



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Optimización de las operaciones unitarias de la planta de tratamiento
de aguas residuales “Ambato” ubicada en el sector las Viñas en el
cantón Ambato**

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Ambiental

Autor:

López Olmedo Dany Diogo

Tutor:

Iván Alfredo Ríos García, Ph. D

Riobamba, Ecuador. 2026

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Dany Diogo López Olmedo**, con cédula de ciudadanía **080359152-8**, autor (a) (s) del trabajo de investigación titulado **Optimización de las operaciones unitarias de la planta de tratamiento de aguas residuales "Ambato" ubicada en el sector las Viñas en el cantón Ambato**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mi exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, a la fecha de su presentación.



Dany Diogo López Olmedo

C.I: 080359152-8

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Iván Ríos García catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **“Optimización de las operaciones unitarias de la planta de tratamiento de aguas residuales “Ambato” ubicada en el sector las Viñas en el cantón Ambato”**, bajo la autoría de Dany Diogo López Olmedo; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 09 días del mes de diciembre de 2025




PhD. Iván Ríos García
C.I.: 060188972-8

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **Optimización de las operaciones unitarias de la planta de tratamiento de aguas residuales "Ambato"** ubicada en el sector las Viñas en el cantón Ambato por Dany Diogo López Olmedo con cédula de identidad número 0803591528, bajo la tutoría de Dr. Iván Ríos García; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 5 de enero del 2026.

**María Fernanda Rivera, Mgs.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO**



**Carlos Maldonado, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



**Benito Mendoza , PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**





CERTIFICACIÓN

Que, **LOPEZ OLMEDO DANY DIOGO** con CC: **0803591528**, estudiante de la Carrera de **Ingeniería Ambiental**, Facultad de Ingeniería; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **“Optimización de las operaciones unitarias de la planta de tratamiento de aguas residuales “Ambato” ubicada en el sector las Viñas en el cantón Ambato.”**, cumple con el 5 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente, autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 18 de diciembre de 2025



Firmado electrónicamente por:
**IVAN ALFREDO RIOS
GARCIA**

Validar únicamente con FirmaEC

PhD. Iván Ríos García
TUTOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi primer hijo, quien desde antes de llegar a este mundo ya se ha convertido en mi mayor motivación, fortaleza y razón para seguir adelante. Tu existencia ha llenado mi vida de esperanza, amor y nuevos sueños, impulsándome a dar lo mejor de mí en cada paso de este camino.

A mis padres, por su apoyo incondicional, sus enseñanzas, sacrificios y palabras de aliento. Gracias por creer en mí, por guiarme con amor y por ser el pilar fundamental de mi formación personal y profesional. Todo lo que soy hoy es reflejo de su esfuerzo y dedicación.

Este logro no solo representa una meta alcanzada, sino también el fruto del amor, la perseverancia y el acompañamiento de quienes han estado a mi lado en cada etapa de mi vida.

Dany López Olmedo

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a mi tutor, por su acompañamiento constante, orientación académica y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo. Su compromiso, paciencia y experiencia fueron fundamentales para fortalecer mis conocimientos y guiarme en cada etapa del proceso. Agradezco también a los docentes que contribuyeron a mi formación profesional, brindándome herramientas teóricas y prácticas que enriquecieron mi aprendizaje. De igual manera, reconozco el apoyo de mis compañeros, amigos y familiares, quienes me ofrecieron ánimo, comprensión y motivación en los momentos de mayor exigencia. Este trabajo es el resultado no solo de un esfuerzo personal, sino también del respaldo de todas las personas que confiaron en mí y me impulsaron a seguir adelante.

Dany López Olmedo

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ANEXOS

GLOSARIO DE TÉRMINOS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I.17

1.1 INTRODUCCIÓN. 17

1.2 PROBLEMA..... 18

1.3 JUSTIFICACIÓN 19

1.4 OBJETIVOS 20

1.4.1 Objetivo General.....20

1.4.2 Objetivos Específicos21

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.21

2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES 21

2.1.1 Concepto y clasificación de las aguas residuales.....21

2.1.2 Importancia del tratamiento de aguas residuales.....22

2.1.3 Composición y características de las aguas residuales domésticas22

2.1.4 Tipos de contaminantes presentes en aguas residuales22

2.1.5 Procesos físicos, químicos y biológicos en el tratamiento.....23

2.2 Generación y características de las aguas residuales domésticas..... 24

2.3 Operaciones unitarias del tratamiento de aguas residuales domésticas 25

2.3.1	Pretratamiento	25
2.3.2	Tratamiento primario.....	26
2.3.3	Tratamiento secundario o biológico	26
2.3.4	Tratamiento terciario o avanzado	26
2.3.5	Digestión de lodos	27
2.3.6	Importancia de la optimización de operaciones unitarias	27
2.4	Caudales de diseño y variabilidad del afluente en función del crecimiento poblacional 27	
2.4.1	Caudal promedio diario (Q_{prom})	28
2.4.2	Caudal máximo diario (Q_{max})	28
2.4.3	Caudales punta horario (Q_{pico}).....	29
2.4.4	Influencia del crecimiento poblacional.....	29
2.4.5	Calidad y variabilidad del afluente	30
2.4.6	Parámetros de operación	30
2.4.7	Condiciones ambientales y climáticas	31
2.4.8	Mantenimiento y estado de los equipos	31
2.4.9	Control y monitoreo de parámetros.....	31
2.4.10	Factores humanos y gestión operativa	32
2.5	Normativa ambiental ecuatoriana aplicable al tratamiento y vertido de aguas residuales	32
2.5.1	Marco legal y regulatorio general.....	32
2.5.2	Reglamentación técnica complementaria	33
2.5.3	Control y seguimiento ambiental	34
2.5.4	Enfoque hacia la optimización y reúso	34
CAPÍTULO III. METODOLOGIA.		35
3.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	35
3.2	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	36
3.3	LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	36
3.4	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA PLANTA	38

3.5	CONDICIONES AMBIENTALES Y OPERATIVAS.....	39
3.6	RELEVANCIA DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	39
3.7	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	40
3.7.1	Técnicas de recolección	40
3.7.2	Instrumentos de medición y análisis	41
3.8	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	42
3.8.1	Fase 1: Caracterización del afluente y efluente.....	42
3.8.2	Fase 2: Evaluación de las operaciones unitarias.....	43
3.8.3	Fase 3: Propuesta de optimización técnica	45
3.8.4	Presupuesto del Rediseño	60
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		62
4.1	Caracterización fisicoquímica y biológica del agua residual afluente y efluente	62
4.1.1	Evaluación Temporal de la Eficiencia de Remoción.....	65
4.1.2	Caracterización de las Aguas residuales actuales.....	66
4.2	Evaluación del desempeño de las operaciones unitarias de la PTAR Ambato	68
4.2.1	Evaluación de Tamiz de finos	69
4.2.2	Evaluación de desarenador	70
4.2.3	Evaluación de decantador primario.....	70
4.2.4	Evaluación de Reactor Biológico.....	71
4.2.5	Evaluación de Decantador secundario	72
4.2.6	Evaluación de Cloración.....	73
4.2.7	Análisis por parámetro en la PTAR.....	74
4.3	Plan de mejora operativa y rediseño del proceso de tratamiento	77
4.3.1	Plan de Optimización Operativa y Mejora Continua de la PTAR.....	77
4.3.2	Evaluación de las oportunidades de mejora	80
4.4	Propuesta del rediseño del tratamiento biológico	81
4.4.1	Condiciones de Operación.....	81
4.4.2	Dimensiones del Reactor Biológico	82
4.4.3	Planos del rediseño del reactor biológico	83

4.4.4	Evaluación del Desempeño del Reactor	85
4.4.5	Aspectos Constructivos.....	85
4.4.6	Parámetros de diseño del SLA según metodología de cálculo propuesta.....	86
4.5	Presupuesto del volumen anóxico.....	88
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.....		92
5.1	Recomendaciones.....	93
ANEXOS.....		97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Parámetros para evaluar la calidad de agua del efluente</i>	33
Tabla 2 Límites cantonales	37
Tabla 3 Operaciones unitarias del sistema de tratamiento de aguas	38
Tabla 4 Métodos utilizados para cada parámetro.....	41
Tabla 5 Abreviaturas de los procesos de tratamiento.....	43
Tabla 6 Parámetros hidráulicos y poblacionales de diseño proyectados al año 2040.....	46
Tabla 7 <i>Datos mensuales promedio del año 2024 de las Aguas crudas y tratadas de la PTAR Ambato</i>	63
Tabla 8 <i>Caracterización de las aguas residuales (17 de julio de 2025)</i>	66
Tabla 9 Caracterización de las aguas residuales (22 de julio de 2025).....	67
Tabla 10 Caracterización de las aguas residuales (27 de julio de 2025).....	67
Tabla 11 <i>Parámetros de Tamiz de Finos</i>	69
Tabla 12 <i>Parámetros del Desarenador (27 de julio de 2025)</i>	70
Tabla 13 <i>Parámetros del Decantador primario (27 de julio de 2025)</i>	71
Tabla 14 <i>Parámetros del Reactor Biológico (27 de julio de 2025)</i>	72
Tabla 15 <i>Parámetros del Decantador secundario (27 de julio de 2025)</i>	72
Tabla 16 <i>Parámetros de la Cloración (Efluente) (27 de julio de 2025)</i>	73
Tabla 17 Evaluación de cumplimiento de parámetros con la normativa ambiental vigente.....	80
Tabla 18 <i>Análisis de Laboratorio después del tratamiento primario</i>	81
Tabla 19 <i>Condiciones de diseño y operación del reactor</i>	82
Tabla 20 <i>Dimensiones geométricas del reactor</i>	82
Tabla 21 <i>Parámetros de diseño del reactor</i>	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación geográfica de la PTAR AMBATO	38
Figura 2 Eficiencias promedio mensual del año 2024.....	65
Figura 3 <i>Diagrama de flujo de el tratamiento de agua</i>	69
Figura 4 <i>Cumplimiento normativo: Muestreo 27 de julio</i>	74
Figura 5 <i>Curvas de los parámetros que sobrepasan la normativa ambiental</i>	76
Figura 6 <i>Volumen aerobio</i>	83
Figura 7 <i>Volumen Anóxico</i>	84
Figura 8 <i>mapa de ubicación de la propuesta del reactor anóxico</i>	91

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Esquema general del proceso de tratamiento biológico por lodos activados.	97
Anexo 2 Esquema del proceso de desnitrificación en zona pre-anóxica (pre-anoxic zone denitrification)	97
Anexo 3 ESQUEMA DEL DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO	98
Anexo 4 Plano General de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ambato (PTAR Ambato)	99
Anexo 5 Punto de muestreo en cloración	100
Anexo 6 Punto de muestreo en el decantador secundario	100
Anexo 7 punto de muestreo en el reactor biológico	101
Anexo 8 punto de muestreo en la salida de tamiz de finos	101
Anexo 9 Punto de muestreo de la arqueta (salida de desarenador)	102
Anexo 10 Punto de muestreo en rejillas y pozo de gruesos	102
Anexo 11 Punto de muestreo Desarenador	103
Anexo 12 Análisis de laboratorio (N-Amónico)	103
Anexo 13 Análisis de laboratorio (Fosforo total)	104
Anexo 14 Análisis de laboratorio (Coliformes fecales)	104

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales
- DBO: Demanda biológica de oxígeno
- DQO: Demanda química oxígeno
- ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible
- OPE: Operaciones unitarias del proceso de tratamiento
- BID: Banco Interamericano de Desarrollo
- SST: Sólidos suspendidos totales
- NTK: Nitrógeno total de Kjeldahl
- TRH: Tiempo de retención hidráulica
- F/M: Relación comida con microorganismo
- OD: Oxígeno disuelto
- PH: Potencial hídrico
- LPM: Limite permisible máximo
- NPM: Número Más Probable
- SAE: Servicio de Acreditación Ecuatoriano
- RCA: Régimen de Control Ambiental
- ARCA: Agencia de Regulación y Control del Agua
- INEN: Instituto Ecuatoriano de Normalización
- EPA: Empresa municipal de agua potable y alcantarillado
- ATV-A131: Norma alemana para diseño de sistemas de lodos activados
- SLA: Sistema de lodos activos
- MLSST: Concentración de sólidos en el reactor
- IVF: El índice de volumen de fangos
- ST: Sólidos totales
- MLSS: Concentración de biomasa activa
- EBPR: Remoción Biológica de Fósforo Mejorada
- SVI: Índice Volumétrico de Lodos
- RAS: Recirculación externa de lodos
- SRT: Edad de lodos
- VD/VR: Relación de volúmenes anóx/aerobio.
- ISL: Índice de Sedimentabilidad del Lodo.

RESUMEN

La presente investigación evalúa el desempeño operativo de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Ambato, con el objetivo de analizar la eficiencia de remoción de contaminantes y proponer mejoras técnicas que permitan optimizar el tratamiento, especialmente en lo referente a la eliminación de nutrientes. El estudio se desarrolló mediante un enfoque experimental–analítico, estructurado en fases que incluyeron la caracterización del afluente y efluente, la evaluación individual de las operaciones unitarias y el planteamiento de una propuesta de optimización del sistema biológico.

