


Figura 6. Contribuciones de las fracciones individuales en la DQO Total

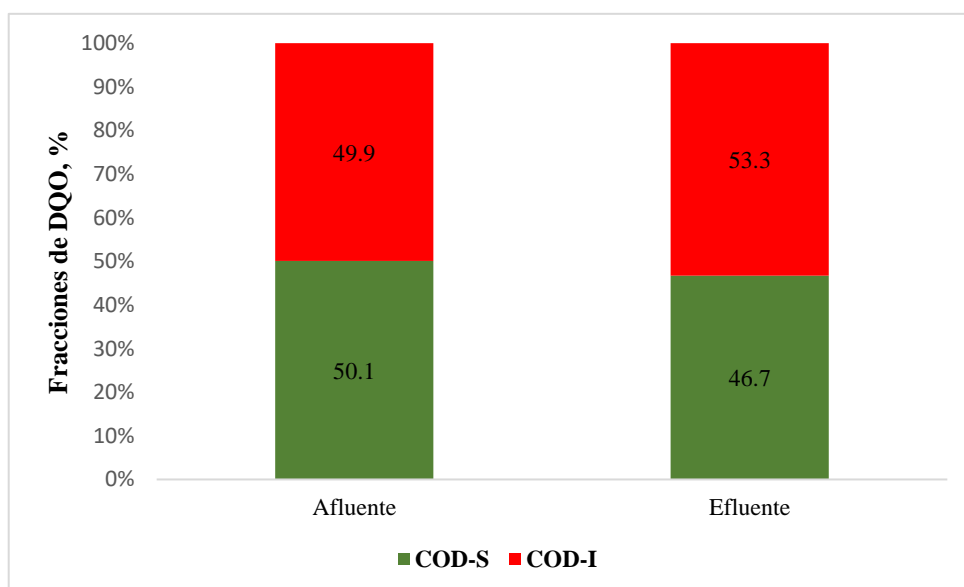


Figura 7. Proporción de compuestos orgánicos biodegradables (COD_S) y no biodegradables (COD_I) en la DQO Total.

8.2 Comparación entre los LMP y parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

La **Tabla 15** presenta una comparación detallada del efluente con los LMP a lo largo de las semanas de monitoreo. Además, se indica si los valores obtenidos cumplen o no con los estándares nacionales establecidos.

Tabla 15. Cumplimiento de los LMP para efluentes de la PTAR Taboada

Parámetro	Unidad	LMP	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Media (\bar{x})	Cumplimiento
Aceites y grasas	mg/L	20	28	28	35	23	28,0	NC
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	10000	2E+7	1,5E+7	1,3E+7	8,5E+6	1,4E+7	NC
DBO ₅	mg/L	100	253,5	319,7	250,8	286,7	278,6	NC
DQO	mg/L	200	558,6	610,6	518,7	551,1	558,9	NC
pH	Unidad de pH	6,5-8,5	7,3	7,1	7,1	7,0	7,1	C
SST	mg/L	150	253,0	257,0	293,0	254,0	263,1	NC
Temperatura	°C	< 35	22,1	21,2	22,5	22,6	22,1	C

*C: Cumple; NC: No cumple

8.3 Análisis de metales totales

La **Tabla 16** presenta el análisis de metales totales utilizando la técnica ICP-Masas. Este análisis se realizó una vez durante el período de monitoreo. Los resultados fueron proporcionados por ALAB, un laboratorio externo acreditado. Para obtener una visión más completa de la tendencia de estos metales, se compararon los resultados con datos de los tres meses anteriores, permitiendo así evaluar su evolución a lo largo del tiempo.

Tabla 16. Caracterización de metales totales del afluente y efluente

Ensayo	Unidad	Mes								Media (\bar{x})	
		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
		06/12/2023		03/01/2024		07/02/2024		06/03/2024			
Cianuro Total	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	-
Metales Totales ICP-MS											
Aluminio	mg/L	0,669	0,533	0,990	0,936	1,363	0,941	0,935	0,863	0,99	0,82
Antimonio	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	-	-
Arsénico	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	-
Bario	mg/L	0,081	0,063	0,112	0,092	0,083	0,073	0,056	0,052	0,08	0,07
Berilio	mg/L	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	-	-
Bismuto	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-	-
Boro	mg/L	0,352	0,302	0,388	0,361	0,393	0,354	0,214	0,164	0,34	0,30
Cadmio	mg/L	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	-	-
Calcio	mg/L	115,576	84,926	144,902	131,462	140,634	123,148	84,482	77,750	121,40	104,32
Cerio	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-	-
Cobalto	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	-	-
Cobre	mg/L	0,058	0,041	0,1003	0,083	0,075	0,056	0,055	0,052	0,07	0,06
Cromo	mg/L	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	-	-
Estaño	mg/L	<0,001	0,144770	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	-

Ensayo	Unidad	Mes								Media (\bar{x})	
		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
		06/12/2023		03/01/2024		07/02/2024		06/03/2024			
Estroncio	mg/L	1,020	0,757	1,395	1,231	1,300	1,117	0,670	0,611	1,10	0,93
Fosforo	mg/L	6,929	5,090	11,473	10,022	12,879	11,705	11,653	11,051	10,73	9,47
Hierro	mg/L	1,187	0,687	0,832	0,702	1,182	0,714	1,163	0,884	1,09	0,75
Litio	mg/L	0,080	0,053	0,173	0,156	0,191	0,177	0,073	0,055	0,13	0,11
Magnesio	mg/L	13,060	10,847	18,571	16,204	16,659	15,320	14,473	10,295	15,69	13,17
Manganeso	mg/L	0,094	0,051	0,127	0,097	0,096	0,075	0,079	0,055	0,10	0,07
Mercurio	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	-	-
Molibdeno	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	-
Níquel	mg/L	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	-	-
Plata	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	-
Plomo	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	-
Potasio	mg/L	24,859	17,353	31,620	30,061	34,319	31,158	27,911	27,318	29,7	26,8
Selenio	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	-	-
Silicio	mg/L	10,729	7,316	12,893	11,693	22,336	20,792	8,941	8,754	13,72	12,14
Sodio	mg/L	151,492	139,397	160,688	132,650	141,779	118,000	156,999	110,793	152,74	125,21
Sílice	mg/L	22,990	15,677	27,628	25,056	47,863	46,697	19,160	18,759	29,41	26,55
Talio	mg/L	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	-	-

Ensayo	Unidad	Mes								Media (\bar{x})	
		Afluente	Effluente	Afluente	Effluente	Afluente	Effluente	Afluente	Effluente	Afluente	Effluente
		06/12/2023		03/01/2024		07/02/2024		06/03/2024			
Titanio	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	-
Torio	mg/L	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	-	-
Uranio	mg/L	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	-	-
Vanadio	mg/L	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	-	-
Zinc	mg/L	0,269	0,144	0,425	0,388	0,385	0,257	0,276	0,262	0,34	0,26

8.4 Remoción de contaminantes

8.4.1 Remoción de contaminantes fisicoquímicos

La **Tabla 17** muestra el porcentaje de remoción de los contaminantes fisicoquímicos, evidenciando la eficacia del proceso de remoción. Este porcentaje se calculó utilizando la fórmula especificada en el capítulo 7.3, lo que permite una evaluación precisa y detallada.

Tabla 17. Porcentajes de remoción de contaminantes fisicoquímicos

Día	Aceites y grasas	DBO ₅	DQO	SST	Fósforo total	Nitrógeno amoniacal	Nitrógeno Kjeldahl total	Coliformes Totales	Coliformes Termotolerantes
1	39,6	34,7	10,7	17,2	14,8	19,5	11,3	28,3	34,6
2	26,4	26,4	27,3	17,0	11,6	12,0	12,2	32,7	32,7
3	26,1	26,7	15,0	33,8	19,7	21,2	11,7	38,0	30,3
4	17,7	18,9	35,8	26,2	23,2	17,4	9,0	28,2	38,0
5	20,6	29,5	23,0	43,2	25,0	18,1	18,9	32,7	28,3
6	36,8	15,0	13,0	39,3	15,7	14,0	19,0	22,7	35,3
7	27,5	13,7	11,5	22,4	18,1	15,8	10,5	35,3	28,3
8	17,2	23,3	20,4	22,1	27,3	14,3	15,7	30,0	30,0
9	34,0	15,8	25,5	31,8	22,4	20,8	13,1	39,2	32,7
10	17,1	19,9	33,5	29,1	23,3	13,4	10,7	38,0	22,7
11	17,1	29,9	39,9	21,5	11,5	19,4	9,1	28,2	38,0
12	21,4	17,1	30,2	20,3	20,7	12,5	9,8	30,0	33,3
13	27,9	23,3	32,5	20,8	12,8	22,1	12,7	32,7	28,3
14	26,9	18,8	23,3	33,3	13,0	18,5	10,5	32,7	30,3
15	22,0	18,4	48,3	31,3	25,9	21,8	13,7	30,0	30,0
16	29,4	19,2	10,4	31,0	15,2	12,9	12,7	22,7	32,7
17	23,1	27,7	23,3	28,6	22,2	22,0	13,8	38,0	25,8
18	33,2	29,4	41,9	46,6	19,0	27,7	16,9	38,0	38,0
19	22,5	29,9	26,0	17,6	21,3	16,0	9,1	27,7	26,1
20	28,7	37,0	33,7	16,3	14,1	20,9	14,0	29,2	32,7
21	27,8	27,4	17,6	27,9	25,0	16,3	12,5	38,0	32,7
22	31,4	21,1	27,8	20,0	15,4	21,8	14,2	33,3	30,0
23	16,0	24,0	20,0	25,8	20,0	19,4	10,3	32,7	30,3
24	18,2	22,8	19,5	17,4	17,4	21,4	12,1	35,3	32,9
25	26,7	21,3	43,8	17,5	14,0	12,1	12,0	38,0	28,2
26	24,3	28,0	28,8	27,0	20,7	17,4	13,4	30,3	28,3
27	22,6	20,3	32,2	26,0	19,8	12,3	10,2	30,3	23,5
28	13,2	14,9	25,0	31,6	12,1	15,5	14,9	21,4	39,1
29	22,7	26,6	39,5	28,8	20,0	15,5	16,3	38,0	32,7
30	15,0	23,8	27,2	20,8	13,6	20,5	17,2	46,2	33,3
31	18,4	29,2	17,5	17,7	12,9	14,4	18,7	32,7	38,0
Media (\bar{x})	24,2	23,7	26,6	26,1	18,3	17,6	13,1	32,6	31,5
Desviación estándar(σ)	6,6	5,9	10,0	7,9	4,7	3,9	2,9	5,4	4,2
Varianza (σ^2)	41,8	33,4	97,2	60,1	21,1	14,5	8,4	28,7	17,2
Máximo	48,3	37,0	46,6	39,6	27,3	27,7	19,0	39,1	46,2
Mínimo	10,4	13,7	16,3	13,2	11,5	12,0	9,0	22,7	21,4

8.4.1.1 Análisis estadístico

Se realizó el análisis estadístico de los datos, aplicando la prueba de Grubbs para la detección de valores atípicos y la prueba de normalidad para evaluar la distribución de los datos.

- **Prueba de valores atípicos**

1. **Método**

- ❖ **Hipótesis nula (H_0):** Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal.
- ❖ **Hipótesis alterna (H_1):** El valor más pequeño o grande de los datos es un valor atípico.

2. **Nivel de significancia:** $\alpha = 0,05$

3. **Método estadístico aplicado:**

Prueba de Grubbs

Tabla 18. Resultados de la prueba de Grubbs para detección de datos atípicos

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	Estadístico G	Valor p	Conclusión
DQO	31	26,58	10,02	10,39	48,30	2,17	0,771	No atípicos
DBO ₅	31	23,68	5,88	13,69	36,98	2,26	0,578	No atípicos
SST	31	26,13	7,88	16,29	46,60	2,60	0,187	No atípicos
Aceites y grasas	31	24,23	6,57	13,25	39,56	2,33	0,464	No atípicos
Fósforo total	31	18,308	4,666	11,538	27,273	1,92	1,000	No atípicos
Nitrógeno amoniacal	31	17,644	3,871	12,041	27,717	2,60	0,184	No atípicos
Nitrógeno Kjeldahl total	31	13,107	2,945	8,955	18,980	1,99	1,000	No atípicos
Coliformes Termotolerantes	31	31,505	4,214	22,727	39,130	2,08	0,982	No atípicos
Coliformes Totales	31	32,583	5,443	21,429	46,154	2,49	0,272	No atípicos

Nota: La prueba de Grubbs evalúa la presencia de valores atípicos en las distribuciones analizadas. Un valor p mayor a 0,05 indica que no se detectaron datos atípicos en el parámetro correspondiente.

Conclusión:

Los resultados obtenidos muestran que, aunque algunas variables presentan asimetrías positivas leves hacia valores altos, los valores de p son mayores a 0,05 en todos los casos. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula (H_0), concluyendo que no se identificaron datos atípicos significativos en las variables analizadas.

• Prueba de normalidad

1. Método

Hipótesis nula (H_0): Los datos siguen una distribución normal.

Hipótesis alterna (H_1): Los datos no siguen una distribución normal.

2. Nivel de significancia: $\alpha = 0,05$

3. Método estadístico aplicado:

Prueba de Anderson Darling

Tabla 19. Resultados de la prueba de normalidad de Anderson-Darling

Variable	N	Media	Desv.Est.	AD	Valor p
DQO	31	26,58	10,02	0,168	0,929
DBO5	31	23,68	5,88	0,291	0,587
SST	31	26,13	7,88	0,675	0,070
Aceites y grasas	31	24,23	6,57	0,296	0,572
Fósforo total	31	18,308	4,666	0,543	0,150
Nitrógeno amoniacal	31	17,644	3,871	0,497	0,197
Nitrógeno Kjeldahl total	31	13,107	2,945	0,526	0,166
Coliformes Termotolerantes	31	31,505	4,214	0,475	0,224
Coliformes Totales	31	32,583	5,443	0,575	0,124

Nota: AD corresponde al estadístico de Anderson-Darling y el valor p indica el nivel de significancia para la prueba de normalidad.