La caracterización del agua residual se realizó a partir de muestreos puntuales y del análisis de información mensual correspondiente al año 2024, proporcionada por la empresa operadora EP-EMAPA-A. Los resultados evidencian un adecuado desempeño de la PTAR en la remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos y microorganismos patógenos, reflejado en altas eficiencias de DBO₅, DQO y turbidez, así como en una desinfección eficaz. No obstante, se identificaron limitaciones en la remoción de nitrógeno total Kjeldahl y fósforo total, con valores que en ciertos periodos superan los límites establecidos en la normativa ambiental vigente.

El análisis de las operaciones unitarias permitió determinar que estas deficiencias están asociadas a la configuración del reactor biológico, el cual opera únicamente bajo condiciones aerobias, sin etapas que permitan la desnitrificación. En función de estos resultados, se desarrolló un rediseño técnico del sistema biológico, considerando la incorporación de un volumen anóxico como alternativa viable para mejorar la remoción de nutrientes bajo las condiciones actuales de operación. Finalmente, la propuesta busca fortalecer la eficiencia del tratamiento, garantizar el cumplimiento normativo y asegurar la sostenibilidad operativa de la PTAR frente al crecimiento futuro del caudal y la carga contaminante.

Palabras clave: Tratamiento de aguas, PTAR Ambato, Eficiencia operativa, Rediseño técnico, Contaminación hídrica, DQO, Optimización

ABSTRACT

This research evaluates the operational performance of the Ambato Wastewater Treatment Plant (WWTP) with the aim of analyzing the efficiency of contaminant removal and proposing technical improvements to optimize treatment, especially with regard to nutrient removal. The study was developed using an experimental-analytical approach, structured in phases that included the characterization of the influent and effluent, the individual evaluation of the unit operations, and the proposal for the optimization of the biological system. The characterization of the wastewater was based on spot sampling and the analysis of monthly information for the year 2024, provided by the operating company EP-EMAPA-A. The results show that the WWTP performs adequately in removing organic matter, suspended solids, and pathogenic microorganisms, as reflected in high BOD₅, COD, and turbidity efficiencies, as well as effective disinfection. However, limitations were identified in the removal of total Kjeldahl nitrogen and total phosphorus, with values that in certain periods exceed the limits established in current environmental regulations. The analysis of the unit operations made it possible to determine that these deficiencies are associated with the configuration of the biological reactor, which operates only under aerobic conditions, without stages that allow denitrification. Based on these results, a technical redesign of the biological system was developed, considering the incorporation of an anoxic volume as a viable alternative to improve nutrient removal under current operating conditions. Finally, the proposal seeks to strengthen treatment efficiency, ensure regulatory compliance, and ensure the operational sustainability of the WWTP in the face of future growth in flow and pollutant load.



Reviewed by:
Marco Antonio Aquino
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 1753456134

CAPÍTULO I.

1.1 INTRODUCCIÓN.

El tratamiento adecuado de las aguas residuales domésticas es importante para la protección del ambiente, la salud pública y la sostenibilidad de los recursos hídricos. Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) constituyen infraestructuras fundamentales en el saneamiento básico urbano, ya que permiten remover la carga contaminante antes de la descarga final en los cuerpos receptores. Su correcta operación contribuye directamente al cumplimiento de las políticas ambientales y de gestión integral del agua (UNESCO-WWAP, 2003).

En Ecuador, las entidades responsables del manejo del recurso hídrico y del saneamiento han impulsado la construcción y operación de sistemas de tratamiento en diferentes ciudades, con resultados positivos en la reducción de contaminantes y la protección de fuentes de agua superficial y subterránea. En la sierra centro tenemos experiencias importantes como la PTAR de la comunidad Chiquicha Centro, en el cantón Pelileo, que evidencia la importancia de contar con diseños técnicos eficientes, mantenimiento adecuado y monitoreo constante que garanticen la calidad del efluente tratado (Morales et al., 2023).

La eficiencia operativa de una PTAR depende de la integración adecuada entre sus procesos unitarios, las condiciones hidráulicas de operación, la caracterización del afluente doméstico, y la gestión técnica del personal responsable. La evaluación sistemática de estos factores permite identificar oportunidades de optimización y mejora continua, asegurando el cumplimiento de los límites máximos permisibles de descarga establecidos en la normativa nacional (Rodríguez, Velastequí, 2019).

En el cantón Ambato, la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Ambato”, ubicada en el sector Las Viñas, constituye una infraestructura importante para el tratamiento de las aguas residuales domésticas generadas por la población urbana. Esta planta cumple un papel estratégico dentro del sistema de saneamiento de la ciudad, contribuyendo al mejoramiento de la calidad del agua del río Ambato y al cumplimiento del Acuerdo Ministerial N.º 097-A, que regula los parámetros de descarga en cuerpos de agua y sistemas de alcantarillado (EP-EMAPA-A, 2022).

A pesar de su adecuada operación y del cumplimiento de su función depuradora, la optimización técnica de sus operaciones unitarias resulta esencial para garantizar un desempeño estable a largo plazo, considerando factores como el crecimiento poblacional, las variaciones en la composición del afluente doméstico y la necesidad de eficiencia energética y operativa.

En este contexto, el presente trabajo de investigación tiene como propósito evaluar las operaciones unitarias de la PTAR “Ambato”, con el fin de proponer mejoras orientadas a la optimización de los procesos de tratamiento, fortaleciendo así su capacidad operativa y su contribución a la gestión sostenible del recurso hídrico en la región central del Ecuador.

Los resultados de este estudio podrán servir como base técnica para la planificación, operación y mantenimiento de la planta por parte de la Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato (EP-EMAPA-A), consolidando su compromiso con la eficiencia, sostenibilidad y protección ambiental.

1.2 PROBLEMA

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) “Ambato”, ubicada en el sector Las Viñas del cantón Ambato, cumple adecuadamente con los estándares de tratamiento y descarga establecidos por la normativa ambiental ecuatoriana. Sin embargo, desde una perspectiva técnica y académica, se identifica una oportunidad de optimización relacionada con la evaluación integral del desempeño de las operaciones unitarias que conforman la línea de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Actualmente, el monitoreo de control de calidad se concentra principalmente en los puntos de ingreso y salida del sistema, lo que permite verificar el cumplimiento normativo del efluente final, pero no proporciona información suficiente sobre la eficiencia individual de cada proceso unitario. Esta situación limita la posibilidad de analizar el comportamiento hidráulico y depurativo de las distintas unidades y, por tanto, de diseñar estrategias específicas de mejora y mantenimiento preventivo.

Cada operación unitaria como rejillas, desarenadores, sedimentadores primarios, reactores biológicos, clarificadores y digestores desempeña una función esencial en la remoción progresiva de la carga contaminante. No obstante, la ausencia de una evaluación técnica

diferenciada por unidad de proceso impide determinar con precisión el grado de eficiencia parcial, la capacidad residual y el estado operativo real de cada componente del sistema.

Esta limitación metodológica no representa una deficiencia operativa, sino una brecha técnica de información que restringe el desarrollo de un diagnóstico integral del comportamiento del tratamiento en su conjunto. A largo plazo, dicha falta de caracterización detallada podría traducirse en mayor incertidumbre en la planificación del mantenimiento, dificultades para anticipar sobrecargas hidráulicas o contaminantes y restricciones para implementar medidas de optimización energética o de proceso.

Por lo tanto, resulta prioritario realizar una evaluación integral del desempeño de las operaciones unitarias de la PTAR “Ambato”, mediante una campaña de monitoreo y análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en puntos intermedios del proceso. Este enfoque permitirá cuantificar el aporte individual de cada etapa al tratamiento global, identificar márgenes de mejora operativa y proponer lineamientos técnicos para la optimización del sistema, en el marco de una gestión sostenible y eficiente del recurso hídrico.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En la La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) “Ambato”, ubicada en el sector Las Viñas, constituye una infraestructura estratégica para la gestión sostenible del recurso hídrico y el cumplimiento de los objetivos ambientales del cantón Ambato. Su desempeño ha demostrado ser eficiente y estable, alcanzando los Límites Permisibles establecidos por la normativa ambiental ecuatoriana para la descarga de aguas tratadas, conforme al Acuerdo Ministerial N.º 097-A.

No obstante, desde un enfoque técnico y académico, resulta fundamental profundizar en el conocimiento del comportamiento hidráulico y depurativo de las distintas operaciones unitarias que conforman el sistema. El monitoreo tradicional, centrado en los puntos de entrada y salida del proceso, ofrece una visión global del cumplimiento normativo, pero no permite cuantificar la contribución específica de cada unidad al tratamiento total, ni evaluar su eficiencia interna o su potencial de optimización.

El tratamiento de aguas residuales domésticas comprende una serie de etapas interdependientes, pretratamiento, tratamiento primario, secundario y, en algunos casos,

terciario, en las cuales cada operación unitaria cumple una función esencial en la remoción progresiva de sólidos, materia orgánica, nutrientes y microorganismos patógenos. La eficiencia global del sistema depende, por tanto, de la sincronía hidráulica y funcional entre sus componentes.

En este contexto, el presente trabajo de investigación se justifica por la necesidad de realizar una evaluación técnica detallada del desempeño de las operaciones unitarias, con el fin de identificar oportunidades de optimización, fortalecer la gestión operativa y aportar información científica aplicable a la mejora continua del sistema de tratamiento.

Los principales resultados obtenidos permitirán, cuantificar la eficiencia parcial y global del proceso de depuración y proveer información de soporte técnico para la Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato (EP-EMAPA-A) en la planificación de futuras expansiones o mejoras tecnológicas.

De esta manera, la investigación aportará conocimientos aplicables al campo del saneamiento ambiental, fortaleciendo la sostenibilidad operativa de la PTAR “Ambato” y contribuyendo al manejo responsable del recurso hídrico en la región central del Ecuador.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Optimizar las operaciones unitarias de la planta de tratamiento de aguas residuales “Ambato” ubicada en el sector las Viñas en el cantón Ambato.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las aguas residuales de la planta de tratamiento “Ambato” mediante un análisis fisicoquímico y biológico, para identificar las principales características de los afluentes, su variabilidad en función de las actividades urbanas e industriales.
- Evaluar el desempeño de las operaciones unitarias y los procesos de tratamiento en la PTAR, comparando sus resultados con los parámetros establecidos por la normativa ambiental vigente, para identificar áreas críticas y posibles mejoras que optimicen la eficiencia de los procesos operativos y reduzcan el riesgo de fallos o incumplimiento normativo.
- Proponer un rediseño técnico de los procesos de tratamiento de la planta, orientado a incrementar la eficiencia operativa, mejorar la calidad de los efluentes vertidos y asegurar el cumplimiento con los estándares normativos para la protección ambiental y la salud pública.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

2.1.1 Concepto y clasificación de las aguas residuales

Las aguas residuales son aquellas que han sido utilizadas en actividades domésticas, industriales o de servicios, y presentan modificaciones en sus características físicas, químicas o biológicas como resultado de dichos usos. En el caso de este estudio, se focaliza en las aguas residuales domésticas, que provienen principalmente de viviendas (baños, cocinas, lavanderías) y contienen materia orgánica biodegradable, nutrientes, sólidos y microorganismos patógenos. Estas aguas pueden clasificarse, según su origen y características, en domésticas, industriales, pluviales o mixtas, lo que permite diseñar procesos de tratamiento adaptados a su naturaleza (Koul et al., 2022).

2.1.2 Importancia del tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales es esencial para la protección del medio ambiente, la salud pública y la gestión sostenible del recurso hídrico. La liberación de efluentes sin tratamiento o con tratamiento insuficiente puede provocar contaminación de cuerpos de agua, eutrofización y riesgos sanitarios. Según el informe de UN-Water de 2024, en 2022 se generaron aproximadamente 268 000 millones m³ de aguas residuales domésticas en todo el mundo, de los cuales sólo un porcentaje fue tratado de forma segura.

En el ámbito académico-técnico, se reconoce que un enfoque de tratamiento eficiente no solo debe asegurar el cumplimiento normativo del efluente final, sino también optimizar internamente los procesos unitarios para garantizar sostenibilidad operativa y energética a mediano y largo plazo (Silva, 2023).

2.1.3 Composición y características de las aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domésticas presentan una composición variable, influenciada por el número de habitantes, el consumo de agua per cápita, hábitos de uso de agua y condiciones climáticas. Conforme a revisiones recientes, los parámetros típicos incluyen DBO (demanda bioquímica de oxígeno), DQO (demanda química de oxígeno), sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno y fósforo, así como coliformes totales y fecales (Koul et al., 2022).

En contextos urbanos en países en desarrollo, se ha observado que la carga orgánica y de nutrientes requieren especial atención en el dimensionamiento y diseño de las operaciones unitarias para asegurar que la planta tenga la capacidad de responder a la variabilidad diaria y estacional de los caudales.

2.1.4 Tipos de contaminantes presentes en aguas residuales

Los principales contaminantes en aguas residuales domésticas se pueden agrupar en:

Contaminantes físicos: sólidos suspendidos, arenas, aceites y grasas.

Contaminantes químicos: materia orgánica disuelta o coloidal, nitrógeno, fósforo, detergentes, metales traza.