Conclusión:

Los resultados de la prueba de normalidad de Anderson-Darling para las variables analizadas indican que no se rechaza la hipótesis nula (H_0) en ninguno de los casos, ya que todos los valores de P son superiores al nivel de significancia de 0,05. Esto sugiere que las distribuciones de las variables evaluadas son consistentes con una distribución normal. En consecuencia, se puede concluir que no existen desviaciones significativas de la normalidad en los datos.

Las **Figuras 8 a 16** presentan gráficamente el porcentaje de remoción diario de los parámetros evaluados durante el período de monitoreo, permitiendo analizar su evolución de manera detallada.

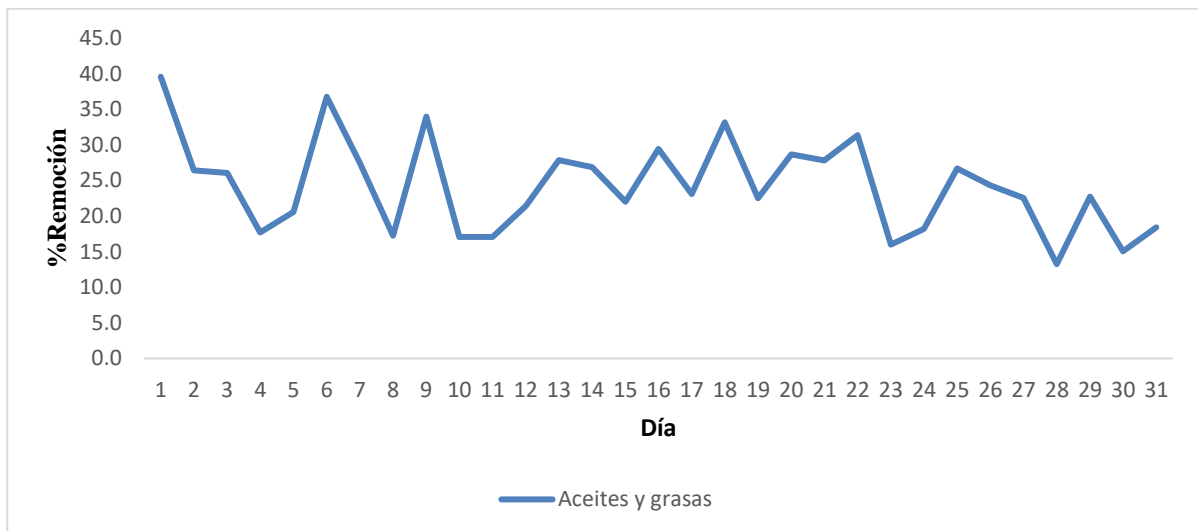


Figura 8. Porcentaje de remoción de Aceites y Grasas

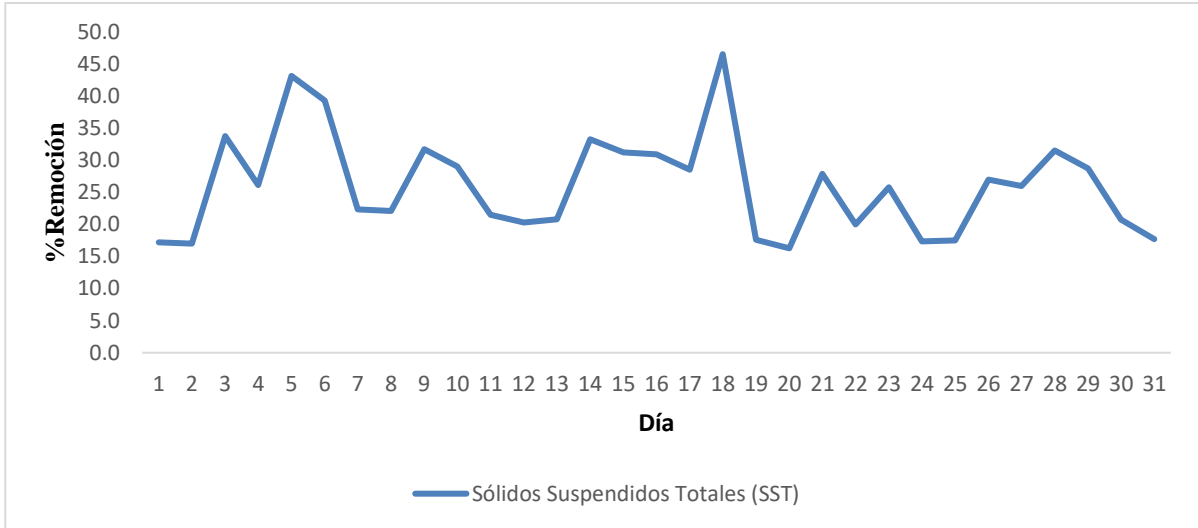


Figura 9. Porcentaje de remoción de SST

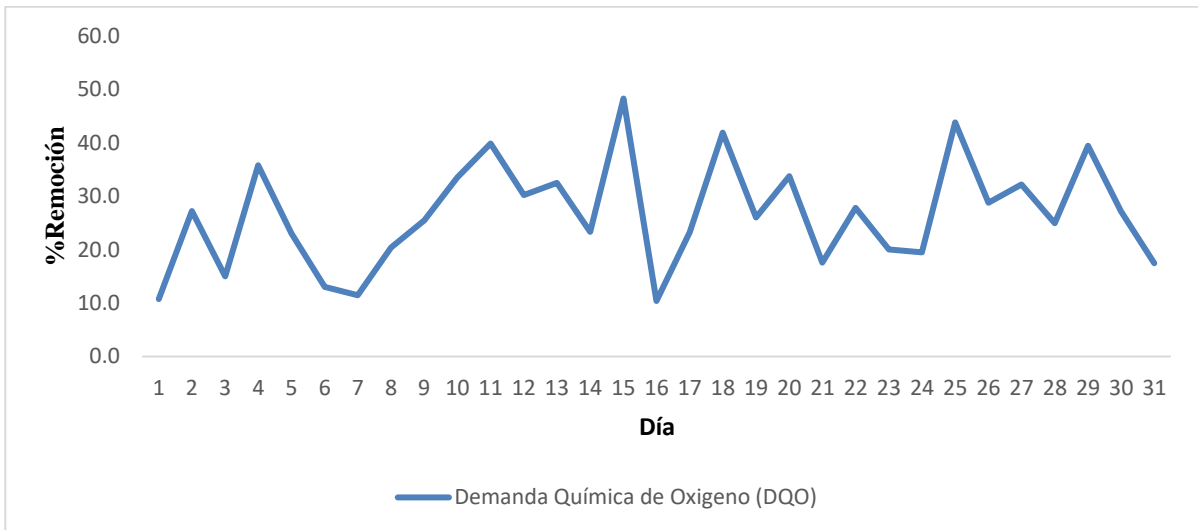


Figura 10. Porcentaje de remoción de DQO

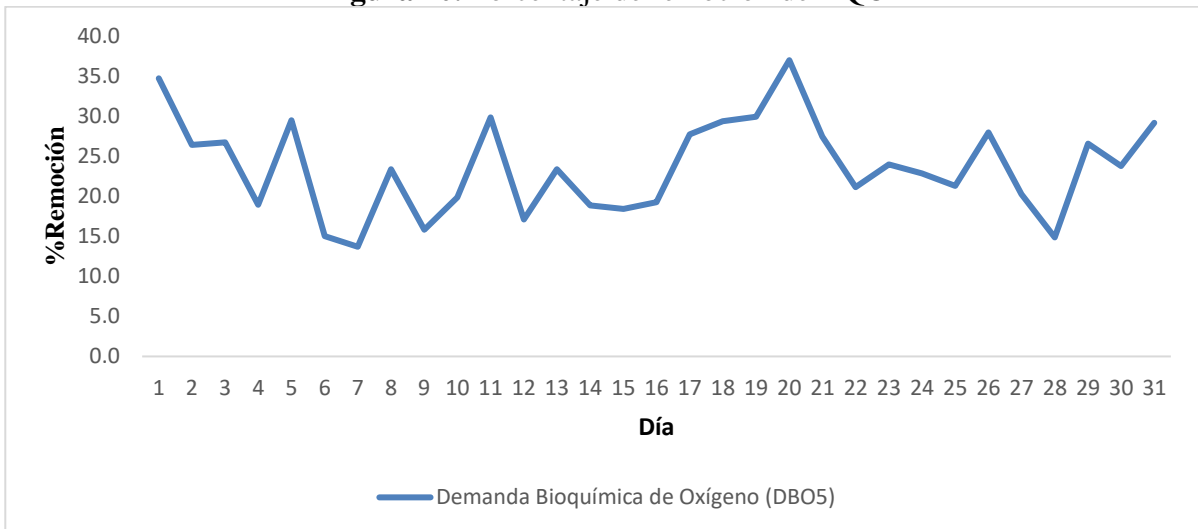


Figura 11. Porcentaje de remoción de DBO₅

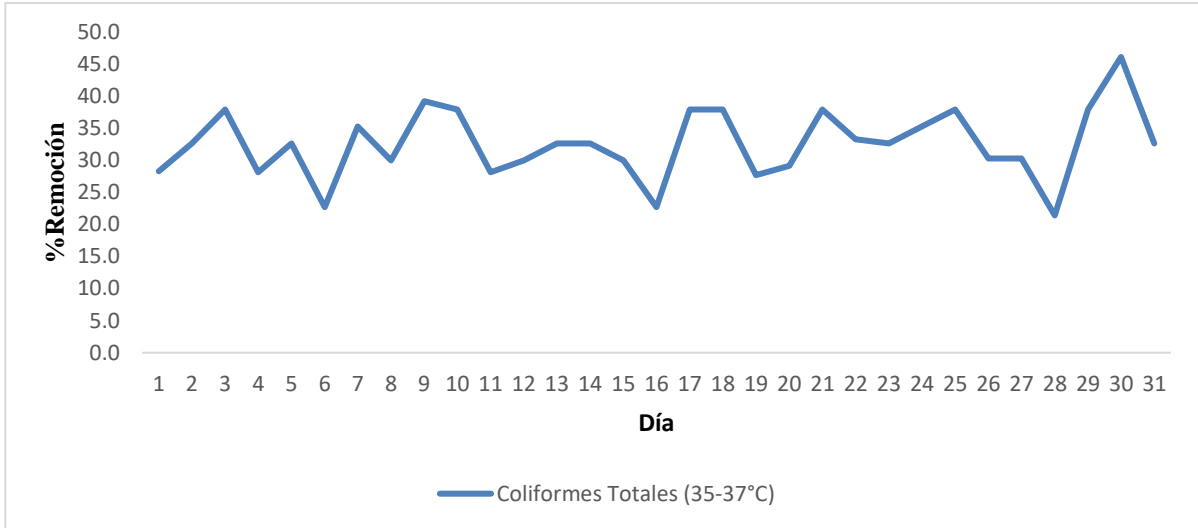


Figura 12. Porcentaje de remoción de Coliformes Totales

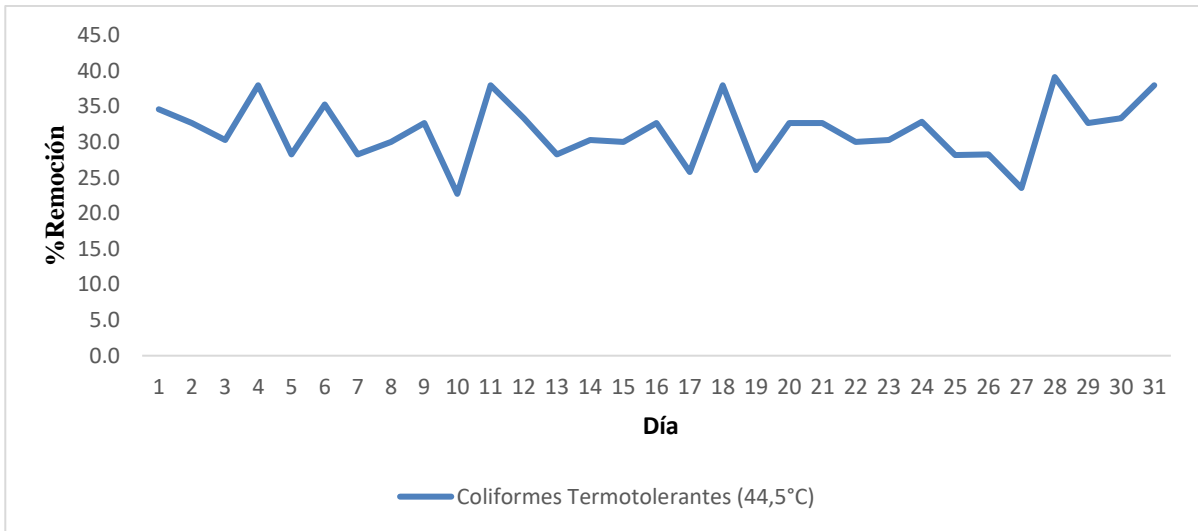


Figura 13. Porcentaje de remoción de Coliformes Termotolerantes

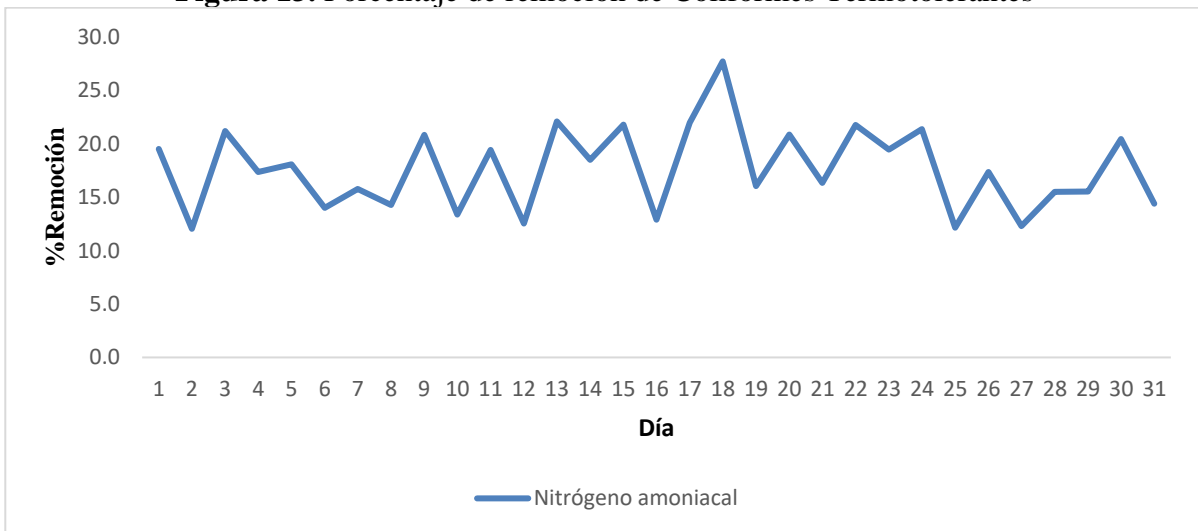


Figura 14. Porcentaje de remoción de Nitrógeno Amoniacal

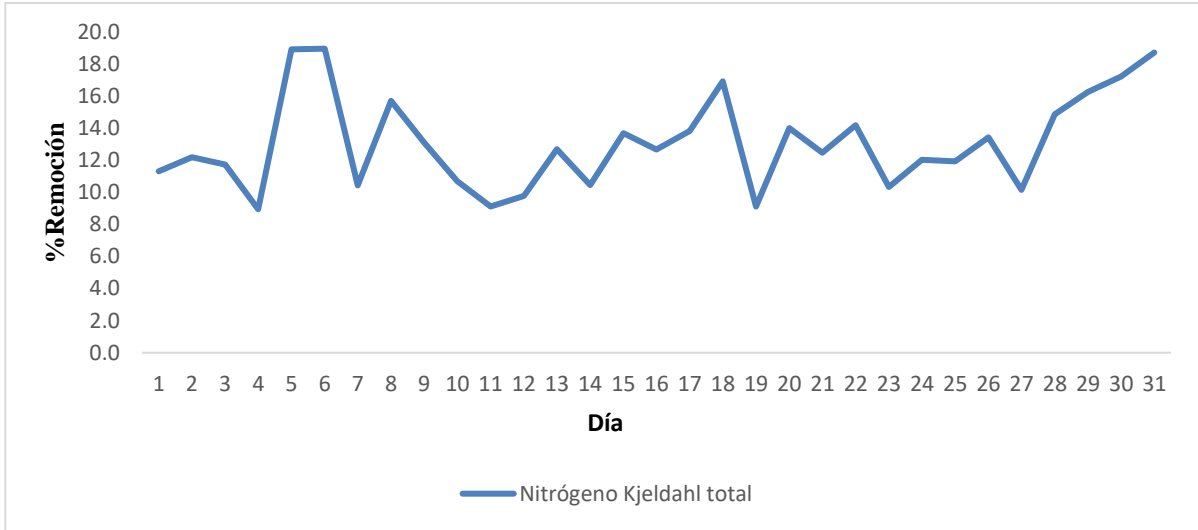


Figura 15. Porcentaje de remoción de Nitrógeno Kjeldahl

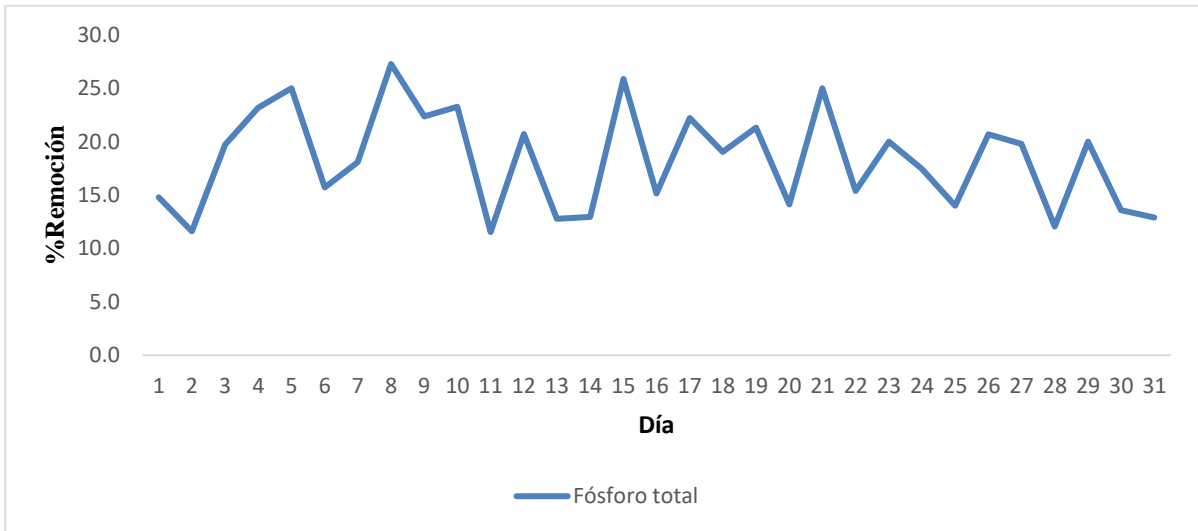


Figura 16. Porcentaje de remoción Fósforo Total

8.4.2 Remoción de metales totales

En la **Tabla 20** se presentan los porcentajes de remoción de metales evaluados en el proceso de tratamiento de la PTAR Taboada. Los resultados indican variaciones en la eficiencia de remoción entre los diferentes metales analizados.

Tabla 20. Porcentaje de remoción de metales

Metales	Dic. 2023	Ene. 2024	Feb. 2024	Mar. 2024	%Remoción
Aluminio	20,3	5,5	31,0	7,7	16,1
Bario	22,4	18,3	12,2	8,0	15,2
Boro	14,3	7,0	10,0	23,2	13,6
Calcio	26,5	9,3	12,4	8,0	14,0
Cobre	29,3	17,7	26,3	5,5	19,7
Estroncio	25,7	11,8	14,0	8,8	15,1
Fosforo	26,5	12,6	9,1	5,2	13,4
Hierro	42,1	15,6	39,6	24,0	30,3
Litio	33,8	9,6	7,3	24,2	18,7
Magnesio	16,9	12,7	8,0	28,9	16,6
Manganeso	46,4	23,7	22,7	30,1	30,7
Potasio	30,2	4,9	9,2	2,1	11,6
Silicio	31,8	9,3	6,9	2,1	12,5
Sodio	8,0	17,4	16,8	29,4	17,9
Sílice	31,8	9,3	2,4	2,1	11,4
Zinc	46,4	8,8	33,4	5,3	23,5

8.4.2.1 Análisis estadístico

Se realizó el análisis estadístico de los datos, aplicando la prueba de Grubbs para la detección de valores atípicos y la prueba de normalidad para evaluar la distribución de los datos.

- **Prueba de valores atípicos**

1. Método

- ❖ **Hipótesis nula (H_0):** Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal.
- ❖ **Hipótesis alterna (H_1):** El valor más pequeño o grande de los datos es un valor atípico.

2. Nivel de significancia: $\alpha = 0,05$

3. Método estadístico aplicado:

Prueba de Grubbs

Tabla 21. Resultados de la prueba de Grubbs para detección de datos atípicos

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	Estadístico G	Valor p	Conclusión
Aluminio	4	16,11	11,87	5,45	30,96	1,25	0,664	No atípicos
Bario	4	15,23	6,38	8,04	22,43	1,13	0,990	No atípicos
Boro	4	13,61	7,06	6,97	23,19	1,36	0,385	No atípicos