Contaminantes biológicos: bacterias, virus, protozoos, helmintos. Según la revisión de Koul et al. (2002), la mayoría de los flujos residuales domésticos contienen más del 99 % de agua por volumen y cantidades relativamente pequeñas de contaminantes que pueden alterar significativamente la calidad del efluente si no se tratan adecuadamente.

La correcta remoción de estos contaminantes exige una serie de etapas y operaciones unitarias coordinadas, así como un monitoreo técnico detallado y continuo (Sosa, 2018).

2.1.5 Procesos físicos, químicos y biológicos en el tratamiento

El tratamiento de aguas residuales domésticas típicamente se estructura en una secuencia de procesos que actúan de manera complementaria:

Procesos físicos: tamizado, desarenado, sedimentación primaria, que remueven sólidos gruesos y arenas. La fase de pretratamiento puede eliminar hasta 25 % de la carga orgánica en algunos sistemas (Koul et al., 2022).

Procesos químicos: coagulación-floculación, precipitación, desinfección, que ayudan a eliminar partículas finas, metales o patógenos cuando sean necesarios.

Procesos biológicos: reactores aeróbicos o anaeróbicos, filtros biológicos, lagunas activas, que degradan la materia orgánica biodegradable y reducen nutrientes. Estudios recientes han analizado sistemas de tratamiento de aguas residuales de tipo “constructed wetlands” (humedales construidos) para la eficiencia en plantaciones domésticas.

La optimización de las operaciones unitarias requiere no solo entender cada proceso por separado, sino también sus interacciones hidráulicas y físicas (tiempo de retención, carga

orgánica específica, temperatura, etc.) y evaluar su eficiencia individual para garantizar el desempeño global de la planta (Silva, 2023). Adicionalmente, los desarrollos recientes en recuperación de recursos (biogás, fósforo, nutrientes) muestran que las plantas de tratamiento modernas no solo deben cumplir los estándares de descarga, sino integrarse en una lógica de economía circular. El estudio “Resources recovery from domestic wastewater by a combined process: anaerobic digestion and membrane photobioreactor” publicado en 2024 analizó un sistema combinado anaeróbico + membrana/fotobiorreactor para recuperación de biomasa y nutrientes (Ferrera et al., 2024)

Este enfoque de optimización aplica directamente al objetivo de esta investigación, evaluar y optimizar operaciones unitarias, ya que proporciona el marco conceptual para diagnosticar, medir y mejorar cada etapa de tratamiento en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ambato.

2.2 Generación y características de las aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domésticas son aquellas generadas principalmente por las actividades diarias de los hogares, tales como la higiene personal, la preparación de alimentos, la limpieza y el lavado de ropa o utensilios. Estas aguas constituyen una mezcla de efluentes provenientes de inodoros, duchas, lavamanos, cocinas y lavanderías, las cuales contienen una variedad de contaminantes de origen orgánico e inorgánico (Rodríguez & Méndez, 2021).

La generación de aguas residuales domésticas está estrechamente relacionada con el crecimiento poblacional, los patrones de consumo y el acceso a los servicios de agua potable. En zonas urbanas con mayor densidad demográfica, el volumen de aguas residuales tiende a incrementarse proporcionalmente con el aumento de la dotación de agua y el desarrollo de las actividades urbanas (Cisneros et al., 2022)

Más del 80 % de las aguas residuales generadas en el mundo retorna a los cuerpos receptores sin un tratamiento adecuado, lo que refuerza la necesidad de fortalecer los sistemas de depuración y su gestión técnica (Organización de las Naciones Unidas – ONU-Agua, 2023).

Desde el punto de vista técnico, la composición de las aguas residuales domésticas incluye materia orgánica biodegradable (expresada como DBO₅ y DQO), sólidos suspendidos totales, nutrientes como nitrógeno y fósforo, grasas, aceites, detergentes y microorganismos

patógenos. La proporción de estos componentes varía dependiendo del tipo de asentamiento, hábitos de consumo y condiciones socioeconómicas de la población servida (Jiménez et al., 2021).

El rango típico de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) en aguas residuales domésticas oscila entre 200 y 400 mg/L, mientras que los sólidos suspendidos totales (SST) varían entre 150 y 350 mg/L. Estos valores son fundamentales para el diseño y operación de las plantas de tratamiento, ya que determinan la carga orgánica a remover en cada unidad de proceso (BID, 2022).

El análisis de las características fisicoquímicas y microbiológicas del afluente doméstico permite establecer estrategias de tratamiento más eficientes, garantizando la remoción de contaminantes de acuerdo con los límites establecidos por la normativa ambiental ecuatoriana (Acuerdo Ministerial 097-A, 2015) y los estándares internacionales de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022). En el caso de la PTAR de Ambato, la caracterización de los afluentes domésticos resulta esencial para mantener la eficiencia de los procesos biológicos y asegurar el cumplimiento de los parámetros normativos de vertido.

2.3 Operaciones unitarias del tratamiento de aguas residuales domésticas

Las operaciones unitarias constituyen la columna vertebral del tratamiento de aguas residuales, ya que cada etapa cumple una función específica para reducir contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el afluente. La eficiencia global de una planta de tratamiento depende del desempeño coordinado de estas unidades, su operación óptima y el mantenimiento preventivo constante (Koul et al., 2022).

2.3.1 Pretratamiento

El pretratamiento tiene como objetivo remover sólidos gruesos, arenas y objetos flotantes que podrían afectar el funcionamiento de las etapas posteriores. Las unidades más comunes incluyen:

Rejas y tamices: eliminan sólidos grandes como plásticos, fibras y objetos flotantes.

Desarenadores: separan arenas y partículas pesadas que podrían sedimentar en los reactores biológicos.

Desengrasadores: remueven grasas y aceites que afectan la eficiencia de los procesos biológicos.

Estas operaciones protegen las unidades posteriores, evitan obstrucciones y reducen la carga orgánica inicial (Silva, 2023).

2.3.2 Tratamiento primario

El tratamiento primario se enfoca en la remoción física de sólidos sedimentables mediante sedimentadores primarios o clarificadores. En esta etapa se reduce entre un 30–40 % de la DBO y 50–60 % de los sólidos suspendidos totales. El objetivo es disminuir la carga contaminante que llegará a los procesos biológicos, optimizando así la eficiencia del tratamiento secundario (Jiménez et al., 2021).

2.3.3 Tratamiento secundario o biológico

El tratamiento secundario emplea procesos biológicos para degradar la materia orgánica biodegradable y nutrientes presentes en el agua residual. Las operaciones unitarias más comunes incluyen:

Reactores biológicos aerobios: como lodos activados, filtros percoladores o reactores de lecho móvil, donde los microorganismos degradan la materia orgánica disuelta y coloidal.

Lagunas de estabilización: sistemas de tratamiento de bajo costo que utilizan procesos aeróbicos, facultativos o anaeróbicos, adecuados para zonas con menor densidad poblacional.

La eficiencia de esta etapa depende de factores operativos como el tiempo de retención hidráulica, la relación DBO/DQO y la concentración de biomasa, permitiendo alcanzar reducciones de DBO₅ superiores al 85 % en sistemas bien operados (Jiménez et al., 2021).

2.3.4 Tratamiento terciario o avanzado

El tratamiento terciario o avanzado se aplica cuando se requiere remover nutrientes residuales (N y P), sólidos finos o patógenos para cumplir con los estándares de vertido más estrictos. Las operaciones unitarias incluyen:

Filtración por arena o membranas, que eliminan sólidos finos y microorganismos.

Coagulación-floculación química, para precipitar partículas coloidales y fósforo.

Desinfección, mediante cloración, ozonización o radiación UV, garantizando la reducción de coliformes y otros patógenos (Koul et al., 2022).

2.3.5 Digestión de lodos

El tratamiento de lodos generados en los procesos primario y secundario es fundamental para la sostenibilidad operativa. Las operaciones incluyen:

Digestión anaeróbica o aeróbica, para estabilizar la materia orgánica y reducir patógenos.

Deshidratación y secado, facilitando el manejo y disposición final de los lodos. La optimización de estas unidades contribuye a la reducción de olores, mejora la eficiencia de la planta y permite la recuperación de recursos, como biogás o fertilizantes (Silva, 2023).

2.3.6 Importancia de la optimización de operaciones unitarias

- La optimización de cada unidad de proceso permite:
- Incrementar la eficiencia de eliminación de contaminantes.
- Reducir costos operativos y consumo energético.
- Garantizar el cumplimiento de los límites normativos de descarga.
- Prolongar la vida útil de los equipos y estructuras de la planta.

En el contexto de la PTAR de Ambato, la evaluación técnica y monitoreo de cada operación unitaria proporcionará información clave para diseñar estrategias de mejora continua, ajustar los parámetros operativos y asegurar un tratamiento sostenible de las aguas residuales domésticas (Ferrera et al., 2024; Silva, 2023).

2.4 Caudales de diseño y variabilidad del afluente en función del crecimiento poblacional

El diseño y operación eficiente de una planta de tratamiento de aguas residuales requiere conocer los caudales promedio y máximos que ingresan al sistema, así como su variabilidad a lo largo del tiempo. Los caudales dependen principalmente de la cantidad de población servida, el consumo de agua per cápita y los hábitos de disposición de aguas residuales, además de factores climáticos como precipitaciones e infiltración (Koul et al., 2022).

2.4.1 Caudal promedio diario (Q_{prom})

El caudal promedio diario representa el flujo medio de aguas residuales que la planta debe tratar durante un día típico. Para aguas residuales domésticas, se calcula mediante la expresión:

$$Q_{prom} = \frac{P * D}{86400} \quad (1)$$

donde:

$$Q_{prom} = (\text{m}^3/\text{día})$$

P = Población

D = Dotación

En contextos urbanos latinoamericanos, el consumo per cápita suele variar entre 120 y 200 L/hab·d, dependiendo del desarrollo económico, disponibilidad de agua y hábitos culturales. Este parámetro es clave para dimensionar los procesos primarios y secundarios, así como los tanques de retención y sedimentadores (Cisneros et al., 2022).

2.4.2 Caudal máximo diario (Q_{max})

El caudal máximo diario considera los picos de entrada de agua residual, que pueden superar varias veces el caudal promedio. Este valor se estima con base en un factor de cresta (K_c), que depende de la población y del sistema de alcantarillado:

$$Q_{max} = Q_{prom} * K_c \quad (2)$$

donde:

K_c = Factor de mayoración

Q_{max} = Caudal máximo diario

Q_{prom} = Caudal promedio

Para poblaciones menores a 50.000 habitantes, K_c típicamente varía entre 1,5 y 2,0. El cálculo del caudal máximo asegura que la planta pueda operar de manera continua sin riesgo de desbordes o sobrecargas hidráulicas en los procesos unitarios (Jiménez et al., 2021).

2.4.3 Caudales punta horario (Q_{pico})

Además del caudal máximo diario, es importante considerar los caudales punta horario, que reflejan las fluctuaciones intra-diarias. Se determinan a partir de curvas unitarias de generación de aguas residuales y permiten evaluar la capacidad de los sistemas de pretratamiento y tratamiento primario en periodos de alta demanda (Ferrera et al., 2024)

$$Q_{pico} = K_h \times Q_{prom} \quad (3)$$

donde K_h = factor de punta horario (generalmente 1,8–2,5 para aguas residuales domésticas urbanas).

2.4.4 Influencia del crecimiento poblacional

El crecimiento poblacional impacta directamente en la generación de aguas residuales y en la capacidad requerida de la planta. Estudios recientes en Latinoamérica muestran que incrementos poblacionales de 2–3 % anual pueden generar aumentos significativos en la carga hidráulica y orgánica de las PTAR, especialmente si no se implementan estrategias de gestión de la demanda de agua (Guevara et al., 2020). Para planificar la expansión o ajustes operativos de la PTAR de Ambato, se deben considerar proyecciones poblacionales y estimaciones de consumo per cápita, aplicando factores de crecimiento demográfico al caudal promedio y máximo:

$$Q_{futuro} = Q_{actual} \times (1 + g)^t \quad (4)$$

donde:

Q_{futuro} = caudal proyectado ($m^3/día$)

g = tasa de crecimiento poblacional anual (%)

t = número de años proyectado

Esta metodología permite dimensionar con precisión las unidades de tratamiento, evitando sobrecargas hidráulicas y garantizando la eficiencia operativa a largo plazo (Silva, 2023). Factores que afectan la eficiencia de las operaciones unitarias en el tratamiento de aguas residuales domésticas

El rendimiento global de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) depende directamente de la eficiencia individual y sinérgica de sus operaciones unitarias, las cuales transforman gradualmente un efluente contaminado en un vertido que cumple los límites normativos. La eficiencia de cada unidad está influenciada por factores físicos, químicos, biológicos y operativos que deben controlarse sistemáticamente para garantizar un tratamiento estable y sostenible (Sha et al., 2024).

2.4.5 Calidad y variabilidad del afluente

La composición del agua residual doméstica puede variar significativamente según la densidad poblacional, hábitos de consumo, infiltraciones pluviales y aportes industriales no controlados. Estas variaciones inciden en la carga contaminante y pueden generar desequilibrios hidráulicos o biológicos en las unidades de tratamiento (Koul et al., 2022).

Un incremento abrupto en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) o en la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) puede saturar los sedimentadores primarios o alterar la biomasa en los reactores biológicos. Por ello, se recomienda un monitoreo continuo del afluente y la aplicación de coeficientes de amortiguamiento o ecualización para homogenizar los caudales y cargas entrantes (Ferrera et al., 2024).

2.4.6 Parámetros de operación

Los parámetros hidráulicos y de carga orgánica influyen directamente en la eficiencia de las unidades de tratamiento:

Tiempo de retención hidráulica (TRH): un TRH insuficiente reduce el contacto entre el agua residual y la biomasa, mientras que un exceso incrementa los costos energéticos.

Tasa de carga orgánica ($\text{kg DBO}_5/\text{m}^3 \cdot \text{día}$): niveles fuera del rango de diseño afectan la estabilidad del proceso biológico.

Relación F/M (alimento/microorganismo): valores inadecuados provocan flóculos débiles o lodos no sedimentables en los reactores biológicos.

Tasa de recirculación de lodos: controla la concentración de sólidos y la eficiencia de clarificación.

La optimización de estos parámetros permite alcanzar una remoción eficiente de DBO₅ (> 85 %) y SST (> 90 %) sin comprometer la estabilidad operativa (Silva, 2023).

2.4.7 Condiciones ambientales y climáticas

La temperatura y la disponibilidad de oxígeno disuelto (OD) son variables críticas. Los procesos biológicos aerobios operan de manera óptima entre 20 °C y 35 °C, mientras que la eficiencia disminuye significativamente por debajo de 15 °C debido a la reducción en la actividad metabólica de los microorganismos (Liu et al., 2024). En sistemas abiertos, la radiación solar y las lluvias influyen sobre la dilución del afluente y la concentración de contaminantes. Por tanto, el diseño debe considerar cubiertas, sistemas de aireación regulables y mecanismos de control de caudal para mitigar estas variaciones estacionales (Sosa, 2018).

2.4.8 Mantenimiento y estado de los equipos

El mantenimiento preventivo es esencial para garantizar la continuidad del servicio y la eficiencia del tratamiento. La acumulación de sólidos, corrosión o fallas en bombas, aireadores y compuertas puede ocasionar pérdidas de carga hidráulica y alteraciones en la aireación. La implementación de planes de mantenimiento predictivo, basados en indicadores de vibración, consumo energético y tiempo de operación, permite anticipar fallos y extender la vida útil de los equipos (Castillo et al., 2025).

En el contexto de la PTAR de Ambato, la aplicación de un programa de mantenimiento sistemático contribuye a conservar la eficiencia actual y sustentar los procesos de optimización técnica planteados en esta investigación.

2.4.9 Control y monitoreo de parámetros

El monitoreo en tiempo real de variables como pH, temperatura, OD, DBO₅, DQO y SST permite ajustar las condiciones operativas para mantener la eficiencia del tratamiento. La

adopción de tecnologías de control automático y sensores en línea mejora la precisión de las mediciones y facilita la detección temprana de desviaciones (Sha et al., 2024).

Los sistemas modernos de monitoreo integran modelos predictivos, que permiten optimizar la aireación, recirculación y dosificación de reactivos, reduciendo costos energéticos hasta en un 25 % y mejorando la estabilidad del efluente tratado (Liu et al., 2024).

2.4.10 Factores humanos y gestión operativa

La capacitación del personal técnico es un factor determinante para el rendimiento de las PTAR. La interpretación inadecuada de datos o la manipulación incorrecta de equipos puede reducir la eficiencia del proceso o generar incumplimientos normativos. Por ello, la gestión operativa debe incluir programas de formación continua, protocolos de seguridad industrial y manuales de operación actualizados, especialmente en plantas de mediana y gran escala como la de Ambato (Comisión Nacional del Agua, 2019).

2.5 Normativa ambiental ecuatoriana aplicable al tratamiento y vertido de aguas residuales

El tratamiento y la disposición final de las aguas residuales en Ecuador se rigen por un marco normativo integral orientada a prevenir la contaminación hídrica, proteger la salud pública y asegurar la sostenibilidad ambiental. Estas regulaciones establecen los parámetros de calidad que deben cumplir los efluentes tratados, las obligaciones de monitoreo y los mecanismos de control por parte de las autoridades competentes, como el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE).

2.5.1 Marco legal y regulatorio general

El principal cuerpo legal que regula la gestión de aguas residuales en el país es el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), actualizado mediante Acuerdo Ministerial No. 061 del 2015 y reformado posteriormente en 2021. Este instrumento define los Límites Máximos Permisibles (LMP) para el vertido de efluentes líquidos a cuerpos de agua y al suelo, diferenciando entre descargas domésticas, industriales y municipales (Ministerio del Ambiente, 2021).

El TULSMA establece que toda descarga debe cumplir con parámetros fisicoquímicos y biológicos que garanticen que el efluente no afecte las propiedades del cuerpo receptor. Entre los principales límites para descargas domésticas se consideran:

Tabla 1 Parámetros para evaluar la calidad de agua del efluente

Parámetro	Unidad	Límite Máximo Permisible
Coliformes Fecales NMP	NMP/100 ml	2000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	200
Fósforo Total (P)	mg/l	10,0
Potencial de Hidrógeno	Unidades de PH	6-9
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/l	130
Sólidos totales (ST)	mg/l	1 600
Turbiedad	NTU	100
Oxígeno disuelto	mg/l	<6
Temperatura	°C	Condición natural \pm 3
Tensoactivos	mg/l	0,5
Cloro Activo	mg/l	0,5
Nitrógeno amoniacal	mg/l	30,0
Nitrógeno total Kjeldahl	mg/l	50,0

Nota: Acuerdo Ministerial 097^a tabla 9 “Limite de descarga a un cuerpo de agua dulce”.

2.5.2 Reglamentación técnica complementaria

Además del TULSMA, se aplican otras normativas relacionadas con el diseño, operación y control de las PTAR:

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2200:2017: establece criterios para el diseño hidráulico y sanitario de sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales domésticas.

Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (LORHUyAA, 2014): reconoce al agua como un bien público y establece que el tratamiento y reúso de las aguas residuales deben ser parte de la gestión integral de recursos hídricos.

Acuerdo Ministerial No. 009-A : determina los requisitos para el registro ambiental de plantas de tratamiento, incluyendo la presentación de informes técnicos y resultados de monitoreo semestrales.

Estas normativas promueven el tratamiento previo obligatorio antes del vertido y fomentan el reúso controlado de aguas tratadas en riego, limpieza urbana o recarga de acuíferos, siempre que cumplan los límites establecidos.

2.5.3 Control y seguimiento ambiental

El cumplimiento normativo es verificado mediante monitoreos periódicos de los efluentes, realizados por los operadores de las PTAR o por laboratorios acreditados ante el Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE).

El MAATE exige reportes técnicos semestrales que incluyan la caracterización de parámetros básicos (pH, SST, DBO₅, DQO, grasas y aceites, coliformes fecales) y la comparación con los límites del TULSMA. En caso de incumplimientos reiterados, se aplican medidas administrativas o sanciones según el Régimen de Control Ambiental (RCA) vigente (MAATE, 2023).

La automatización de registros y el uso de sistemas de información ambiental (SUIA) han permitido mejorar la trazabilidad de los datos y la transparencia en la gestión de los efluentes. Esto facilita el seguimiento técnico de plantas municipales como la PTAR de Ambato, que mantiene un cumplimiento sostenido de la normativa ambiental ecuatoriana mediante la operación continua de sus unidades de tratamiento físico-biológicas.

2.5.4 Enfoque hacia la optimización y reúso

En el marco de la Agenda Nacional de Agua Potable y Saneamiento (2022–2030), el MAATE impulsa la modernización de las PTAR municipales, priorizando tecnologías de

eficiencia energética, reúso de efluentes tratados y aprovechamiento de biosólidos. El reúso de aguas residuales tratadas constituye una alternativa estratégica para reducir la presión sobre fuentes naturales y fortalecer la seguridad hídrica urbana y agrícola. Para ello, los efluentes deben cumplir con los estándares de calidad establecidos en la Norma NTE INEN 1108:2021 para usos agrícolas o recreativos (INEN, 2021).

El fortalecimiento normativo ha contribuido a consolidar una visión integral de la gestión de las aguas residuales, vinculando la operación técnica de las plantas con los objetivos de sostenibilidad ambiental, eficiencia y salud pública.

CAPÍTULO III. METODOLOGIA.

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente estudio se enmarca en un enfoque cuantitativo, dado que se fundamenta en la medición, análisis y comparación de variables fisicoquímicas y biológicas asociadas al desempeño de las operaciones unitarias que conforman la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) “Ambato”. Este enfoque permite obtener resultados objetivos, verificables y reproducibles, a partir de la aplicación de metodologías estandarizadas para la evaluación técnica de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas.

El carácter cuantitativo de la investigación se evidencia en la aplicación de métodos experimentales de laboratorio y mediciones in situ, que permiten determinar la eficiencia de remoción de contaminantes en cada etapa del proceso depurativo. Los parámetros evaluados como pH, temperatura, sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), grasas y aceites, y coliformes fecales,

constituyen indicadores para la interpretación del comportamiento hidráulico y biológico de las unidades de tratamiento.

En cuanto a su propósito, la investigación es de tipo aplicada, ya que busca generar resultados con utilidad práctica directa para la gestión operativa y técnica de la PTAR. A través de la caracterización, evaluación y posterior propuesta de optimización, se pretende fortalecer la eficiencia del sistema de tratamiento y contribuir a la mejora continua del proceso, garantizando la sostenibilidad operativa y el cumplimiento de la normativa ambiental ecuatoriana vigente.

El estudio presenta un alcance descriptivo y explicativo. Es descriptivo porque documenta de manera sistemática el comportamiento de los parámetros de calidad del agua en los distintos puntos de muestreo a lo largo del sistema de tratamiento. A la vez, es explicativo porque analiza la relación entre el funcionamiento hidráulico y biológico de las operaciones unitarias, identificando los factores que influyen en la variación de su eficiencia depurativa y en la calidad final del efluente tratado.

3.2 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El diseño metodológico de la presente investigación se estructura de manera no experimental, transversal y correlacional, orientado a la observación y análisis del comportamiento de las variables de calidad del agua en diferentes etapas del proceso de tratamiento, sin manipular las condiciones operativas de la planta.

La elección de este diseño responde a la necesidad de evaluar el desempeño técnico de las operaciones unitarias bajo condiciones reales de funcionamiento, con el fin de identificar oportunidades de optimización basadas en evidencias cuantitativas y comparativas.

El estudio se desarrolló en tres fases principales, articuladas con los objetivos específicos de la investigación:

3.3 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La investigación se desarrolló en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) “Ambato”, infraestructura administrada por la Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato (EP-EMAPA-A). Esta planta constituye la instalación más importante

de depuración de aguas residuales domésticas del cantón Ambato y una de las principales del centro del país, al tratar el efluente generado por la zona urbana y parte de las parroquias adyacentes.

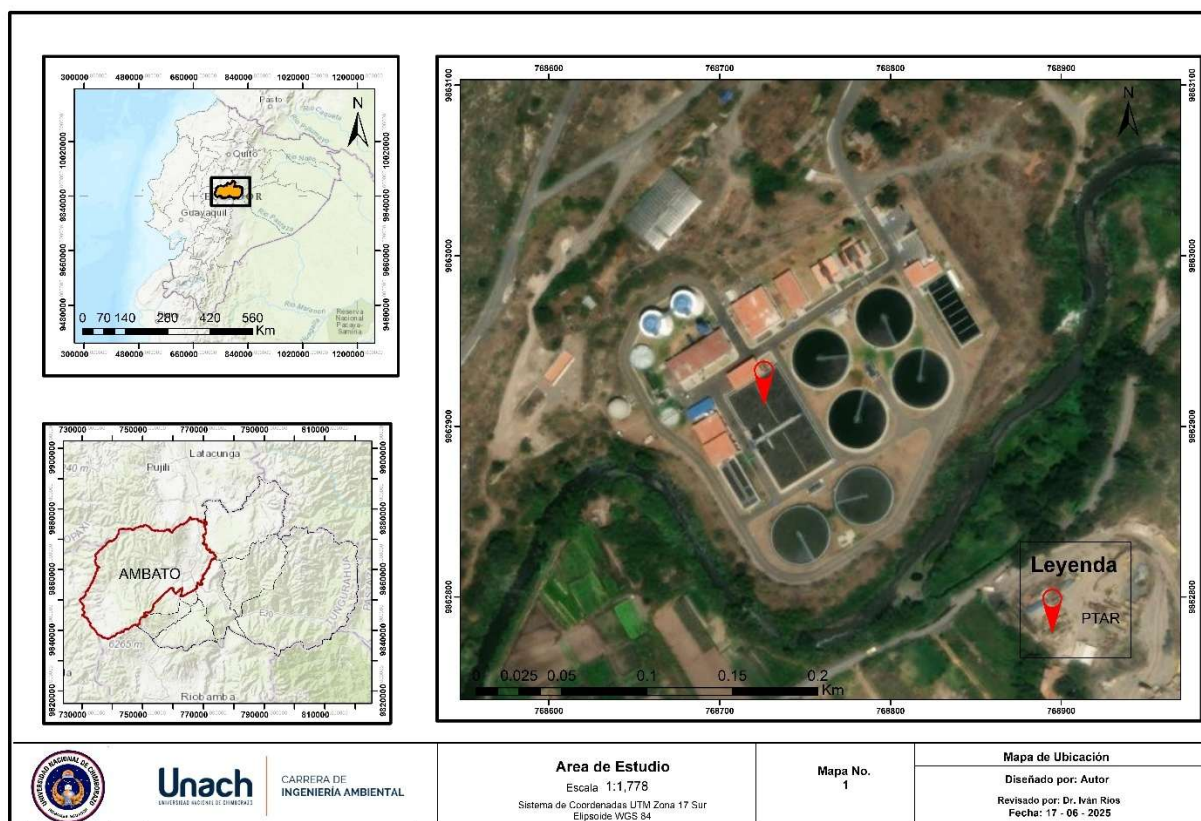
La PTAR se encuentra localizada en el sector Las Viñas, al suroeste de la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua, Ecuador, aproximadamente a las coordenadas geográficas 01°16'53" S y 78°38'42" O, a una altitud promedio de 2.540 m s. n. m. Su emplazamiento fue seleccionado estratégicamente por la topografía favorable y la disponibilidad de un cuerpo receptor natural, que permite la descarga controlada del efluente tratado conforme a la normativa ambiental ecuatoriana.