Calcio	4	14,05	8,52	7,97	26,52	1,46	0,098	No atípicos
Cobre	4	19,70	10,65	5,49	29,26	1,33	0,445	No atípicos
Estroncio	4	15,10	7,41	8,85	25,75	1,44	0,168	No atípicos
Fosforo	4	13,37	9,30	5,17	26,54	1,42	0,222	No atípicos
Hierro	4	30,33	12,67	15,63	42,12	1,16	0,904	No atípicos
Litio	4	18,72	12,54	7,27	33,81	1,20	0,793	No atípicos
Magnesio	4	16,65	8,92	8,04	28,87	1,37	0,348	No atípicos
Manganeso	4	30,73	10,93	22,72	46,36	1,43	0,186	No atípicos
Potasio	4	11,61	12,72	2,12	30,19	1,46	0,106	No atípicos
Silicio	4	12,53	13,20	2,09	31,81	1,46	0,105	No atípicos
Sodio	4	17,91	8,81	7,98	29,43	1,31	0,512	No atípicos
Sílice	4	11,41	14,00	2,09	31,81	1,46	0,114	No atípicos
Zinc	4	23,50	19,76	5,32	46,43	1,16	0,905	No atípicos

Nota: La prueba de Grubbs evalúa la presencia de valores atípicos en las distribuciones analizadas. Un valor p mayor a 0,05 indica que no se detectaron datos atípicos en el parámetro correspondiente.

Conclusión:

Los resultados obtenidos muestran que, aunque algunas variables presentan asimetrías positivas leves hacia valores altos, los valores de P son mayores a 0,05 en todos los casos. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula (H_0), concluyendo que no se identificaron datos atípicos significativos en las variables analizadas. Las distribuciones de los datos pueden considerarse representativas del conjunto de datos evaluado.

• Prueba de normalidad

1. Método

- ❖ **Hipótesis nula (H_0):** Los datos siguen una distribución normal.
- ❖ **Hipótesis alterna (H_1):** Los datos no siguen una distribución normal.

2. Nivel de significancia: $\alpha = 0,05$

3. Método estadístico aplicado:

Prueba de Anderson Darling

Tabla 22. Resultados de la prueba de normalidad de Anderson-Darling

Variable	N	Media	Desv.Est.	AD	Valor p
Aluminio	4	16,11	11,87	0,275	0,435
Bario	4	15,23	6,38	0,185	0,760
Boro	4	13,61	7,06	0,240	0,537
Calcio	4	14,05	8,52	0,467	0,107
Cobre	4	19,70	10,65	0,258	0,492
Estroncio	4	15,10	7,41	0,366	0,226
Fosforo	4	13,37	9,30	0,318	0,320
Hierro	4	30,33	12,67	0,295	0,379
Litio	4	18,72	12,54	0,286	0,403
Magnesio	4	16,65	8,92	0,244	0,525
Manganeso	4	30,73	10,93	0,406	0,167
Potasio	4	11,61	12,72	0,444	0,124
Silicio	4	12,53	13,20	0,448	0,121
Sodio	4	17,91	8,81	0,271	0,449
Sílice	4	11,41	14,00	0,488	0,091
Zinc	4	23,50	19,76	0,304	0,355

Nota: AD corresponde al estadístico de Anderson-Darling y el valor p indica el nivel de significancia para la prueba de normalidad.

Conclusión:

Los resultados de la prueba de normalidad de Anderson-Darling para las variables analizadas indican que no se rechaza la hipótesis nula (H_0) en ninguno de los casos, ya que todos los valores de p son superiores al nivel de significancia de 0.05. Esto sugiere que las distribuciones de las variables evaluadas son consistentes con una distribución normal. En consecuencia, se puede concluir que no existen desviaciones significativas de la normalidad en los datos.

En las **Figuras 17 a 20** se muestran de manera grafica el porcentaje de remoción de los metales totales analizados por ICP-Masas, durante el periodo de diciembre de 2023 hasta marzo de 2024.

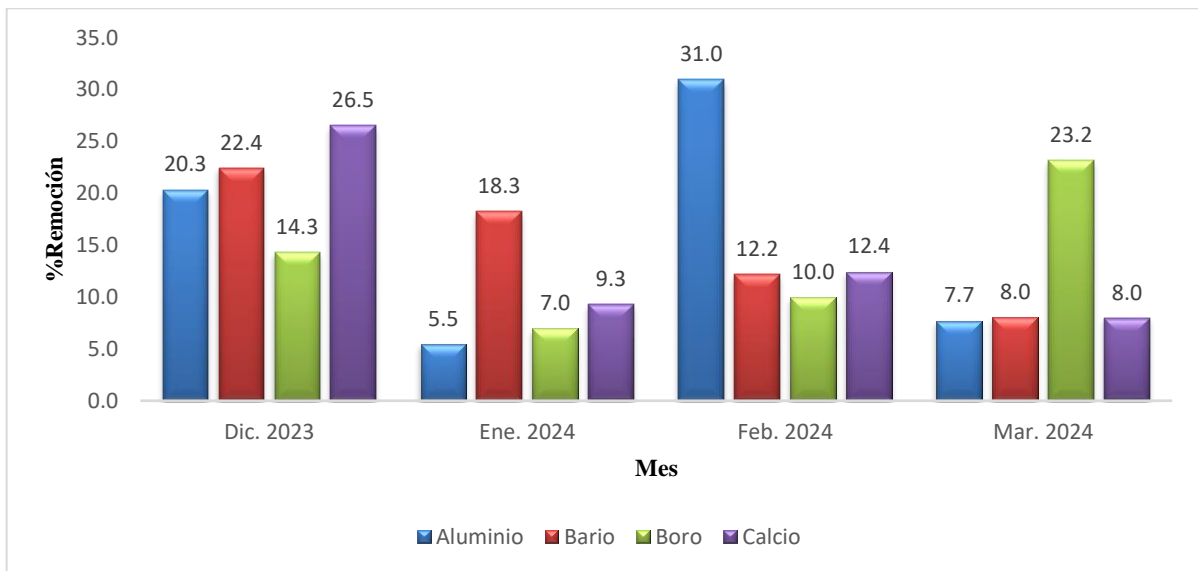


Figura 17. Porcentaje de remoción de Aluminio, Bario, Boro y Calcio.