Tabla 2 Límites cantonales

Dirección	Límites Cantonales y Provinciales
Norte	Quero & Pelileo, Tungurahua
Sur	Mocha, Tungurahua
Este	Patate, Tungurahua
Oeste	Píllaro & Tisaleo, Tungurahua

Nota. En esta tabla se encuentran descrito los límites cantonales y provinciales del cantón Ambato para cada punto cardinal.

Figura 1 Ubicación geográfica de la PTAR AMBATO



Fuente: Autor

3.4 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA PLANTA

La PTAR “Ambato” está diseñada para el tratamiento de aguas residuales domésticas provenientes del sistema de alcantarillado sanitario de la ciudad. Su operación responde a un esquema mixto de tratamiento físico, biológico y digestión anaerobia de lodos, con una capacidad instalada de aproximadamente 760 L/s, lo que equivale al tratamiento de las aguas residuales generadas por una población cercana a 230.000 habitantes equivalentes.

El sistema de tratamiento está constituido por las siguientes operaciones unitarias principales (Ver Anexo 4):

Tabla 3 Operaciones unitarias del sistema de tratamiento de aguas

Proceso	Descripción técnica
---------	---------------------

Pretratamiento	Rejas, desarenador y tamiz de finos	Remoción de sólidos gruesos y arenas para proteger las unidades posteriores.
Tratamiento primario	Sedimentador primario	Reducción de sólidos suspendidos y materia orgánica sedimentable.
Tratamiento secundario	Reactor biológico aeróbico y clarificador secundario	Eliminación de materia orgánica biodegradable y sólidos biológicos mediante proceso de lodos activados.
Tratamiento de lodos	Digestión anaerobia	Estabilización de lodos generados en las unidades de sedimentación.
Disposición final	Vertido controlado	Descarga del efluente tratado al cuerpo receptor autorizado, cumpliendo con los LMP del TULSMA.

Fuente: Autor

3.5 CONDICIONES AMBIENTALES Y OPERATIVAS

La planta opera en un clima templado andino, con una temperatura media anual de 20 °C y una precipitación promedio de 750 mm/año, condiciones que favorecen los procesos biológicos de depuración.

Las características del afluente corresponden principalmente a aguas residuales domésticas, con una carga orgánica media y bajo contenido de compuestos industriales, lo que permite una operación estable y un efluente final de alta calidad ambiental.

El mantenimiento y monitoreo continuo están a cargo del personal técnico de EP-EMAPA-A, siguiendo procedimientos operativos estandarizados y reportes periódicos al Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), conforme al régimen de control ambiental vigente.

3.6 RELEVANCIA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La PTAR “Ambato” constituye un modelo técnico de eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas, y su análisis metodológico ofrece una oportunidad para fortalecer las estrategias de optimización operativa en plantas de similar tipología en Ecuador.

La selección de esta planta como área de estudio responde a su importancia estratégica para la sostenibilidad hídrica y ambiental del cantón, y al interés académico de consolidar procedimientos de evaluación técnica aplicables a sistemas de saneamiento urbano.

3.7 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

3.7.1 Técnicas de recolección

La investigación se fundamentó en el método experimental y analítico, aplicando técnicas cuantitativas para la determinación de los parámetros físicos, químicos y biológicos del agua residual doméstica en diferentes puntos del proceso de tratamiento. El objetivo fue obtener información precisa y verificable sobre el desempeño operativo de la planta y la eficiencia de remoción de contaminantes.

Las principales técnicas utilizadas fueron las siguientes:

1. **Muestreo de campo:** Se realizó mediante un procedimiento compuesto proporcional al caudal durante 24 horas, con el fin de obtener una muestra representativa del comportamiento diario de las aguas residuales. Se aplicaron las recomendaciones establecidas por la Norma NTE INEN 2169:2013 y el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2023).
2. **Medición in situ:** En los puntos de muestreo se efectuaron determinaciones directas en campo de parámetros como temperatura, pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, utilizando instrumentos calibrados antes de cada jornada. Estas mediciones permitieron evaluar las condiciones instantáneas del agua residual y validar la representatividad de las muestras tomadas (APHA, 2017).
3. **Análisis de laboratorio:** Las muestras fueron procesadas en el laboratorio de calidad de aguas, donde se realizaron determinaciones de DBO₅, DQO, SST, turbidez, nitrógeno y fósforo totales, mediante métodos normalizados. Los análisis se efectuaron en triplicado para garantizar precisión y confiabilidad estadística (APHA, 2017).
4. **Registro fotográfico y observacional:** Se complementó la información analítica con registros visuales de las unidades de tratamiento, observando aspectos operativos como sedimentación, aireación y clarificación. Este procedimiento facilitó el análisis cualitativo del comportamiento hidráulico y físico de cada unidad (Tchobanoglous et al., 2014).

3.7.2 Instrumentos de medición y análisis

Para la obtención de los datos experimentales se emplearon instrumentos de alta precisión y calibración certificada, de acuerdo con los estándares de calidad establecidos por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) y la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA).

Los equipos utilizados se detallan a continuación:

Tabla 4 Métodos utilizados para cada parámetro

	Parámetros	Unidades	Norma	Método
Fisicoquímico	Conductividad	μS/cm	Estándar 21	Electrométrico
	Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	mg O ₂ /L	Estándar 5210-B	Respirométrico
	Demanda Química de Oxígeno	mg/L	Estándar 5220-D-mood	Fotométrico
	Nitratos + Nitritos	mg/L	Estándar 4500-P-E mod	Fotométrico
	Potencial de Hidrógeno (pH)	----	Estándar 4500-H+	Potenciométrico
	Sólidos Sedimentables	mL/L	Estándar 2540-F	Gravimétrico
	Sólidos Suspensos Totales	mg/L	Estándar 2540-D	Gravimétrico
	Sulfatos	mg/L	Estándar 2130-A-B	Fotométrico
	Turbidez	NTU	Estándar 2130-A-B	Fotométrico
	Temperatura	°C		

Microbiológico	Coliformes fecales	NMP/100mL	Método del	----
			Número Más	
			Probable	
			(NMP)	

Fuente: : (APHA et al., 1989)

3.8 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental se diseñó para evaluar la eficiencia individual y global de las operaciones unitarias de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) “Ambato”, a partir del análisis comparativo de los parámetros físicos, químicos y biológicos en diferentes puntos del proceso de tratamiento.

El trabajo experimental se estructuró en tres fases secuenciales: caracterización del afluente y efluente, evaluación de las unidades de tratamiento, y formulación de la propuesta de optimización técnica.

3.8.1 Fase 1: Caracterización del afluente y efluente

Esta fase tuvo como propósito determinar las condiciones iniciales y finales del proceso de depuración, con el fin de establecer una línea base para el análisis de eficiencia global.

a) Puntos de muestreo:

Se definieron dos puntos de control principales:

- **Punto A (afluente):** ingreso de las aguas residuales domésticas al sistema.
- **Punto B (efluente):** descarga final del efluente tratado antes del vertido al cuerpo receptor.

b) Parámetros analizados:

Se determinaron los siguientes indicadores de calidad del agua, de acuerdo con los métodos normalizados del APHA (2023):

- pH, temperatura, oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), turbidez, DBO₅, DQO, sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT).

c) Frecuencia y duración:

Se realizaron 3 muestreos el 17, 22 y el 27 de julio puntuales en afluente y efluente, debido a restricciones administrativas y logísticas de la planta.

d) Complementación:

Los resultados del muestreo fueron comparados cualitativamente con los valores mensuales del año 2024 entregados por la EP-EMAPA-A, lo cual permitió contextualizar la variabilidad natural del sistema.

f) Evaluación Temporal de la Eficiencia de Remoción de cada parámetro

Además de los muestreos puntuales, se incorporó la información oficial proporcionada por EP-EMAPA-A correspondiente al año 2024, la cual incluye registros mensuales de afluente y efluente para todos los parámetros analizados.

A partir de estos registros se calcularon las eficiencias promedio mensuales de cada contaminante, con el propósito de complementar la evaluación operativa y obtener una visión representativa del comportamiento del sistema durante un periodo anual.

3.8.2 Fase 2: Evaluación de las operaciones unitarias

Esta etapa se centró en determinar la eficiencia de remoción específica de cada unidad que integra la línea de tratamiento, con el fin de identificar su desempeño técnico bajo condiciones normales de operación.

a) Identificación de unidades:

Tabla 5 Abreviaturas de los procesos de tratamiento

Operación unitaria	Abreviatura
Rejillas/ pozo de gruesos	OP1
Tamiz de finos	OP2
Sedimentador	OP3

Decantador primario	OP4
Reactor biológico	OP5
Decantador secundario	OP6
Cloración	OP7

Fuente: Autor

b) Puntos de control intermedio:

En cada operación unitaria se establecieron puntos estratégicos de muestreo (entrada y salida), permitiendo cuantificar la variación de los parámetros fisicoquímicos y biológicos.

b.1) Criterio de selección del muestreo representativo

Para la evaluación de las operaciones unitarias, el análisis se basó en un único muestreo puntual, seleccionado entre los tres realizados, correspondiente a la jornada con mayor carga orgánica registrada. Este criterio permitió evaluar el desempeño de cada unidad bajo condiciones operativas más exigentes, garantizando un enfoque conservador en la determinación de eficiencias de remoción.

c) Determinación de eficiencias:

La eficiencia de remoción (η) se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100 \quad (5)$$

donde:

- C_{in} = concentración del parámetro a la entrada de la unidad (mg/L)
- C_{out} = concentración del parámetro a la salida de la unidad (mg/L)

d) Verificación de resultados:

Los valores obtenidos fueron comparados con los rangos de desempeño establecidos por la EPA (2021), el Banco Mundial (2020) y las guías técnicas del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE, 2022), para plantas de tratamiento de características equivalentes.

e) Verificación normativa:

Los resultados se compararon con los LMP y guías pertinentes para determinar áreas críticas de incumplimiento.

3.8.3 Fase 3: Propuesta de optimización técnica

Con base en los resultados de las dos fases previas, se procedió a formular una propuesta de optimización técnica orientada a la mejora continua del desempeño operativo.

a) Identificación de oportunidades de mejora:

Se analizaron los resultados de eficiencia por unidad, identificando posibles áreas de mejora relacionadas con:

- Condiciones hidráulicas y tiempos de retención.
- Uniformidad del flujo y distribución del aire en los reactores biológicos.
- Criterios de mantenimiento preventivo.
- Monitoreo continuo mediante instrumentación digital.

b) Simulación técnica:

Se emplearon herramientas de modelación conceptual en Microsoft Excel para realizar balances de masa y simular escenarios de operación como la variación de caudal o carga orgánica.

c) Formulación de lineamientos:

Los resultados se consolidaron en un plan de optimización operativa, que incluye recomendaciones técnicas para mejorar la eficiencia del sistema, fortalecer el control de calidad y garantizar la sostenibilidad del tratamiento a largo plazo.

d) Previo al dimensionamiento, se establecieron los parámetros de diseño proyectados al año 2040 proporcionados por la EP-EMAPA-A. Estos valores consideran un periodo de diseño de 20 años, lo que garantiza que la propuesta sea técnicamente viable a largo plazo y responda al crecimiento poblacional estimado para dicho horizonte. La

adopción de este periodo asegura que la infraestructura proyectada cumpla con las normativas de descarga de manera sostenida hasta el final de su vida útil.

Tabla 6 *Parámetros hidráulicos y poblacionales de diseño proyectados al año 2040*

Descripción	Valor	Unidades
Población de diseño	230.000	Hab
Caudal diario	65.664	m ³ /d
Caudal medio	2.736	m ³ /h
Caudal mínimo	1.641,6	m ³ /h
Admisible en tratamiento biológico.	4104	m ³ /h

e) Rediseño de reactor biológico (sistema de lodos activados con eliminación de N y P) según la norma alemana ATV-A131 del mayo 2000.