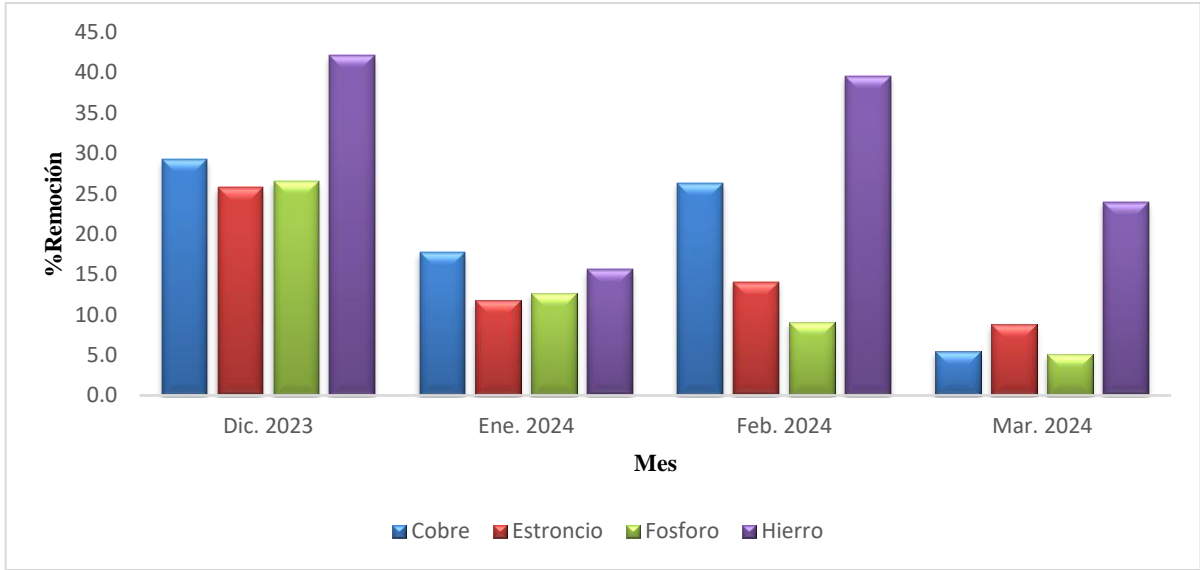


Figura 18. Porcentaje de remoción de Cobre, Estroncio, Fósforo y Hierro.

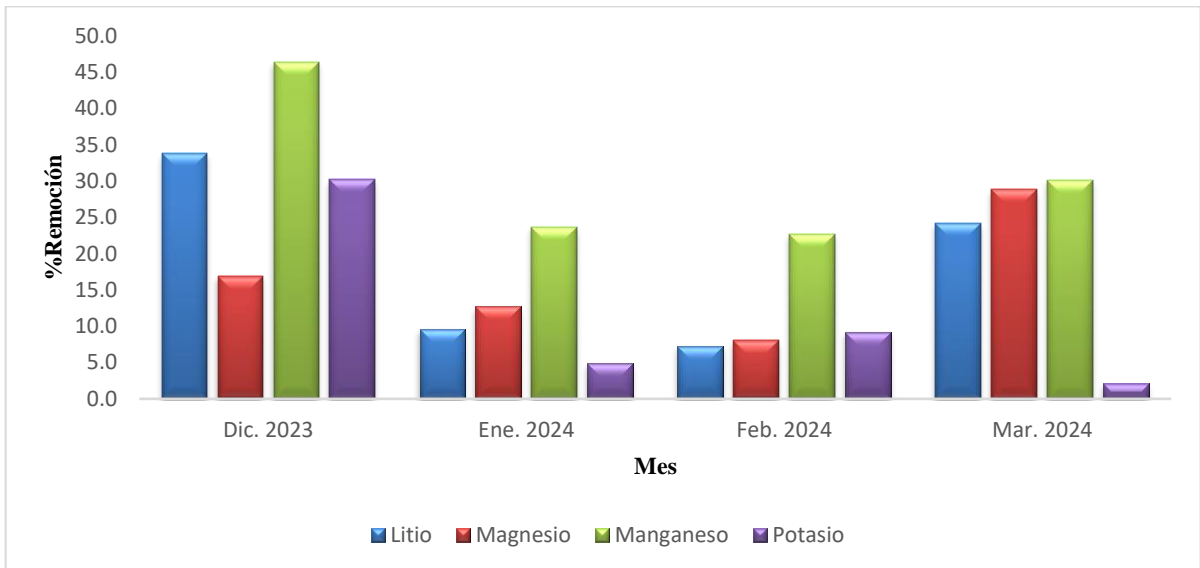


Figura 19. Porcentaje de remoción de Litio, Magnesio, Manganeso y Potasio.

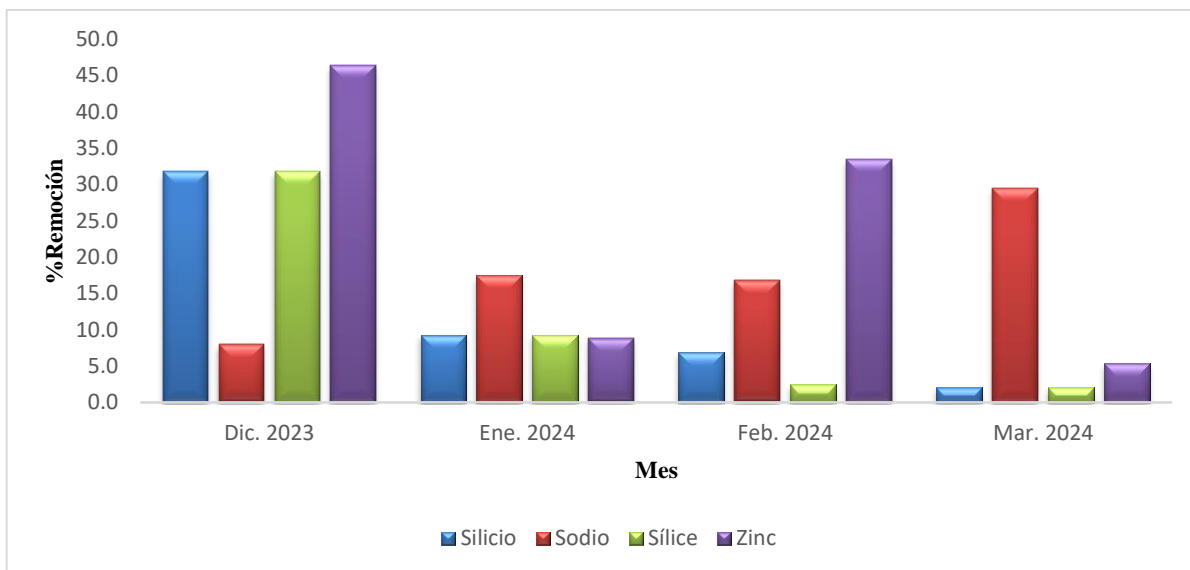


Figura 20. Porcentaje de remoción de Silicio, Sodio, Sílice y Zinc.

8.4.3 Cálculo de la eficiencia global promedio

La eficiencia global de la PTAR Taboada se determinó como el promedio de las eficiencias individuales de los parámetros evaluados. Estos parámetros incluyen: DQO, DBO₅, Sólidos Suspendidos Totales (SST), Aceites y Grasas, Fósforo Total, Nitrógeno Amoniacal, Nitrógeno Kjeldahl Total, Coliformes Termotolerantes, y Coliformes Totales. Las eficiencias individuales fueron calculadas para un periodo de 31 días de monitoreo, y sus valores promedios se emplearon para determinar la eficiencia global mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia Global} = \frac{\text{Eficiencia Promedio de DQO} + \dots + \text{Eficiencia Promedio de CT}}{\text{Número de Parámetros}}$$

Sustituyendo los valores, se obtuvo:

$$\text{Eficiencia Global} = \frac{26,6 + 23,7 + 26,1 + 24,2 + 18,3 + 17,6 + 13,1 + 31,5 + 32,6}{9} = 19.8\%$$

Selección del tipo de prueba

Se seleccionó una prueba t de una muestra porque se desea comparar el promedio muestral de la eficiencia global (\bar{x}) con un valor de referencia establecido ($\mu_0=50\%$), para evaluar si la eficiencia supera este umbral.

Formulación de hipótesis

Para evaluar si la eficiencia global supera el valor de referencia del 50 %, se plantearon las siguientes hipótesis:

- **Hipótesis nula (H_0):** La eficiencia promedio de la PTAR Taboada es menor o igual al 50 % ($\mu_0 \leq 50\%$).
- **Hipótesis alterna (H_1):** La eficiencia promedio de la PTAR Taboada es mayor al 50 % ($\mu_0 > 50\%$).

Se utilizó un nivel de significancia (α) del 5 % (0,05) para la prueba.

Cálculo de la prueba t

La prueba t para una muestra se calcula con la fórmula:

Cálculo del estadístico t:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

Donde:

\bar{x} : Promedio muestral (19,8 %)

μ_0 : Valor de referencia (50 %)

s : Desviación estándar global (6.8 %, calculada como el promedio de las desviaciones estándar de los parámetros)

n : Número de parámetros (9)

Sustituyendo los valores:

$$t = \frac{19,8 - 50}{\frac{6,8}{\sqrt{9}}} = \frac{-30,2}{2,27} = -13,31$$

Determinación del valor crítico y decisión

Con $n-1=8$ grados de libertad y un nivel de significancia de 0,05 para una prueba unilateral, el valor crítico t_c es aproximadamente 1,860.

- Si $t > t_c$, se rechaza H_0 .

- Si $t \leq t_c$, no se rechaza H_0 .

En este caso, $t = -13,31$, que es mucho menor que $t_c = 1,860$.

Conclusión

Dado que $t = -13,31$ no supera el valor crítico, no se rechaza la hipótesis nula (H_0).

Esto indica que, con un nivel de confianza del 95 %, la eficiencia global de la PTAR Taboada no supera el 50 %.

8.5 Calidad ambiental del cuerpo receptor

8.5.1 Monitoreo de agua de mar – zona costera

Las **Tablas 23 a 25** presentan los resultados de los parámetros de calidad del agua marina, medidos a lo largo del período de monitoreo en las seis estaciones de la zona costera o litoral, todas a nivel superficial.

Tabla 23. Condiciones del agua en el cuerpo receptor (zona marina – zona costera)

20/02/2024	Estaciones/ Profundidad (Superficial)	Unidad	E-09	E-10	E-11	E-13	E-14	E-16
PARAMETROS ASOCIADOS	DBO ₅	mg/L	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00
	Aceites y Grasas	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Arsénico	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Cadmio	mg/L	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
	Cianuro Libre	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Cloruros	mg/L	19 435,525	20 628,246	14 947,605	18 856,343	16 637,917	19 734,373
	Conductividad	µS/cm	49800	55000	49200	54000	49200	53600
	Cromo Hexavalente	mg/L	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	Esteres Ftalatos	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	Fenoles	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Hidrocarburos de Petróleo	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Mercurio	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	Oxígeno Disuelto	mg/L	3,97	5,59	4,51	4,54	5,86	7,76
	pH	Unidad de pH	7,62	7,64	7,60	7,71	7,75	7,72
	Temperatura	°C	22,8	22,4	22,0	21,8	21,6	23,3
	Plomo	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Policloruros Bifenilos Totales (PCBs)	mg/L	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005
	Selenio	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Silicatos	mg/L	8,860	8,770	8,760	8,860	8,115	8,326	
PARAMETROS MICROBIOLÓGICOS	Coliformes Totales	NMP/100mL	540	2800	5400	920	2200	940
	Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	540	2800	5400	920	2200	940

Tabla 24. Condiciones del agua en el cuerpo receptor (zona marina – zona costera)

05/03/2024	Estaciones/ Profundidad (Superficial)	Unidad	E-09	E-10	E-11	E-13	E-14	E-16
PARAMETROS ASOCIADOS	DBO ₅	mg/L	2,1	<2,00	2,3	<2,00	4,7	<2,00
	Aceites y Grasas	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Arsénico	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Cadmio	mg/L	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
	Cianuro Libre	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Cloruros	mg/L	19 428,485	20 631,186	14 951,555	18 847,338	16 548,821	19 673,394
	Conductividad	µS/cm	49800	55100	49100	54000	49200	53300
	Cromo Hexavalente	mg/L	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	Esteres Ftalatos	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	Fenoles	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Hidrocarburos de Petróleo	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Mercurio	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	Oxígeno Disuelto	mg/L	3,94	5,59	5,52	4,54	5,85	7,75
	pH	Unidad de pH	7,65	7,68	7,60	7,72	7,71	7,72
	Temperatura	°C	22,7	22,4	22,1	21,7	21,6	22,3
	Plomo	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Policloruros Bifenilos Totales (PCBs)	mg/L	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005
Selenio	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	
Silicatos	mg/L	8,740	8,00	8,670	8,810	8,217	8,323	
PARAMETROS MICROBIOLÓGICOS	Coliformes Totales	NMP/100mL	350	2800	5400	920	1700	2200
	Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	350	2800	5400	920	1700	2200

Tabla 25. Condiciones del agua en el cuerpo receptor (zona marina – zona costera)

19/03/2024	Estaciones/ Profundidad (Superficial)	Unidad	E-09	E-10	E-11	E-13	E-14	E-16
PARAMETROS ASOCIADOS	DBO ₅	mg/L	2,4	3,2	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00
	Aceites y Grasas	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Arsénico	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Cadmio	mg/L	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
	Cianuro Libre	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Cloruros	mg/L	20 063,096	21 294,329	15 430,262	19 465,212	17 175,153	20 371,594
	Conductividad	µS/cm	53300	45400	47300	43500	46300	53100
	Cromo Hexavalente	mg/L	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	Esteres Ftalatos	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	Fenoles	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Hidrocarburos de Petróleo	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Mercurio	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	Oxígeno Disuelto	mg/L	7,91	6,08	7,25	6,45	6,78	5,64
	pH	Unidad de pH	8,13	8,05	8,12	8,21	8,13	8,16
	Temperatura	°C	21,8	20,3	20,3	22,7	21,6	22,2
	Plomo	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Policloruros Bifenilos Totales (PCBs)	mg/L	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005
Selenio	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	
Silicatos	mg/L	4,126	4,024	4,329	4,037	4,027	4,037	
PARAMETROS MICROBIOLÓGICOS	Coliformes Totales	NMP/100mL	170	3500	9200	920	3500	2200
	Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	170	2800	9200	920	3500	2200

8.5.2 Monitoreo de agua de mar - zona marina

En las **Tablas 26 a 28** se muestran los resultados de los parámetros de calidad del mar medidos durante el período de monitoreo, que se realizó en las 10 estaciones en la zona marina, todas a nivel superficial. Para obtener una referencia más completa de la calidad en los puntos de monitoreo, se incluyeron también los resultados de los dos trimestres anteriores, correspondientes a septiembre y diciembre de 2023.

Tabla 26. Condiciones del agua en el cuerpo receptor (agua de mar – zona marina)

12/09/2024	Estaciones/ Profundidad (Superficial)	Unidad	CA-01	CA- 02	CA-03	CA- 04	CA-05	CA- 06	CA-07	CA- 08	CA-09	CA- 10	
PARAMETROS FISICOQUIMICOS	DBO ₅	mg/L	3,5	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	5,1	<2,00	<2,00	<2,00	
	Aceites y Grasas	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
	Arsénico	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
	Cadmio	mg/L	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	
	Cianuro Libre	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
	Cloruros	mg/L	17 613,5	17 894	17 930,8	18 129,2	17 713	17 775,6	17 637,8	17 729,3	17 696,2	18 257,3	
	Conductividad	µS/cm	54200	54200	53200	52600	54500	53400	53700	54200	52400	54600	
	Cromo Hexavalente	mg/L	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	Esteres Ftalatos	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	Fenoles	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Hidrocarburos de Petróleo	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Mercurio	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	Oxígeno Disuelto	mg/L	5,72	3,82	5,22	4,67	5,82	4,22	6,16	3,52	4,53	5,65	
	pH	Unidad de pH	7,80	7,60	7,80	7,20	7,80	7,80	7,80	7,80	7,70	7,40	7,80
	Temperatura	°C	20,5	19,1	19,4	18,7	20,8	19,2	17,8	18,9	17,9	19,4	
	Plomo	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Policloruros Bifenilos Totales (PCBs)	mg/L	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	
Selenio	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	
Silicatos	mg/L	8,950	8,942	8,627	8,645	9,352	9,125	9,079	8,978	8,899	9,066		
PARAMETROS MICROBIOLOGICOS	Coliformes Totales	NMP/100 mL	920000	940	1300	1400	790	3300	49000	11000	3300	3300	
	Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	920000	940	790	790	490	2300	49000	7900	790	790	

Tabla 27. Condiciones del agua en el cuerpo receptor (agua de mar – zona marina)

04/12/2024	Estaciones/ Profundidad (Superficial)	Unidad	CA-01	CA- 02	CA-03	CA- 04	CA-05	CA- 06	CA-07	CA- 08	CA-09	CA- 10	
PARAMETROS FISICOQUIMICOS	DBO ₅	mg/L	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	
	Aceites y Grasas	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
	Arsénico	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
	Cadmio	mg/L	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	
	Cianuro Libre	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
	Cloruros	mg/L	19 623,2	20 104,2	19 502,0	19 825,7	19 821,4	20 394,5	20 985,1	20 181,9	19 610,1	19 466,5	
	Conductividad	µS/cm	53100	51800	52600	53600	54100	53800	54500	53500	54100	53100	
	Cromo Hexavalente	mg/L	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	Esteres Ftalatos	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	Fenoles	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Hidrocarburos de Petróleo	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Mercurio	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	Oxígeno Disuelto	mg/L	4,87	4,84	4,90	4,88	5,23	4,97	4,91	5,15	4,85	5,24	
	pH	Unidad de pH	7,80	7,70	7,79	7,85	7,85	7,81	7,78	7,85	7,83	7,71	
	Temperatura	°C	21,4	21,1	21,1	22,6	22,8	21,8	23,1	23,5	22,4	22,1	
	Plomo	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Policloruros Bifenilos Totales (PCBs)	mg/L	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005
Selenio	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	
Silicatos	mg/L	8,383	8,830	8,880	8,200	8,880	8,180	8,030	8,820	8,890	8,800		
PARAMETROS MICROBIOLOGICOS	Coliformes Totales	NMP/100mL	24000	9200	540	1400	16000	240000	350000	24000	5400	9200	
	Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	24000	5400	350	1400	35000	240000	160000	24000	2200	9200	

Tabla 28. Condiciones del agua en el cuerpo receptor (agua de mar – zona marina)

09/03/2024	Estaciones/ Profundidad (Superficial)	Unidad	CA-01	CA- 02	CA-03	CA- 04	CA-05	CA- 06	CA-07	CA- 08	CA-09	CA- 10	
PARAMETROS FISICOQUIMICOS	DBO ₅	mg/L	3,2	<2,00	<2,00	<2,00	6,8	<2,00	2,7	2,1	<2,00	2,9	
	Aceites y Grasas	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
	Arsénico	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
	Cadmio	mg/L	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	
	Cianuro Libre	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
	Cloruros	mg/L	23 201,1	23 115,2	23 944,8	24 018,0	23 118,1	23 240,5	22 807,2	22 508,0	22 957,1	20 725,2	
	Conductividad	µS/cm	51300	53100	53300	53100	51600	53500	53000	53400	53200	53200	
	Cromo Hexavalente	mg/L	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	Esteres Ftalatos	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	Fenoles	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Hidrocarburos de Petróleo	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Mercurio	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	Oxígeno Disuelto	mg/L	3,57	7,54	3,46	3,41	3,83	4,81	3,16	3,96	3,14	3,61	
	pH	Unidad de pH	7,56	7,54	7,57	7,50	7,55	7,56	7,55	7,54	7,50	7,48	
	Temperatura	°C	21,3	22,1	22,2	21,5	21,0	21,8	21,9	21,3	22,3	21,3	
	Plomo	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Policloruros Bifenilos Totales (PCBs)	mg/L	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	
Selenio	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	
Silicatos	mg/L	8,760	8,470	8,460	8,325	8,835	8,480	8,685	8,780	8,295	8,540		
PARAMETROS MICROBIOLOGICOS	Coliformes Totales	NMP/100mL	350000	1300	1300	7000	350000	790	2300	1300	2300	1300	
	Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	130000	330	490	7000	350000	490	2300	1300	2300	790	

IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La magnitud y capacidad operativa de la PTAR Taboada son factores clave en su función como gestora de aguas residuales, influyendo directamente en la calidad ambiental. Los análisis fisicoquímicos realizados durante el periodo de febrero a abril de 2024 revelan parámetros clave que evidencian tanto el rendimiento de la planta como su cumplimiento con los estándares regulatorios. Estos resultados son fundamentales para evaluar su impacto en el entorno natural y para orientar mejoras que contribuyan a la sostenibilidad ambiental.

9.1 Comportamiento de los Caudales

En la **Tabla 10** y gráficamente en la **Figura 5**, se muestran los resultados de los caudales del afluente y efluente. Se observó que el caudal promedio del afluente fue de 13 827,38 L/s, mientras que el del efluente fue de 12 845,99 L/s. Los valores máximos registrados fueron de 14 406,34 L/s en el afluente y 13 506,94 L/s en el efluente. Por otro lado, los caudales mínimos alcanzaron 13 214,21 L/s en el afluente y 12 213,45 L/s en el efluente.

Estos datos reflejan las fluctuaciones típicas de una planta de tratamiento que opera en una zona urbana, donde los caudales varían en función de la actividad diaria y estacional de la población y las condiciones meteorológicas. Estos cambios en los caudales pueden influir significativamente en la eficiencia del proceso de tratamiento, impactando la capacidad de la planta para cumplir consistentemente con los límites máximos permisibles establecidos para los efluentes tratados.

9.2 Indicadores de Carga Orgánica

La DBO₅ y la DQO son indicadores clave de la carga orgánica en el agua residual tratada. En las **Tablas 11 a 13** se muestran los valores promedio de DBO₅ de 278,6 mg/L y DQO de 558,9 mg/L superan significativamente los límites establecidos por la normativa ambiental. Estos resultados sugieren una elevada concentración de materia orgánica en el efluente, lo que puede comprometer la calidad del agua y tener un impacto negativo en los ecosistemas acuáticos receptores. Estudios recientes han demostrado que altas concentraciones de DBO₅ y DQO en efluentes pueden conducir a la eutrofización de cuerpos de agua receptores, lo que a su vez puede provocar la proliferación de algas y la disminución de la calidad del agua (23,24).

9.3 Sólidos Suspendidos y Turbidez

Los sólidos suspendidos totales (SST) y la turbidez son parámetros que indican la presencia de partículas en suspensión en el agua. En las **Tablas 11 a 13**, se muestran el valor promedio de SST de 263,1 mg/L y la turbidez de 235.2 NTU, sugieren la presencia de partículas sólidas en el efluente tratado. Esta alta turbidez puede ser problemática, ya que puede reducir la penetración de la luz solar en el agua, afectando la fotosíntesis de las plantas acuáticas y la producción de oxígeno (25–28). Una concentración elevada de SST indica la necesidad de procesos más intensivos de tratamiento para reducir la carga orgánica y asegurar la eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales (29). Además, los sólidos suspendidos pueden transportar contaminantes orgánicos e inorgánicos, lo que aumenta el riesgo de impactos negativos en los ecosistemas acuáticos receptores. Estos impactos incluyen la disminución de la biodiversidad acuática, la alteración de las comunidades biológicas, la hipoxia (reducción del oxígeno disuelto) y el envenenamiento de especies, lo que afecta la salud y la capacidad de regeneración de los ecosistemas acuáticos.

9.4 Nutrientes Clave: Fósforo y Nitrógeno Amoniacal

El fósforo total y el nitrógeno amoniacal son nutrientes clave que pueden tener efectos significativos en la calidad del agua. En las **Tablas 11 a 13**, se muestra los valores promedio de fósforo total de 6,4 mg/L y nitrógeno amoniacal de 47,4 mg/L, estos valores indican concentraciones elevadas de estos nutrientes en el efluente tratado, lo que puede tener consecuencias negativas para la calidad del agua y la salud de los ecosistemas receptores (30). El fósforo es un nutriente limitante en muchos ecosistemas acuáticos, y su presencia en niveles elevados puede provocar la proliferación de algas y la eutrofización de los cuerpos de agua (31–33). Por otro lado, el nitrógeno amoniacal es tóxico para la vida acuática y puede afectar negativamente a los organismos acuáticos, especialmente en aguas con bajo contenido de oxígeno disuelto (32).

9.5 Contaminación Bacteriana

Los coliformes termotolerantes y totales sirven como indicadores de la presencia de contaminación bacteriana en el agua. Las **Tablas 11 a 13** muestran una alta concentración de coliformes termotolerantes ($1,4E+07$ NMP) y coliformes totales

(5,8E+07 NMP) en el efluente tratado indica una contaminación bacteriana significativa, lo que plantea preocupaciones sobre la seguridad microbiológica del agua. La presencia de altas concentraciones de coliformes puede aumentar el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua, como gastroenteritis, diarrea, cólera, fiebre tifoidea y disentería, especialmente en poblaciones vulnerables (34–36) .

9.6 pH y Temperatura

El pH y la temperatura son parámetros importantes que pueden influir en la química del agua y en la vida acuática. Las **Tablas 11 a 13** muestran el pH de 7,1 y la temperatura de 22,1 °C se encuentran dentro de los rangos aceptables establecidos por la normativa ambiental. Sin embargo, es crucial monitorear estos parámetros de manera continua, ya que cambios significativos en el pH pueden afectar la solubilidad de nutrientes y metales pesados, alterar el metabolismo de los organismos acuáticos, y causar estrés fisiológico o incluso mortalidad en especies sensibles. Asimismo, variaciones en la temperatura pueden influir en la disponibilidad de oxígeno disuelto, alterar los patrones reproductivos y de crecimiento, y favorecer la proliferación de organismos patógenos (37,38).

9.7 Evaluación de la Biodegradabilidad

Para determinar el nivel de tratamiento biológico necesario, es crucial conocer la relación entre la DBO₅ y la DQO, ya que esto permite evaluar la biodegradabilidad del efluente. Una relación DBO₅/DQO superior a 0,5 indica que el desecho es fácilmente tratable por medios biológicos, sugiriendo una buena capacidad de biodegradación. En este estudio, los datos detallados en la **Tabla 14** indican una buena biodegradabilidad del efluente, con una relación DBO₅/DQO de 0,5 y DBO₅ soluble/DQO soluble de 0,7; lo que sugiere que el tratamiento biológico será efectivo. Sin embargo, las altas proporciones de materia orgánica particulada, reflejadas en las relaciones DBO₅/DBO₅ soluble de 2,5 y DQO/DQO soluble de 2,7, indican la necesidad de pretratamientos físicos, como sedimentación y filtración, para remover sólidos suspendidos antes del tratamiento biológico (29,39).

9.8 Fraccionamiento de la DQO

Los resultados del fraccionamiento de la DQO, mostrados en las **Figuras 6 y 7**, indican que la reducción marginal de la DQO soluble biodegradable (S_s) y la particulada lentamente biodegradable (X_s) en el efluente sugiere una deficiencia en la eficiencia del tratamiento biológico, posiblemente debido a tiempos de retención inadecuados o actividad microbiana limitada. El aumento de la DQO particulada no biodegradable (X_i) y la DQO soluble no biodegradable (S_i) en el efluente resalta la acumulación de compuestos persistentes, señalando la necesidad de incorporar tecnologías avanzadas como oxidación avanzada, tratamiento anaerobio y filtración avanzada para optimizar la calidad del efluente final y satisfacer los requisitos ambientales.