El dimensionamiento y el procedimiento de cálculo para el reactor biológico se llevaron a cabo utilizando la directriz técnica ATV-A 131: Dimensionamiento de Plantas de Lodos Activados de una Etapa. Esta norma alemana establece las bases cinéticas, los coeficientes de diseño y las ecuaciones de balance de masa necesarias para determinar los parámetros clave del reactor, como el volumen, la edad del fango y los requerimientos de oxígeno. A continuación, se presenta la descripción detallada del procedimiento y la aplicación de las ecuaciones según lo estipulado en la directriz (ATV-A 131, 2000).

Procedimiento de cálculo:

1. Se identificó las características del influente al SLA (caudales, concentración y cargas relevantes).
2. Se identificó la aptitud del influente en cuanto a su degradabilidad DBO5/DQO y relación (DBO5/Nitrógeno a desnitrificar del influente)
3. Se identificó los requerimientos del efluente de salida. Este dato corresponde a la normativa
4. Se identificó la configuración del SLA planteado: los reactores, zonas o ciclos, anóxico y aerobio del SLA, dimensiones y volúmenes: VAT, Vanóx, Vareado, VD/VAT

5. Se determinó un valor de temperatura de diseño (en base al conocimiento del proceso y las condiciones climáticas)
6. Se calculó la carga de DBO5 (kg DBO5 que ingresan/d)
7. Identificar el valor de MLSST de diseño (MLSST se sugiere entre 3 a 7 kg/m3 en PTAR municipales)
8. Se determinó la masa de sólidos en el reactor biológico (*Masa_{SST}*) disponible para degradar la carga orgánica de entrada, a partir del valor de MLSST y el volumen del reactor biológico (*V_{AT}*)

$$Masa_{SST} = V_{AT} * MLSST \quad (6)$$

donde:

- *Masa_{SST}*: Masa de sólidos en el reactor biológico
- *V_{AT}*: Volumen del reactor
- *MLSST*: Concentración de sólidos en el reactor

9. Se calculó la carga de lodos Ec 7.

$$carga\ de\ lodos = \frac{carga\ DBO\ de\ entrada}{V_{AT} * MLSST} \quad (7)$$

donde:

- *carga de lodos*: Masa de materia orgánica que ingresa al reactor
- *carga DBO de entrada*: Masa de materia orgánica que ingresa al reactor (kg DBO5/kg SST.d)

10. Calcular la Producción Específica de Sólidos debido a la degradación carbonosa (*SP_{esp}, DBO*) a partir de Ec 8.

$$SP_{esp,DBO} = \frac{SP_{d,c}}{B_{DBO,IAT}} \quad (8)$$

donde:

- $SP_{esp,DBO}$: Producción de sólidos en base a la carga orgánica de entrada (*kg SST produc/kg DBO ingreso*)
- $SP_{d,c}$: Producción diaria de sólidos debido a degradación de carbono (Kg SST/d)
- $B_{DBO,IAT}$: La carga diaria de DBO5 de entrada (kg DBO/d)

11. Calcular la edad de fangos aerobia a mantener para la nitrificación

$$\theta_{C,aerob,dim} = SF * 3.4 * 1.103^{(15-T)} \quad (9)$$

donde:

- $\theta_{C,aerob,dim}$: Edad del fango aerobia que se use de base para el dimensionamiento de la nitrificación. (d)
- SF : Factor de seguridad para nitrificación.
- T : Temperatura del agua residual

Los valores sugeridos por (Metcalf and Eddy, 2003), indica como valores típicos de diseño, necesarios para nitrificación de 10 a 20 días a 10°C y 4 a 7 días a 20°C.

12. Se calculó la edad del fango necesaria en este caso para nitrificación y desnitrificación se obtiene en base la Ec 10:

$$\theta_{C,dim} = \theta_{C,aerob,dim} * \frac{1}{1 - \frac{V_D}{V_R}} \quad (10)$$

donde:

- $\theta_{c,dim}$: Edad del fango que sirve de base para el diseño
- V_D : Volumen de desnitrificación.
- V_R : Volumen del reactor biológico

13. Para la determinación del volumen de desnitrificación se siguió una serie de pasos, los cuales fueron.

I. Cálculo de concentración media diaria de nitratos a desnitrificar:

$$S_{NO3D} = C_{N,ER} - S_{Norg,SDS} - S_{NH4,EDS} - S_{NO3,SDS} - X_{Norg,FE} \quad (11)$$

donde:

- S_{NO3D} : Concentración de nitratos a desnitrificar en media diaria
- $C_{N,ER}$: Concentración de N la entrada del reactor biológico
- $S_{Norg,SDS}$: Concentración de N orgánico en la salida del reactor
- $S_{NH4,EDS}$: Concentración de N amoniacal en la salida del reactor
- $S_{NO3,SDS}$: Concentración de nitratos en la salida del reactor
- $X_{Norg,FE}$: La carga de nitrógeno incorporada a la biomasa

II. Determinación del VD/VR para desnitrificación simultánea e intermitente con la Ec (12)

$$\frac{S_{NO3D}}{C_{DBO,ER}} = \frac{OC_{c,DBO5}}{2,9} \frac{V_D}{V_R} \quad (12)$$

donde:

- $C_{DBO,ER}$: Concentración de DBO5 en la entrada del reactor
- $OC_{c,DBO5}$: Consumo de oxígeno para la eliminación de carbono referido a la DBO5.

14. Se calculó para la eliminación de fosforo.

Para la determinación de la eliminación del fosforo se determina en la norma alemana ATV-A131

15. Se determinó el volumen de desnitrificación se sigue una serie de pasos los cuales son

I. Cálculo de la producción de fangos por degradación de materia orgánica mediante la Ec (13)

$$FE_{d,c} = C_{d,DBO5} \left(0,75 + 0,6 \frac{X_{SST,ER}}{C_{DBO,ER}} - \frac{(1-0,2)0,17*0,75*\theta_{C,dim}*Ft}{1+0,17*\theta_{C,dim}*Ft} \right) \left\{ \frac{Kg SST}{d} \right\} \quad (13)$$

donde:

- $FE_{d,c}$: Producción de fangos diaria debida a la eliminación del carbono.
- $C_{d,DBO5}$: Carga diaria de DBO5.
- $X_{SST,ER}$: Concentración de SST a la entrada del reactor biológico
- $C_{DBO,ER}$: Concentración de DBO5 en la entrada del reactor
- $\theta_{C,dim}$: Edad del fango que sirve de base para el diseño
- Ft : temperatura para la respiración endógena

II. La función de temperatura para la respiración endógena es

$$Ft = 1,072^{(T-15)} \quad (14)$$

III. Cálculo de la producción de fangos por degradación biológica de fosfatos mediante la Ec

$$FE_{d,p} = Q_d * \frac{(3 * X_{P,BIOP} + 6,8 * X_{P,PRE,Fe} + 5,3 * X_{P,PRE,Al})}{100} \left\{ \frac{Kg}{d} \right\} \quad (15)$$

donde:

- $FE_{d,p}$: Producción diaria de fangos debida a la eliminación de fósforo.
- Q_d : Caudal de diseño
- $X_{P,BIOP}$: Fósforo unido bioquímicamente, en la eliminación biológica de fósforo
- $X_{P,PRE,Fe}$: Fósforo eliminado por precipitación por la adición Hierro

- $X_{P,PRE,Al}$: Fósforo eliminado por precipitación por la adición de aluminio

IV. Cálculo de producción total del fango mediante la EC (16)

$$FE_d = FE_{d,P} + FE_{d,C} \quad (16)$$

16. Elección del índice de volumen de fangos y del contenido de sólidos del reactor

Para la determinación del Índice de Volumen de Fangos (IVF), se procedió a seleccionar el valor más representativo según las condiciones del sistema. En primer lugar, si el proyecto contempló únicamente la ampliación del decantador secundario sin modificaciones en el proceso biológico, se utilizaron los valores críticos registrados en la planta o el valor de IVF que no fue superado en el 85 % de los días de operación. En caso de existir cambios en el proceso o en las condiciones del reactor biológico, se tomó como referencia la Tabla 6 de la guía ATV (2000), que estableció los rangos recomendados del IVF según el tipo de sistema biológico, garantizando así un dimensionamiento adecuado del decantador secundario.

17. Se calculó el volumen del reactor biológico con la siguiente Ec 17

$$V_R = \frac{M_{Sst,RB}}{SST_R} \quad (17)$$

donde:

- V_R : Volumen del reactor biológico
- $M_{Sst,RB}$: Masa de sólidos suspendidos en el reactor biológico.
- SST_R : Contenido de SS en el reactor biológico.

Donde la Masa de sólidos suspendidos en el reactor biológico ($M_{Sst,RB}$) se calcula con la siguiente Ec (18)

$$M_{Sst,RB} = \theta_{C,dim} * FE_d \quad (18)$$

donde:

- $\theta_{C,dim}$: Edad del fango que sirve de base para el diseño
- $M_{Sst,RB}$: Masa de sólidos suspendidos en el reactor biológico.
- FE_d : Producción total del fango

18. Se calcula las cargas volumétricas (C_v) y másica (C_m) del reactor biológico, utilizando las Ec (19 y 20)

$$C_v = \frac{C_{d,DBO5}}{V_R} \quad (19)$$

donde:

- C_v : Cargas volumétricas
- $C_{d,DBO5}$: Carga diaria de DBO5
- V_R : Volumen del reactor biológico

$$C_m = \frac{C_v}{SST_R} \quad (20)$$

donde:

- C_v : Cargas volumétricas
- C_m : Cargas másica
- SST_R : Contenido de SS en el reactor biológico.

19. Se calculó la recirculación necesaria desde el decantador secundario con la Ec(21 y 22)

$$RF = \frac{S_{NH,N}}{S_{NO3D,SDS}} \quad (21)$$

donde:

- RF : Relación de recirculación con desnitrificación preconnectada
- $S_{NH,N}$: Nitrógeno amoniacal a nitrificar.

- $S_{NO3D,SDS}$: Concentración de nitratos a desnitrificar en media diaria.

$$RF = \frac{Q_{re}}{Q_t} + \frac{Q_{ri}}{Q_t} (-) \quad (22)$$

donde:

- RF : Relación de recirculación con desnitrificación preconnectada
- Q_{re} : Recirculación externa (desde el decantador secundario)
- Q_{ri} : Recirculación interna con desnitrificación preconnectada.
- Q_t : Caudal punta de tiempo seco

20. Se determinó el grado de eficacia o rendimiento de la desnitrificación con la Ec 23.

$$N_d \leq 1 - \frac{1}{1 + RF} (-) \quad (23)$$

donde:

- RF : Relación de recirculación con desnitrificación preconnectada
- Q_{re} : Recirculación externa (desde el decantador secundario)
- Q_{ri} : Recirculación interna con desnitrificación preconnectada.

21. Se estimó el tiempo de retención hidráulico con la Ec (24)

$$TRH = \frac{V_R}{Q} \quad (24)$$

donde:

- TRH : Tiempo de retención hidráulico.
- V_R : Volumen del reactor biológico
- Q : Caudal de diseño

Para el dimensionamiento del reactor biológico se consideró el tiempo de retención hidráulica (TRH) como parámetro fundamental de diseño. De acuerdo con la guía del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) — *Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*, los valores recomendados se encontraron entre 6 y 8 horas para sistemas convencionales de lodos activados y entre 16 y 24 horas para procesos de aireación prolongada. Estos rangos garantizaron una adecuada oxidación de la materia orgánica y la estabilidad del proceso biológico, permitiendo seleccionar un tiempo de retención coherente con el tipo de sistema propuesto.

22. Se determinó la demanda de oxígeno necesaria

I. Para la eliminación de carbono se utiliza la Ec (25)

$$OC_{d,C} = C_{d,DBO5} * \left[0,56 + \frac{0,15 * \theta_c * Ft}{1 + 0,17 * \theta_c * Ft} \right] \left[Kg \frac{O_2}{d} \right] \quad (25)$$

donde:

- $OC_{d,C}$: Consumo diario de oxígeno para la eliminación de carbono.
- $C_{d,DBO5}$: Carga diaria de DBO5
- θ_c : Edad del fango referida a VR
- Ft : Temperatura para la respiración endógena

II. Para la nitrificación se calcula mediante la Ec (26)

$$OC_{d,N} = Q_d * 4,3 * \frac{(S_{NO3,D} - S_{NO3,ER} + S_{NO3,SDS})}{1000} \left[Kg \frac{O_2}{d} \right] \quad (26)$$

donde:

- $OC_{d,N}$: Oxígeno consumido por día para la nitrificación.
- Q_d : Caudal de Diseño
- $S_{NO3,D}$: Concentración de nitratos a desnitrificar en media diaria
- $S_{NO3,ER}$: Concentración de nitratos en la entrada del reactor biológico.