9.9 Cumplimiento de Normativas Nacionales

Al comparar los resultados con la normativa establecida en el D.S 003-2010-MINAM para el vertimiento de efluentes, como se evidencia en la **Tabla 15**, la DBO_5 registrada de 278,6 mg/L y la DQO de 558,9 mg/L exceden los límites aceptables, indicando una carga orgánica elevada en el efluente tratado. Los sólidos suspendidos totales (SST) alcanzan un valor de 263,1 mg/L, por encima del rango deseable de 150 mg/L. Los coliformes termotolerantes registraron una concentración de $1,4E+07$ NMP, superando los 10000 NMP/100 mL establecidos como límite máximo permisible. Aunque la temperatura de 22,1 °C y el pH de 7,1 se mantienen dentro del rango establecido por la normativa, es necesario mejorar la eficiencia del tratamiento para los demás parámetros.

9.10 Eficiencia del tratamiento de aguas residuales

En la **Tabla 16**, se detalla el análisis de la eficiencia de remoción promedio de los metales en el afluente y efluente. La presencia de metales en el afluente se puede atribuir a múltiples factores, incluyendo no solo las actividades domésticas, sino también posibles descargas accidentales o ilegales de pequeñas industrias y la lixiviación de metales desde los suelos urbanos hacia el sistema de alcantarillado. Además, los productos de limpieza y las tuberías de plomo o cobre en mal estado también contribuyen a la presencia de metales como el aluminio, cobre y zinc en las aguas residuales domésticas.

En la **Tabla 17** y en las **Figuras 8 a 16** se observa que los porcentajes de remoción promedio de nitrógeno amoniacal (17,6 %), fósforo total (18,3 %), DQO (26,6 %) y nitrógeno Kjeldahl (13,1 %) son relativamente bajos, aunque cumplen con los límites establecidos por las regulaciones ambientales. Un estudio similar realizado en Ecuador también encontró un porcentaje de remoción de nitrógeno de 21,7 %, un valor bajo, pero conforme con las normativas nacionales (8).

En ciertos días, los datos de la **Tabla 17** muestran remociones bajas en parámetros clave como DBO₅ (13,7 %), DQO (10,4 %), SST (16,3 %), fósforo total (11,5 %) y nitrógeno Kjeldahl (9,0 %). Estas bajas eficiencias reflejan las limitaciones propias de una planta diseñada para un nivel de pretratamiento, donde los procesos están orientados principalmente a la eliminación de sólidos gruesos y materia orgánica en suspensión, pero no a la remoción avanzada de nutrientes o carga microbiológica. Factores como mantenimiento deficiente, fluctuaciones en la carga del afluente o intrusión de aguas pluviales exacerbaban estas limitaciones, afectando la estabilidad operativa. Aunque el emisario submarino compensa parcialmente estas deficiencias al dispersar el efluente tratado y minimizar su impacto ambiental, es fundamental optimizar los procesos internos para mejorar la remoción de parámetros críticos y reforzar la capacidad de tratamiento dentro de las restricciones del diseño (40).

Las **Figuras 17 a 20**, muestran que planta logra una reducción significativa en la concentración de metales como el hierro (30,3 %), el manganeso (30,7 %), y el cobre (19,7 %). Sin embargo, la eficiencia de remoción varía considerablemente entre los metales, como se evidencia en la baja remoción del potasio (11,6 %) (**Figura 19**) y la sílice (11,4 %) (**Figura 20**). En cuanto a la toxicidad, el aluminio y el hierro, aunque esenciales en pequeñas cantidades, pueden ser tóxicos en concentraciones elevadas. El aluminio puede afectar la fisiología de los organismos acuáticos, dañando su sistema nervioso y respiratorio, mientras que el hierro en exceso puede interferir en el transporte de oxígeno y alterar el equilibrio biológico. Además, elementos como el manganeso, a pesar de su bajo nivel de toxicidad comparado con otros metales pesados, también deben ser controlados debido a sus efectos adversos en altas concentraciones, como la alteración del sistema nervioso, el daño a los pulmones y problemas cardiovasculares. La remoción efectiva de estos metales es crucial para asegurar que el efluente tratado cumpla con los estándares de calidad ambiental.

9.11 Impacto en el Cuerpo Receptor

La comparación de los resultados obtenidos (**Tablas 23 a 25** para la zona costera y **Tablas 26 a 28** para la zona marina) con los valores límite establecidos mostrados en la **Tabla 2** evidencia que la PTAR Taboada opera dentro de los estándares para sustancias potencialmente peligrosas. Parámetros como cromo hexavalente, cadmio, mercurio y plomo se encuentran por debajo de los valores límite permitidos, lo que indica que estos contaminantes no alcanzan concentraciones perjudiciales en el cuerpo receptor (41).

En cuanto a la calidad fisicoquímica del cuerpo receptor, los niveles de DBO₅ y oxígeno disuelto cumplen con los valores normativos mínimos para garantizar la protección ambiental (DBO₅ ≤ 10 mg/L y oxígeno disuelto ≥ 4 mg/L). Respecto a la calidad microbiológica del cuerpo receptor, en la zona costera, los valores promedio de coliformes totales y termotolerantes se mantienen dentro de los límites permisibles, con un promedio de 2.5E+3 NMP/100 mL y 2.5E+3 NMP/100 mL respectivamente. Sin embargo, en la zona marina, los coliformes totales alcanzan un promedio de 7.6E+4 NMP/100 mL, superando el límite de 20,000 NMP/100 mL, lo que indica una mayor carga bacteriana. Lo mismo ocurre con los coliformes termotolerantes, cuyo promedio en la zona marina es de 5.8E+4 NMP/100 mL, también por encima del límite establecido, indicando una posible mayor carga bacteriana en esta área, a pesar de la dilución que proporciona el emisario submarino (42).

El emisario submarino juega un rol clave en la dispersión de los contaminantes, minimizando los impactos en la zona de protección ambiental litoral. No obstante, aunque se cumplen los valores normativos, el fortalecimiento de los sistemas de tratamiento podría mejorar significativamente la remoción de nutrientes y patógenos, reduciendo así la carga contaminante transportada al cuerpo receptor y asegurando un impacto ambiental más controlado a largo plazo. Es crucial considerar la capacidad del cuerpo receptor para asegurar una dilución óptima de los contaminantes.

Para evaluar el impacto ambiental real, es necesario realizar un análisis más detallado que determine si los efectos negativos se deben al vertimiento de efluentes a través del emisario submarino o si provienen de otras fuentes de contaminación cercanas a los puntos de monitoreo (43,44) . Dado que la PTAR Taboada realiza un tratamiento preliminar de aguas residuales, este nivel de tratamiento resulta insuficiente para la

eliminación completa de nutrientes y coliformes. Según Salim Dantas, inclusive los tratamientos secundarios convencionales podrían ser limitados en su capacidad para eliminar estos contaminantes, lo que podría generar alteraciones significativas en los cuerpos receptores. Esto subraya la necesidad de considerar la implementación de niveles de tratamiento más avanzados que puedan eliminar de manera más eficaz los contaminantes y garantizar la preservación del medio ambiente y la salud pública (43).

La cercanía de la estación de monitoreo E-14 al río Chillón sugiere que la calidad del agua del río podría afectar de manera significativa los resultados obtenidos en dicha estación. Este fenómeno puede ser especialmente relevante durante los periodos de alta precipitación, donde el arrastre de contaminantes aumenta significativamente. Un estudio reciente realizado por Soto et al. (45) evaluó las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua del río Chillón, encontrando que en su tramo aguas abajo, el río no alcanza los estándares de calidad establecidos por las normas vigentes. El Índice de Calidad de Agua para Ríos y Humedales (ICARHS) calculado fue de 35.4, clasificando al río como un cuerpo de agua de pésima calidad. Estos resultados señalan la existencia de elevados niveles de contaminantes en el río Chillón, lo que podría estar influyendo en los resultados que se obtuvieron en la estación de monitoreo E-14. El estudio menciona la presencia de niveles elevados de coliformes fecales y metales pesados, parámetros que coinciden con las mediciones en nuestra estación, sugiriendo que el río Chillón podría ser una fuente significativa de contaminación.

X. CONCLUSIONES

Sobre las características fisicoquímicas y microbiológicas:

- ❖ En el afluente, las concentraciones promedio de los parámetros monitoreados fueron: DBO₅ (366,1 mg/L), DQO (773,5 mg/L), SST (359,9 mg/L), aceites y grasas (37,1 mg/L), coliformes termotolerantes (2,0E+07 NMP), coliformes totales (8,6E+07 NMP), pH (7,3). Para los metales, los valores promedio fueron: aluminio (0,99 mg/L), cobre (0,07 mg/L), manganeso (0,10 mg/L) y zinc (0,34 mg/L).
- ❖ En el efluente, las concentraciones promedio fueron: DBO₅ (278,6 mg/L), DQO (558,9 mg/L), SST (263,1 mg/L), aceites y grasas (28,0 mg/L), coliformes termotolerantes (1,4E+07 NMP), coliformes totales (5,8E+07 NMP), pH (7,1). Para los metales: aluminio (0,82 mg/L), cobre (0,06 mg/L), manganeso (0,07 mg/L) y zinc (0,26 mg/L).

Cumplimiento con los LMP:

- ❖ Los parámetros de pH y temperatura cumplieron con los LMP, mientras que los demás parámetros excedieron los valores establecidos, lo que refleja una eficiencia de tratamiento insuficiente para alcanzar los estándares normativos.

Eficiencia del tratamiento:

- ❖ Los porcentajes promedio de remoción de los parámetros evaluados fueron: DBO₅ (23,7 %), DQO (26,6 %), SST (26,6 %), aceites y grasas (24,2 %), coliformes termotolerantes (31,5 %) y coliformes totales (32,6 %).
- ❖ Para los metales, los porcentajes de remoción fueron: aluminio (16,1 %), cobre (19,7 %), manganeso (30,7 %) y zinc (23,5 %).
- ❖ El análisis de la PTAR Taboada muestra una eficiencia de remoción inferior al 50%, lo que confirma la hipótesis nula (H₀) de que la eficiencia es menor o igual al 50% y rechaza la hipótesis alterna (H₁), que planteaba una eficiencia superior al 50%.

Impacto en el cuerpo receptor:

- ❖ Aunque se verificó que la calidad fisicoquímica y microbiológica del efluente se ajusta parcialmente a la normativa, no se pudo determinar el impacto directo sobre la diversidad hidrobiológica del cuerpo receptor.

XI. RECOMENDACIONES

- ❖ Establecer y hacer cumplir estrictas regulaciones para evitar que las industrias descarguen residuos no tratados en los cuerpos de agua que alimentan la PTAR Taboada. La presencia de contaminantes químicos industriales en el afluente complica significativamente el proceso de tratamiento, incrementando los costos operativos y disminuyendo la eficiencia de la planta. Implementar un sistema de monitoreo continuo y sanciones efectivas para las infracciones garantizará que las industrias cumplan con los estándares de descarga establecidos, promoviendo la sostenibilidad y eficacia en el tratamiento de aguas residuales en la PTAR.
- ❖ Ampliar los estudios en cada etapa del proceso de tratamiento para identificar con mayor precisión su eficacia y evaluar su correcto funcionamiento. Esto implica realizar análisis detallados de los parámetros de entrada y salida en cada unidad de tratamiento, así como llevar a cabo pruebas piloto y monitoreo continuo para verificar la efectividad de las operaciones realizadas.
- ❖ Con el objetivo de mejorar la calidad del agua procesada en la PTAR, se recomienda implementar la cloración para reducir los coliformes termotolerantes de manera efectiva y económica. Es esencial controlar cuidadosamente la dosificación de cloro para evitar la formación de subproductos tóxicos, como los trihalometanos, que podrían afectar negativamente al ecosistema acuático. Al mantener la concentración de cloro residual dentro de límites seguros, se asegura la desinfección adecuada del agua sin comprometer la salud del entorno natural.
- ❖ Explorar la integración de componentes adicionales en la PTAR Taboada en los niveles primario, secundario y terciario, con el objetivo de optimizar el tratamiento. Considerar la implementación de un tratamiento primario que complemente el pretratamiento avanzado existente, mejorando la eliminación inicial de sólidos en suspensión y materia orgánica.
- ❖ Además, evaluar la viabilidad de incorporar tecnologías de filtración o centrífuga en las etapas posteriores del tratamiento. Estas alternativas podrían aumentar la eficacia en la separación de sólidos y elevar la calidad del efluente. El uso de una centrífuga podría ser especialmente beneficioso en la fase de tratamiento primario para optimizar la remoción de sólidos, mientras que la filtración podría ofrecer ventajas en etapas secundarias o terciarias.

XII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el ámbito de las empresas prestadoras. Primera edición. Lima: Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS); 2022.
2. Política Nacional de Saneamiento 2017-2021. Primera Edición. Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento; 2017.
3. Estado Mundial del Saneamiento: Un llamamiento urgente a transformar el saneamiento para mejorar la salud, los entornos, las economías y las sociedades. Nueva York: Fondo de las Naciones Unidas para la infancia (UNICEF) y Organización Mundial de la Salud (OMS); 2020.
4. Atalaya Campos K. Eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales domesticas en los parámetros DBO, DQO, SST, pH, T°, aceites y grasas, en Sorochuco, Celendín, Cajamarca. [Celendín]: Universidad Nacional de Cajamarca; 2022.
5. Ledesma Giraldez W. Caracterización del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Municipalidad de Palca - Huancavelica 2020. [Palca]: Universidad Nacional de Huancavelica; 2021.
6. Cueva Olano CM, Garcia Diaz RE. Evaluación de la eficiencia de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas en una empresa minera, Cajamarca 2020. [Cajamarca]: Universidad Privada del Norte; 2021.
7. Santana Monroy MA. Monitoreo de parámetros de calidad de agua en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas del municipio de Tepeji del Río, Hidalgo. [Estado de México]: Universidad Autónoma del Estado de México; 2020.
8. Urbina Cepeda RO. Evaluación de la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de Las Fuerzas Armadas - ESPE. [Sangolquí]: Universidad de las Fuerzas Armadas; 2018.
9. Arimieari LW, Akari CD. Physicochemical Characteristics of Wastewater from Brewery in Port Harcourt, Nigeria. 2020.
10. Bahadori A, Smith ST. Dictionary of Environmental Engineering and Wastewater Treatment. Switzerland: Springer International Publishing; 2016. 486–487 p.
11. Hussain A, Bhattacharya A. Advanced Design of Wastewater Treatment Plants: Emerging Research and Opportunities. IGI Global Disseminator of Knowledge; 2019. 1–21 p.
12. Qasim SR, Guang Zhu. Wastewater Treatment and Reuse. Theory and Design Examples. Dallas, Texas: Taylor & Francis Group; 2018.