- $S_{NO3,SDS}$: Concentración de nitratos en la salida del reactor

III. Debido a que por desnitrificación se recupera 2,9 Kg O₂ por Kg de nitrógeno desnitrificado, se calculó cuanto se recupera con la Ec (27)

$$OC_{d,D} = Q_d * 2,9 * \frac{(S_{NO3,D})}{1000} \left[Kg \frac{O_2}{d} \right] \quad (27)$$

donde:

- $OC_{d,D}$: Consumo de oxígeno por día para la eliminación del carbono que se cubre con la desnitrificación.
- Q_d : Caudal de diseño.
- $S_{NO3,D}$: Concentración de nitratos a desnitrificar en media diaria

IV. Se determinó el consumo del oxígeno en punta o horario (OCh) con la Ec (28)

$$OC_h = \frac{\{f_c * (OC_{d,C} - OC_{d,D}) + f_N OC_{d,N}\}}{24} [Kg \ O_2/h] \quad (28)$$

donde:

- OC_h : Consumo horario de oxígeno
- f_c : Factor punta para la respiración de carbono.
- $OC_{d,C}$: Consumo diario de oxígeno para la eliminación de carbono.
- $OC_{d,D}$: Consumo de oxígeno por día para la eliminación del carbono que se cubre con la desnitrificación.
- f_N : Factor punta para la oxidación de amonio.
- $OC_{d,N}$: Oxígeno consumido por día para la nitrificación.

V. La introducción de oxígeno requerida se obtiene para reactores aireados permanentemente a partir de la Ec (29)

$$\alpha OC = \frac{C_s}{C_s - C_x} * OC_h \left[Kg \frac{O_2}{h} \right] \quad (29)$$

donde:

- αOC : Transferencia de oxígeno de una instalación de aeración en fangos activo
- C_s : Concentración de saturación de oxígeno que depende de la temperatura y de la presión parcial.
- C_x : Concentración de oxígeno en el reactor biológico.
- OC_h : Consumo horario de oxígeno

23. Se determinó la alcalinidad del agua residual para el control del PH

La nitrificación consume alcalinidad y esto puede conducir a una bajada del pH.

La alcalinidad decrece por nitrificación (y aumenta en la desnitrificación) y en la precipitación de fosfatos como se visualiza en la Ec (30)

$$S_{ALC,SR} = S_{ALC,ER} - \left[\begin{array}{l} 0,07(S_{NH_4,ER} - S_{NH_4,SDS} + S_{NO_3,SDS} - S_{NO_3,ER}) \\ + 0,06S_{FE3} + 0,04S_{FE2} + 0,11S_{Al3} - 0,03X_{P,PRE} \end{array} \right] \left[\frac{mmol}{l} \right] \quad (30)$$

donde:

- $S_{ALC,SR}$: Alcalinidad en la salida del reactor
- $S_{ALC,ER}$: Alcalinidad en la entrada del reactor
- $S_{NH,ER}$: Concentración de N amoniacal en la entrada del reactor
- $S_{NH_4,SDS}$: Concentración de N amoniacal en la salida del reactor
- $S_{NO_3,SDS}$: Concentración de nitratos en la salida del reactor
- $S_{NO_3,ER}$: Concentración de nitratos en la entrada del reactor
- S_{FE} : Concentración de ión férrico
- S_{FE2} : Concentración de ión ferroso
- S_{Al3} : Concentración de ion de aluminio

- $X_{P,PRE}$: Fósforo eliminado por precipitación.

Se estudió los casos más desfavorables que se puedan producir en la práctica. La alcalinidad no debe ser inferior a $S_{ALC,SR} = 1,5 \text{ m mol/l}$. Si es necesario hay que dosificar neutralizantes básicos como lechada de cal. Si el valor medido o calculado es menor, el sistema corre riesgo de acidificarse ($\text{pH} < 6,6$), lo cual inhibe la nitrificación. La Tabla 9 de la ATV-A131 proporciona valores de pH esperados y alcalinidad mínima en función del tipo de proceso (con o sin nitrificación) y de la profundidad del reactor.

Decantador secundario

Para el dimensionamiento del decantador secundario, se consideraron el caudal máximo en época de lluvia (Q_m), el índice de volumen de fangos (IVF) y la concentración de sólidos en la entrada (SST_{sr}), conforme a la guía ATV-DVWK-A 131 (2000). Con estos parámetros se definieron las formas y dimensiones del decantador, los tiempos admisibles de almacenamiento y espesamiento, el caudal y control de recirculación de fangos, y la configuración de las zonas de entrada, salida y extracción de lodos. (

24. El índice de volumen de fangos (IVF) y el tiempo de espesamiento (t_e) se emplearon para determinar el contenido de sólidos en el fondo del decantador, procurando mantener un tiempo mínimo que evitara la formación de fangos flotantes, conforme a los valores de la tabla 10 de la guía ATV-DVWK-A 131 (2000).
25. Se determinó la concentración de sólidos en el fondo del decantador (SST_{DS}) en función del índice de volumen de fangos (IVF) y del tiempo de espesamiento (t_e), con la Ec (31)

$$SST_{DS} = \frac{100}{IVF} \sqrt[3]{t_e} \left(\frac{Kg}{m^3} \right) \quad (31)$$

donde:

- SST_{DS} : Contenido de SS en el fondo del decantador secundario.
- IVF : Índice de volumen de fangos.
- t_e : Tiempo espesamiento

26. Se calculó la relación de recirculación ($RV = Q_{re}/Q$) y el contenido de sólidos a la entrada del decantador (SST_R), en función de la concentración de sólidos en la recirculación (SST_{Re}) mediante la EC (32)

$$SST_R = \frac{RV * SST_{RE}}{1 + RV} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (32)$$

donde:

- SST_R : Contenido de SS en el reactor biológico.
- RV : Relación de recirculación
- SST_{RE} : Contenido de SS del fango de recirculación.

27. Se calculó la carga superficial (q_A) a partir de la carga de volumen de fangos admisible (q_{sv}) y del volumen comparativo del fango (V_{sv}), de acuerdo con los criterios establecidos en la guía ATV-DVWK-A 131 (2000).

$$q_A = \frac{q_{sv}}{SST_r * IVF} \left(\frac{m}{h} \right) \quad (33)$$

donde:

- q_A : carga superficial
- q_{sv} : Carga de volumen de fangos
- SST_r : Contenido de SS en el reactor biológico.
- IVF : Índice de volumen de fangos.

28. Se calculó la superficie necesaria del decantador secundario (A_{DS}) en función de la carga superficial admisible (q_A) y del caudal máximo de diseño (Q_m), conforme la Ec (34)

$$A_{DS} = \frac{Q_m}{q_A} \quad (m^2) \quad (34)$$

donde:

- A_{DS} : Superficie del decantador secundario
- Q_m : Caudal de diseño
- q_A : Carga superficial

29. Se determinó la profundidad del decantador secundario considerando las zonas de actuación que intervienen en el proceso de sedimentación y espesamiento, según los esquemas y recomendaciones presentados en las figuras 6 y 7 de la guía ATV-DVWK-A 131 (2000).

30. **Comprobación y recálculo de decantadores secundarios existentes**

Se verificó el funcionamiento de decantadores secundarios existentes considerando la carga de volumen de fangos y la profundidad disponible, ajustando la carga o el caudal máximo admisible en caso de profundidades menores a la mínima recomendada, conforme a la guía ATV-DVWK-A 131 (2000).

31. **Diseño del barrido de fangos y sistemas de rasqueteo**

Se consideró el diseño del barrido de fangos como parte esencial para controlar el tiempo de retención de los lodos en el decantador secundario, empleando rasquetas de arrastre, succión o cadenas, según el tipo de decantador y las recomendaciones de la tabla 12 de la norma.

32. **Balance de sólidos**

Se realizó el balance de sólidos según la ecuación (6.9) de la guía, asegurando la coherencia entre las cargas de entrada y salida de fangos y verificando el equilibrio en el sistema de recirculación.

33. **Consideraciones para el proyecto y la operación**

Se tuvieron en cuenta las recomendaciones constructivas y operativas indicadas en la guía, evitando corrientes de cortocircuito en reactores de mezcla, previendo sistemas de vaciado para mantenimiento, y garantizando la adecuada homogeneidad del flujo en las zonas de aireación.

34. **Recogida de espumas y fangos flotantes**

Se consideró la posible formación de espumas y fangos flotantes por microorganismos filamentosos, incorporando dispositivos de extracción o canales de recolección que eviten su acumulación en reactores y decantadores.

35. Regulación de las bombas para la recirculación interna

Se estableció la regulación del caudal de recirculación interna, evitando un exceso de oxígeno en la zona anóxica y manteniendo un caudal constante mínimo del 75 al 100% del caudal de tiempo seco (Q_t), conforme a las recomendaciones de la guía.

36. Formación de nitritos en instalaciones no dimensionadas para la nitrificación

Se controló la formación de nitritos en sistemas sin nitrificación mediante un aumento en la introducción de oxígeno o la reducción de la edad del fango, para evitar efectos negativos en la calidad del efluente.

37. Decantadores secundarios: generalidades y flujo predominante horizontal

Se diseñaron los decantadores secundarios conforme a los criterios de la norma, considerando diámetros entre 30 y 50 m para los circulares y menores de 20 m para los de flujo vertical, garantizando una entrada homogénea, una zona de desgasificación y una salida hidráulicamente estable.

38. Recirculación de fangos

Se reguló el caudal de recirculación de fangos para mantener la concentración de sólidos deseada en el reactor biológico y favorecer la homogeneización hidráulica del sistema, ajustando la recirculación al caudal de entrada sin exceder los límites de carga.

39. Simulación dinámica

La guía propone la simulación dinámica como herramienta complementaria para verificar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones operativas, evaluar la seguridad y eficiencia del diseño, y optimizar el funcionamiento de la planta.

3.8.4 Presupuesto del Rediseño

La estimación presupuestaria del proyecto se realizó como parte del análisis técnico–económico de la propuesta, con el objetivo de contar con un referente de costos para la eventual ejecución de mejoras en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Ambato. El cálculo del presupuesto se desarrolló utilizando el Sistema Único de Información de Precios de la Construcción (PUNIS), empleando precios unitarios vigentes para obras civiles y actividades asociadas a infraestructura sanitaria. Este sistema permitió estructurar un

presupuesto referencial a partir del análisis de cantidades de obra y costos unitarios normalizados.

El procedimiento metodológico seguido fue el siguiente:

- Se identificaron de las partidas constructivas necesarias según el diseño técnico propuesto.
- Se calculó de las cantidades de obra correspondientes a cada partida, a partir de las dimensiones y características geométricas definidas en el diseño.
- Se asignó de precios unitarios obtenidos de la base de datos PUNIS, considerando materiales, mano de obra y equipos.
- Se elaboró del presupuesto referencial mediante la suma de los costos parciales de cada rubro.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización fisicoquímica y biológica del agua residual afluyente y efluente

Como se muestra en la Tabla 7, la caracterización del agua residual de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Ambato en 2024 tiende un desempeño positivo, aunque con ciertos desafíos específicos.

La planta de tratamiento de aguas residuales trabaja bajo una carga hidráulica importante, asociada al aumento de la población del área de servicio, aunque el caudal que recibe se mantiene dentro de los parámetros para los que fue diseñada. En este contexto, el desempeño en la eliminación de materia orgánica es destacado. Los valores de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) presentan una reducción clara y eficiente entre el ingreso y la descarga, lo que evidencia el buen funcionamiento de los procesos físicos y biológicos. No obstante, en algunos meses puntuales se registran ligeros excedentes respecto a la normativa vigente, lo que sugiere episodios temporales de saturación del sistema.

La remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y de turbidez es considerable; sin embargo, las variaciones estacionales, especialmente durante la época lluviosa, incrementan la carga de entrada y generan fluctuaciones en el desempeño del sistema. Las condiciones físicas del proceso, como el pH y la temperatura, se mantienen estables y dentro de rangos adecuados, lo que favorece la actividad de los microorganismos responsables del tratamiento. Por otro lado, la elevada conductividad registrada en la afluyente evidencia una carga salina significativa que, debido al diseño de la planta, solo puede ser reducida de manera limitada.

Respecto a los nutrientes, los resultados son variables. La remoción de fósforo total es generalmente eficiente a lo largo del año, atribuible a los procesos biológicos existentes. En contraste, la eliminación del nitrógeno total de Kjeldahl no alcanza de forma constante los valores exigidos por la normativa, lo que indica la necesidad de optimizar las etapas de nitrificación y desnitrificación del reactor biológico para reducir el riesgo de eutrofización en el cuerpo receptor .