13. Phuciennik-Koropczuk E, Myszograj S. Changes in quantity of non-biodegradable organic micropollutants in municipal wastewater based on COD fractionation. *Desalination Water Treat.* 2020; 186:334–40.
14. Spellman FR. *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations*; Fourth Edition. 2020.
15. Ministerio del Ambiente. Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales. Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM 2010.
16. Autoridad Nacional del Agua. Límite de sustancias potencialmente peligrosas. Resolución Jefatural N° 0291-2009-ANA 2009.
17. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Taboada [Internet]. 2023 [cited 2023 Nov 22]. Available from: <https://www.tedagua.com/es/project/planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-de-taboada>
18. Chauca Solgorré M. Análisis de ciclo de vida de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en Lima. 2015.
19. De la Vega Salazar MY. Eficiencia en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Primera Edición. Jirón Ramírez V, editor. México: Refugia Centro para la Conservación de la Ecobiodiversidad A.C; 2012.
20. Lipps WC, Braun-Howland EBurton, Baxter TE, editors. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [Internet]. 24th Edition. Washington DC: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation; 2023. Available from: <https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.216>
21. Environmental Protection Agency (EPA). Method 365.3: Phosphorous, All Forms (Colorimetric, Ascorbic Acid, Two Reagent) [Internet]. Washington (DC): EPA; 1978.; 1978. Available from: www.epa.gov
22. Environmental Protection Agency (EPA). Method 1664, Revision B: n-Hexane Extractable Material (HEM; Oil and Grease) and Silica Gel Treated n-Hexane Extractable Material (SGT-HEM; Non-polar Material) by Extraction and Gravimetry [Internet]. Washington (DC): EPA; 2010.; 2010. Available from: <http://www.epa.gov/waterscience/methods/>
23. Jing W, Sajnani S, Zhou M, Zhu H, Xu Y. Evaluating the Ecological Impact of Wastewater Discharges on Microbial and Contaminant Dynamics in Rivers. *Water* (Switzerland). 2024 Feb 1;16(3).

24. Ehalt MacEdo H, Lehner B, Nicell J, Grill G, Li J, Limtong A, et al. Distribution and characteristics of wastewater treatment plants within the global river network. *Earth Syst Sci Data*. 2022 Feb 9;14(2):559–77.
25. Austin AN, Hansen JP, Donadi S, Eklöf JS. Relationships between aquatic vegetation and water turbidity: A field survey across seasons and spatial scales. *PLoS One*. 2017 Aug 1;12(8).
26. Nunes P, Roland F, Amado AM, Resende N da S, Cardoso SJ. Responses of Phytoplanktonic Chlorophyll-a Composition to Inorganic Turbidity Caused by Mine Tailings. *Front Environ Sci*. 2022 Apr 1;9.
27. Flores-Munguía EJ, Rosas-Acevedo JL, Ramírez-Hernández A, Aparicio-Saguilan A, Brito-Carmona RM, Violante-González J. Release of Microplastics from Urban Wastewater Treatment Plants to Aquatic Ecosystems in Acapulco, Mexico. *Water (Switzerland)*. 2023 Oct 1;15(20).
28. Lunt J, Smee DL. Turbidity alters estuarine biodiversity and species composition. *ICES Journal of Marine Science*. 2020 Jan 1;77(1):379–87.
29. Gerba CP, Pepper IL. Municipal Wastewater Treatment. In: *Environmental and Pollution Science [Internet]*. Elsevier; 2019. p. 393–418. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128147191000227>
30. Ullah Bhat S, Qayoom U. Implications of Sewage Discharge on Freshwater Ecosystems. In: *Sewage - Recent Advances, New Perspectives and Applications*. IntechOpen; 2022.
31. Ngatia L, Taylor R. Phosphorus Eutrophication and Mitigation Strategies. In: *Phosphorus - Recovery and Recycling*. IntechOpen; 2019.
32. Ngatia L, M. Grace III J, Moriasi D, Taylor R. Nitrogen and Phosphorus Eutrophication in Marine Ecosystems. In: *Monitoring of Marine Pollution*. IntechOpen; 2019.
33. Bunce JT, Ndam E, Ofiteru ID, Moore A, Graham DW. A review of phosphorus removal technologies and their applicability to small-scale domestic wastewater treatment systems. Vol. 6, *Frontiers in Environmental Science*. Frontiers Media S.A.; 2018.
34. Bai VR, Kit AC, Kangadharan G, Gopinath R, Varadarajan P, Hao AJ. Experimental study on total coliform violations in the complied NH₂CL, O₃, and UV treated municipal water supply system. *Eur Phys J Plus*. 2022 Jun 1;137(6).
35. Banseka YJ, Tume SJP. Coliform Bacteria Contamination of Water Resources and Implications on Public Health in Fako Division, South West Region, Cameroon.

- Advances in Environmental and Engineering Research. 2024 Apr 19;05(02):1–13.
36. Makuwa S, Tlou M, Fosso-Kankeu E, Green E. Evaluation of fecal coliform prevalence and physicochemical indicators in the effluent from a wastewater treatment plant in the north-west province, south africa. *Int J Environ Res Public Health*. 2020 Sep 1;17(17):1–13.
 37. Saalidong BM, Aram SA, Otu S, Lartey PO. Examining the dynamics of the relationship between water pH and other water quality parameters in ground and surface water systems. *PLoS One*. 2022 Jan 1;17(1 1).
 38. Ma J, Wu S, Shekhar NVR, Biswas S, Sahu AK. Determination of Physicochemical Parameters and Levels of Heavy Metals in Food Waste Water with Environmental Effects. *Bioinorg Chem Appl*. 2020;2020.
 39. Metcalf, Eddy I. *Wastewater Engineering. Treatment and Resource Recovery*. Fifth Edition. Los Altos, California: McGraw-Hill Education; 2014.
 40. Singh A, Sawant M, Kamble SJ, Herlekar M, Starkl M, Aymerich E, et al. Performance evaluation of a decentralized wastewater treatment system in India. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019 Jul 1;26(21):21172–88.
 41. Preisner M, Neverova-Dziopak E, Kowalewski Z. Mitigation of eutrophication caused by wastewater discharge: A simulation-based approach. *Ambio*. 2021 Feb 1;50(2):413–24.
 42. Teodosiu C, Barjoveanu G, Sluser BR, Popa SAE, Trofin O. Environmental assessment of municipal wastewater discharges: a comparative study of evaluation methods. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2016 Mar 1;21(3):395–411.
 43. Salim Dantas M, Rodrigues Barroso G, Corrêa Oliveira S. Performance of sewage treatment plants and impact of effluent discharge on receiving water quality within an urbanized area. *Environ Monit Assess*. 2021 May 1;193(5).
 44. Edokpayi JN, Odiyo JO, Durowoju OS. Impact of Wastewater on Surface Water Quality in Developing Countries: A Case Study of South Africa. In: *Water Quality*. InTech; 2017.
 45. Soto JMS, Morán RCD, Arriola NZ, Perdomo FV, Murillo ARV, Guardia PGV, et al. Physicochemical and bacteriological evaluation of the Chillón river water. *Bol Malariol Salud Ambient*. 2022 Jul 1;62(4):846–55.

XIII. ANEXOS

Anexo 1. Preparación de materiales para muestreo



Figura A- 1. Preparación de materiales para monitoreo de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

Anexo 2. Determinación de Fósforo Total



Figura A-2a. Proceso de digestión de Fósforo Total

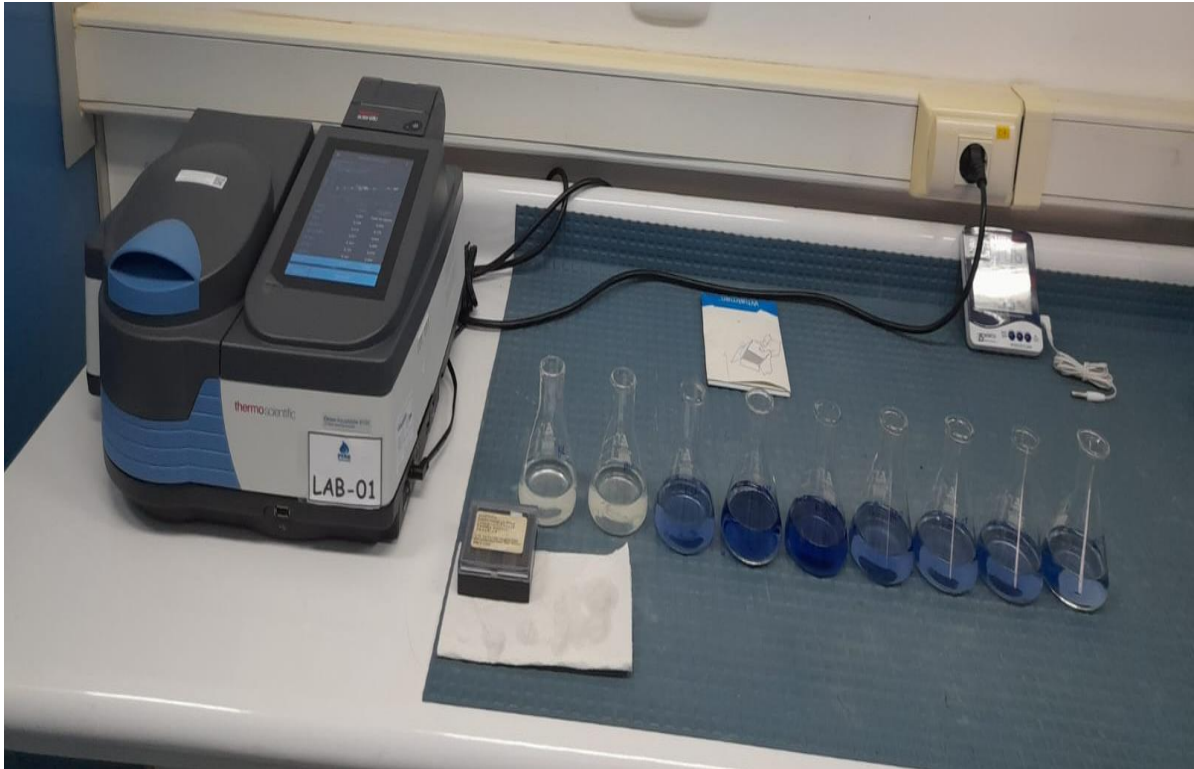


Figura A-2b. Proceso de desarrollo de color y lectura mediante espectrofotometría UV-Vis para la determinación de Fósforo Total

Anexo 3. Determinación de Nitrógeno Kjeldahl

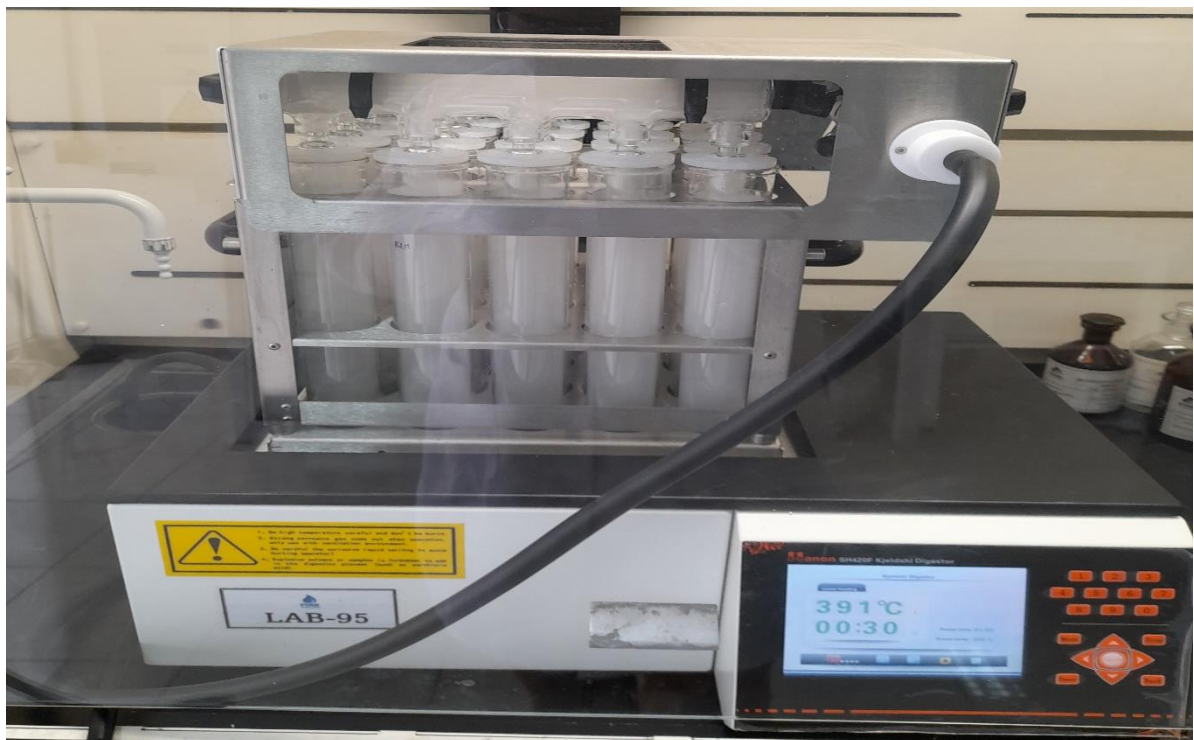


Figura A-3a. Proceso de digestión del nitrógeno Kjeldahl



Figura A-3b. Proceso de destilación del nitrógeno Kjeldahl



Figura A-3c. Lectura mediante el método de ion selectivo para la determinación de nitrógeno Kjeldahl

Anexo 4. Determinación de DQO



Figura A-4a. Proceso de digestión para la determinación de la DQO

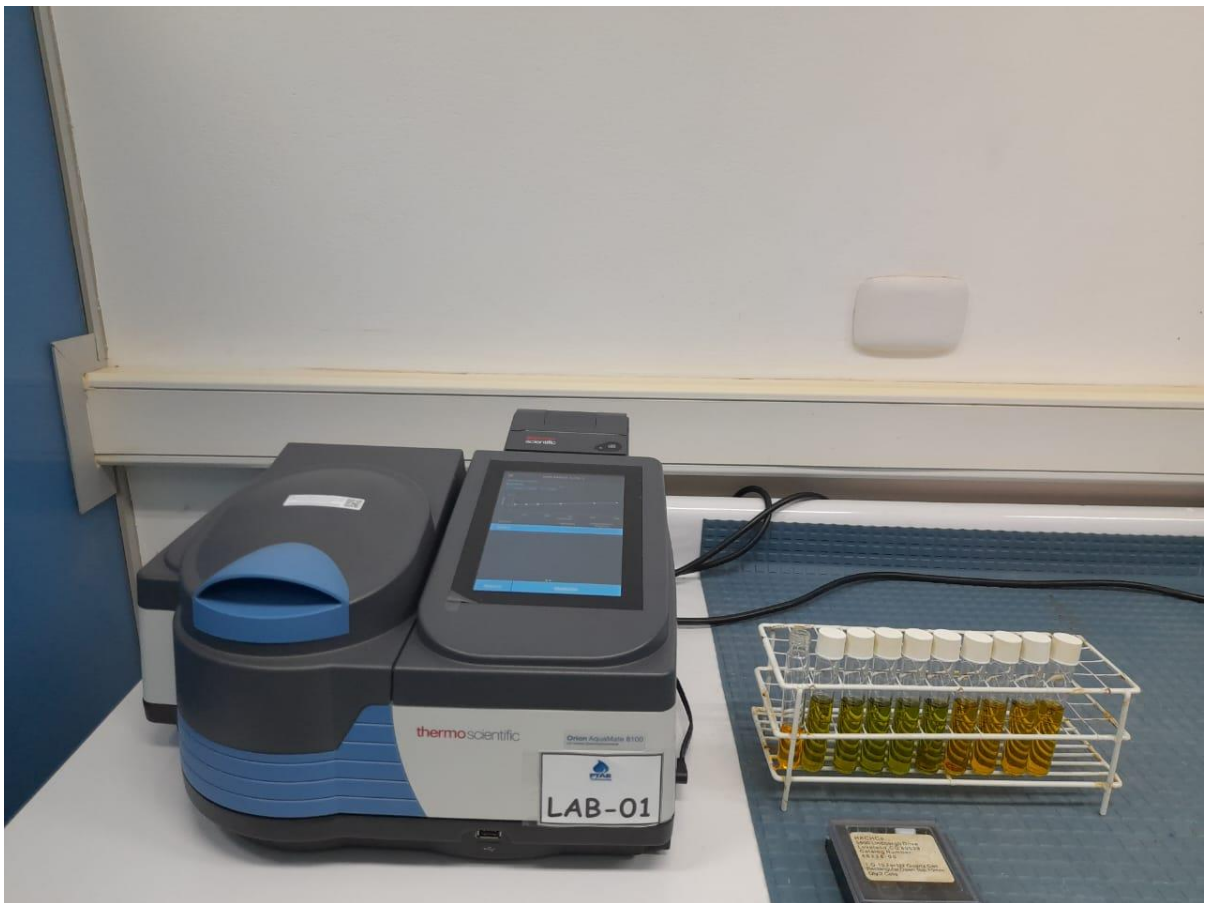


Figura A-4b. Lectura mediante espectrofotometría UV-Vis para la determinación de la DQO

Anexo 5. Determinación de SST



Figura A- 5a. Proceso de secado en estufa para la determinación de SST



Figura A- 5b. Proceso de pesaje para la determinación de SST

Anexo 6. Determinación de Cromo Hexavalente



Figura A-6a. Curva de calibración para la determinación del cromo hexavalente

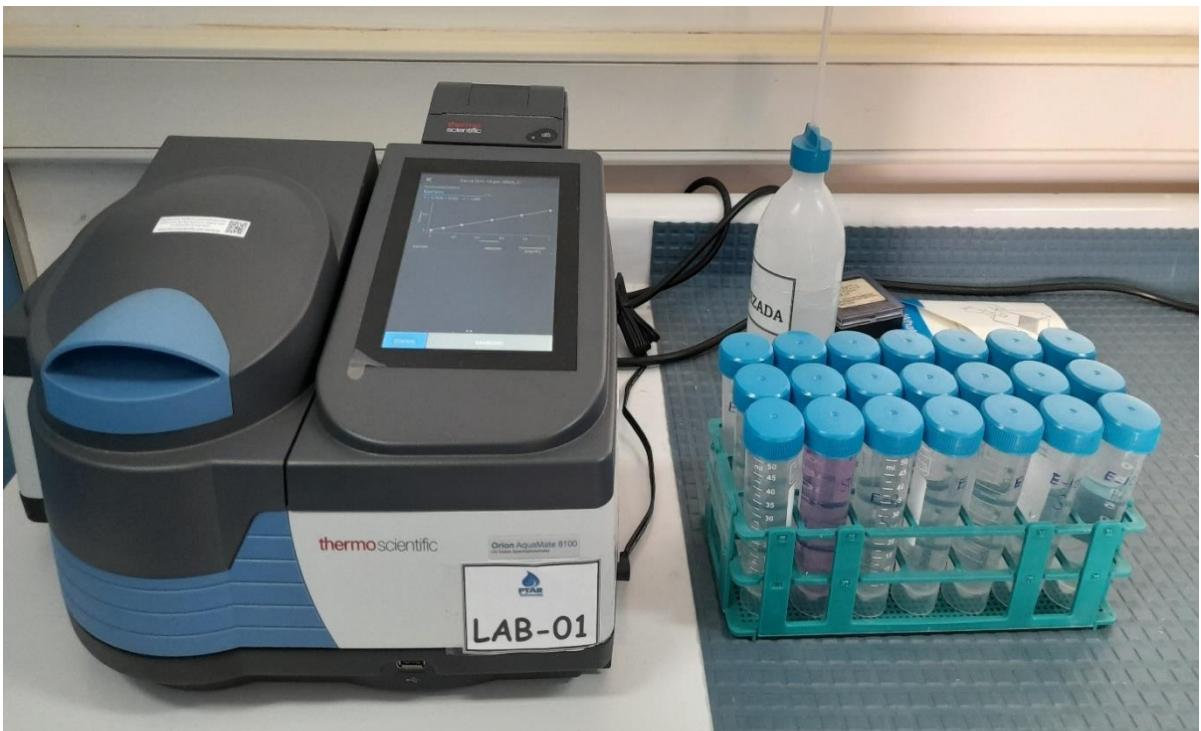


Figura A-6b. Lectura de muestras de agua de mar mediante espectrofotometría UV-Vis

Anexo 7. Determinación de Nitrógeno amoniacal



Figura A-7. Lectura de nitrógeno amoniacal mediante Electrodo de Ion Selectivo (ISE)

Anexo 8. Determinación de Turbidez



Figura A-8. Proceso de lectura de turbidez

Anexo 9. Determinación de Sólidos Sedimentables



Figura A-9. Proceso de determinación de sólidos sedimentables utilizando conos Innof

Anexo 10. Determinación de Aceites y grasas



Figura A-10a. Proceso de evaporación de hexano



Figura A-10b. Retirado de la estufa

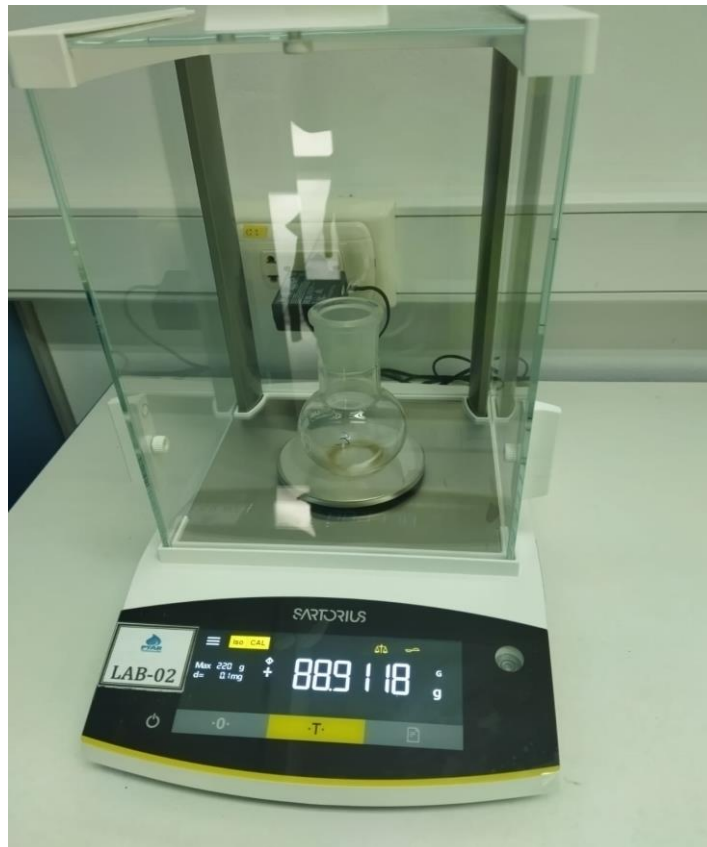


Figura A-10c. Pesaje

Anexo 11. Determinación de DBO₅

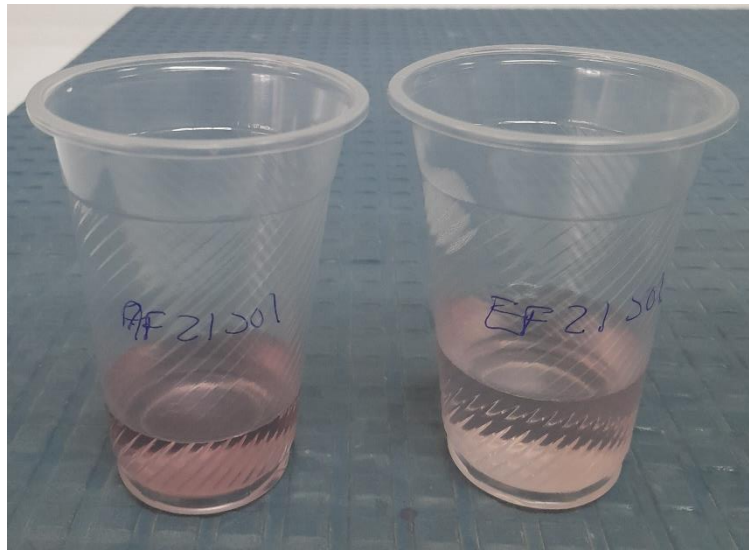


Figura A-11a. DBO₅ Soluble después del filtrado



Figura A-11b. Incubación por 5 días.



Figura A-11c. Lectura final

Anexo 12. Determinación de parámetros de campo



Figura A- 12. Determinación de pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura con multiparámetro Hach

Anexo 13. Determinación de coliformes totales y termotolerantes

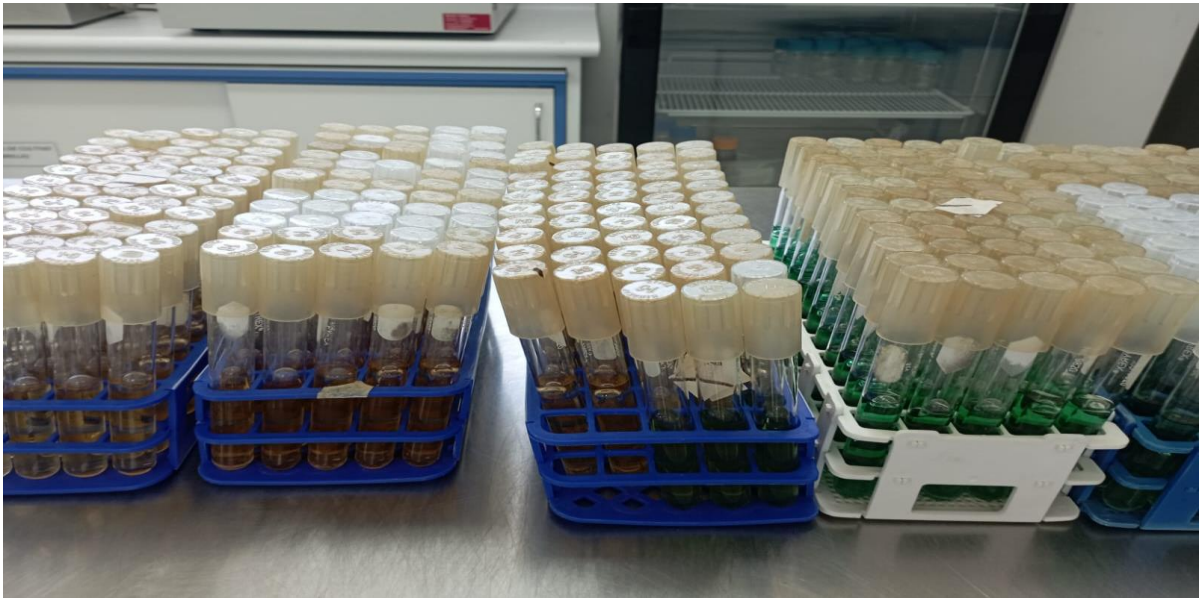


Figura A-13. Tubos inoculados con caldo Lauril Sulfato Triptosa (LST) para la detección presuntiva de coliformes y Tubos con caldo EC para la confirmación de coliformes termotolerantes

Anexo 14. Monitoreo en agua de mar



Figura A-14. Monitoreo de parámetros de campo en las estaciones de monitoreo en agua de mar