Tabla 7 Datos mensuales promedio del año 2024 de las Aguas crudas y tratadas de la PTAR Ambato

MES	Q (L/s)	p H (Unidades de p H)		Temperatura (°C)		Conductividad (u S/cm)		DQO (mg/)		DBO5 (mg/L)		SST (mg/L)		NTK (mg/L)		Nitrógeno Amoniacal (mg/L)		Nitrógeno de Nitratos (mg/L)		Fósforo (mg/L)		Turbidez (NTU)		Coliformes fecales (UFC/ mL)	
		E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S
Ene	620	7,64	8	21,3	20,73	996	938	893	31	357	12	559	13	73	26	30	20	2,5	0,6	40	5	303	8	4,87E+05	0
Feb	594	7,52	8,15	21,6	21,24	991	910	1113	30	381	14	703	22	100	28	29	19	2,8	1,2	44	5	392	12	4,79E+05	0
Mar	628	7,71	8,29	21,0	20,87	987	963	1017	68	374	20	472	18	80	32	29	21	2,2	0,6	32	3	310	9	3,83E+05	0
Abr	644	7,70	8,31	20,7	20,40	1091	1010	1536	42	455	13	1321	10	104	23	32	17	3	0,8	62	5	789	6	4,25E+05	0
May	629	7,70	8,40	20,6	20,22	1127	1040	1887	39	492	13	1755	12	151	44	39	19	2,9	0,4	70	5	977	6	4,67E+05	0
Jun	618	7,65	8,31	20,1	19,78	1159	1071	1674	47	470	16	1415	10	119	26	33	18	3,4	0,7	53	4	813	5,2	5,00E+05	0
Jul	626	7,58	7,90	19,4	19,11	1128	1087	1346	43	501	15	622	18	96	38	35	19	2,0	1,0	33	4	367	6,1	4,87E+05	0
Ago	620	7,60	8,04	18,7	18,52	1179	1123	1335	46	451	15	679	17	119	29	36	19	1,7	0,9	31	3	503	5,4	5,46E+05	0

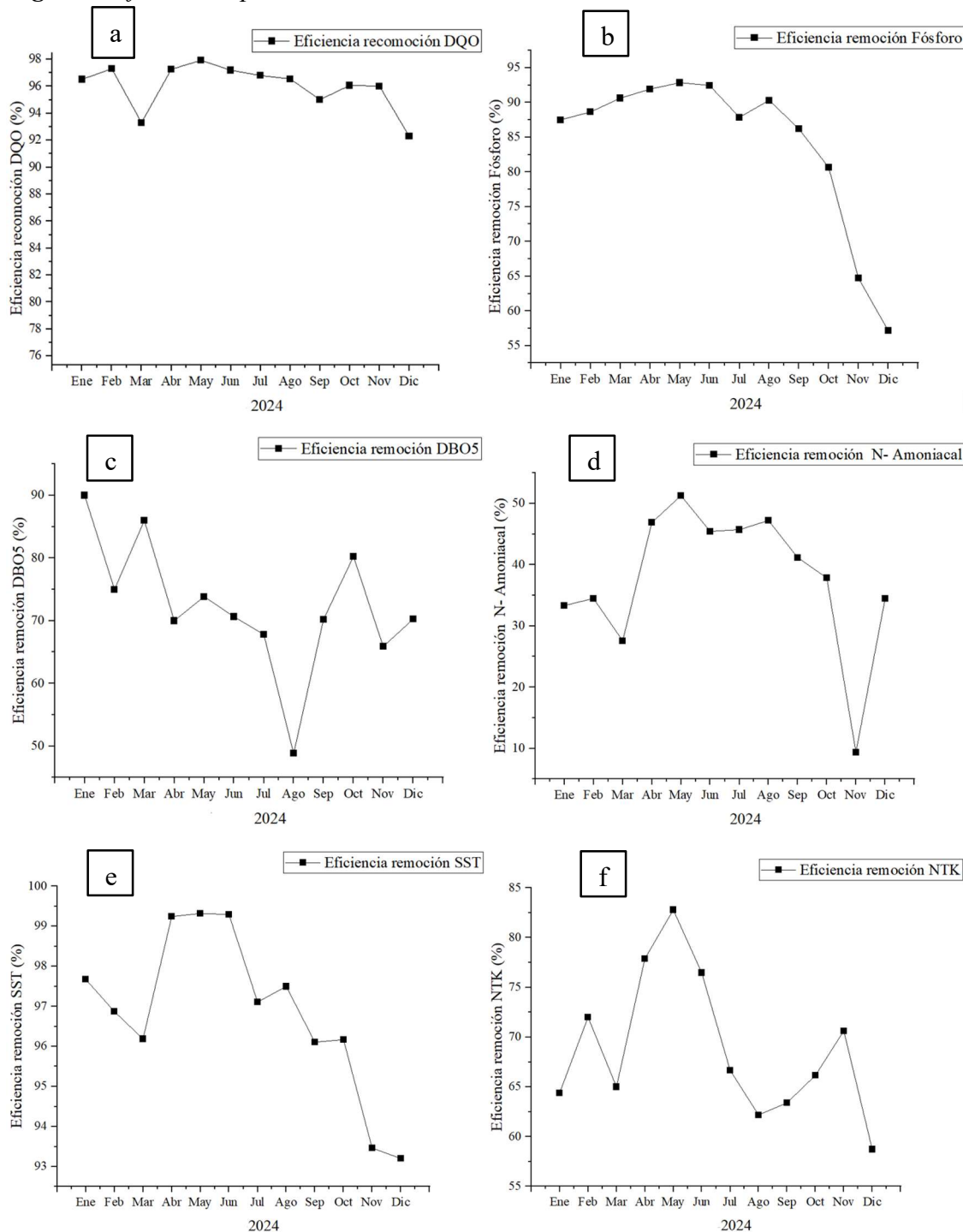
Sep	604	7,65	8,00	18,1	17,83	1174	1101	1024	51	342	15	488	19	112	53	34	20	2,9	0,8	29	4	304	7,5	4,44E+05	0
Oct	592	7,54	7,95	20,1	19,90	1160	1123	1299	51	445	18	548	21	125	33	37	23	3,9	0,8	31	6	459	10,1	4,60E+05	0
Nov	605	7,79	8,09	20,2	20,26	1298	1215	855	34	343	14	260	17	143	45	32	29	1,4	0,9	17	6	295	6,6	4,13E+05	0
Dic	614	7,95	8,23	20	19,95	1087	985	636	49	247	19	250	17	63	26	29	19	1,5	0,5	14	6	248	6	3,78E+05	0

Fuente: Autor

Nota: (E) Agua cruda de entrada y (S) Salida del agua tratada de la PTAR

4.1.1 Evaluación Temporal de la Eficiencia de Remoción

Figura 2 Eficiencias promedio mensual del año 2024



Fuente: Autor

La Figura 2 refleja que la PTAR Ambato presenta, en términos generales, un buen desempeño en la remoción de materia orgánica. En particular, la DQO (gráfica a) mantiene

eficiencias altas y estables durante todo el año ($\approx 92\text{--}98\%$), lo que indica que el reactor biológico y la biomasa se encuentran en condiciones adecuadas. En el caso de la DBO_5 (gráfica c), aunque en algunos meses se alcanzan valores elevados de remoción, se observan variaciones importantes, lo que sugiere cierta inestabilidad operativa asociada a cambios en la carga orgánica de entrada.

En relación con los sólidos suspendidos totales (gráfica e), el sistema muestra un comportamiento favorable durante la primera mitad del año. Sin embargo, a partir del mes de agosto se evidencia una disminución progresiva en la eficiencia, lo que podría estar relacionado con un menor desempeño del proceso de clarificación hacia el final del periodo analizado.

Por otro lado, los nutrientes representan las principales limitaciones del sistema. La remoción de fósforo (gráfica b) se mantiene en niveles altos hasta agosto, pero luego presenta una caída sostenida y marcada en los últimos meses del año. De manera similar, el nitrógeno total de Kjeldahl y el nitrógeno amoniacal (gráfica d) muestran un comportamiento inestable y bajas eficiencias, especialmente hacia el cierre del año, lo que evidencia deficiencias en los procesos de nitrificación y desnitrificación. En conjunto, los resultados muestran que la planta es eficiente en la remoción de materia carbonácea, pero presenta dificultades en el control y la estabilidad de la remoción de nutrientes.

4.1.2 Caracterización de las Aguas residuales actuales

En las Tablas 8, 9 y 10, se presenta la caracterización de las aguas residuales de la Planta de Tratamiento, los muestreos del 17, 22 y 27 de julio de 2025 presentan caudales de 652 L/s, 670 L/s y 661 L/s respectivamente, encontrándose dentro del caudal de operación de la planta (760 L/s). También se evidencia que la mayoría de los parámetros analizados cumplen con los límites establecidos en la normativa ambiental vigente. Sin embargo, se identificaron valores que sobrepasa el rango en el nitrógeno total de Kjeldahl (NTK) y en el fósforo total. Esta anomalía puede deberse a la presencia de descargas domésticas e industriales con alto contenido de nutrientes, las cuales incrementan la carga en el afluente y superan la capacidad de remoción de las unidades biológicas actuales.

Tabla 8 Caracterización de las aguas residuales (17 de julio de 2025)

Parámetro	Unidad	Valor de entrada	Valor de salida	Eficiencia
Turbidez	<i>NTU</i>	60,5	6,85	88,68%
Sólidos totales	<i>mg/L</i>	1150	385	66,52%
Sólidos suspendidos	<i>mg/L</i>	580	15	97,41%
pH	<i>PH</i>	7,49	7,3	-
Conductividad eléctrica	<i>μS/cm</i>	752	635	-
N- Amoniacal	<i>mg/L</i>	29	9,15	68,45%
Fosforo Total	<i>mg/L</i>	37	16,2	56,22%
DQO	<i>mg/L</i>	470	65	85,96%
N- Kjeldahl	<i>mg/L</i>	132	58	56,06%
DBO5	<i>mg/L</i>	352	12,5	96,84%
Coliformes Fecales	UFC	9200	<0,01	9,90%

Fuente: Autor

Tabla 9 Caracterización de las aguas residuales (22 de julio de 2025)

Parámetro	Unidad	Valor de entrada	Valor de salida	Eficiencia
Turbidez	<i>NTU</i>	75	7,52	89,97%
Sólidos totales	<i>mg/L</i>	1215	415	65,84%
Sólidos suspendidos	<i>mg/L</i>	625	12	98,08%
PH	<i>PH</i>	7.49	7,3	-
Conductividad eléctrica	<i>μS/cm</i>	857	642	-
N- Amoniacal	<i>mg/L</i>	38	12	68,42%
Fosforo Total	<i>mg/L</i>	28,12	12,11	56,93%
DQO	<i>mg/L</i>	520	75	87,90%
N- Kjeldahl	<i>mg/L</i>	115	52	54,78%
DBO5	<i>mg/L</i>	315	15,25	96,33%
Coliformes Fecales	UFC	9700	<0,01	9,90%

Fuente: Autor

Tabla 10 Caracterización de las aguas residuales (27 de julio de 2025)

Parámetro	Unidad	Valor de entrada	Valor de salida	Eficiencia
Turbidez	<i>NTU</i>	64,9	5,77	91,11 %
Sólidos totales	<i>mg/L</i>	1096	372	66,06 %
Sólidos suspendidos	<i>mg/L</i>	610	17	97,11 %

PH	<i>PH</i>	7.49	7,3	-
Conductividad eléctrica	$\mu S/cm$	932	654	-
N- Amoniacal	<i>mg/L</i>	36	0,43	98,81 %
Fosforo Total	<i>mg/L</i>	35	15,2	56,65 %
DQO	<i>mg/L</i>	550	98	80,20 %
N- Kjeldahl	<i>mg/L</i>	126	60	52,38 %
DBO5	<i>mg/L</i>	350	9,174	97,73 %
Coliformes Fecales	UFC	8800	<0,01	99,99 %

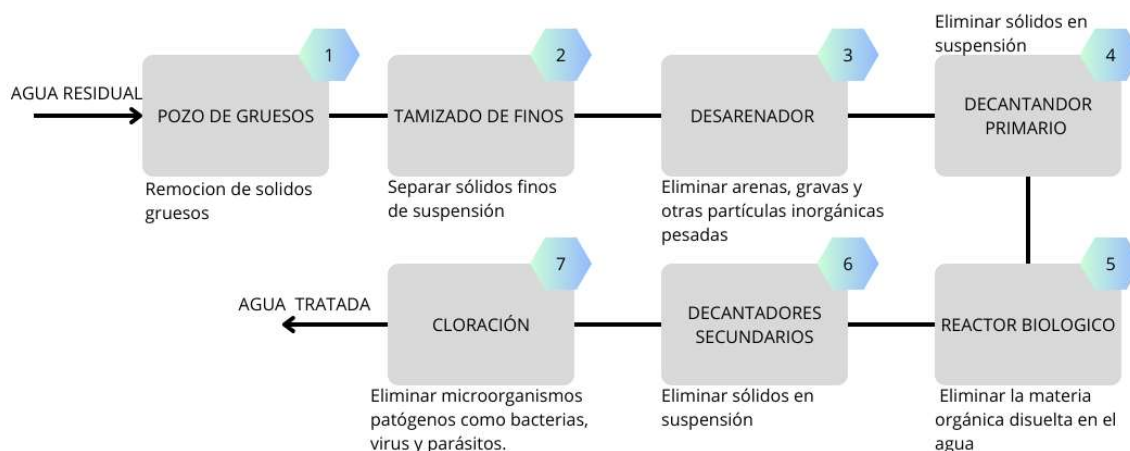
Fuente: Autor

4.2 Evaluación del desempeño de las operaciones unitarias de la PTAR Ambato

El sistema de tratamiento de la PTAR Ambato está conformado por una serie de etapas que incluyen el pretratamiento (pozo de gruesos, tamizado y desarenado/desengrasado), la decantación primaria, un reactor biológico destinado a la degradación de la materia orgánica, la decantación secundaria y, finalmente, la desinfección mediante cloración (Figura 3).

Para analizar la eficiencia operativa de cada una de estas unidades, se tomó como referencia el muestreo realizado el 27 de julio de 2025, fecha en la que se registró la mayor carga orgánica entre los tres análisis efectuados. La evaluación del desempeño de los decantadores y del reactor biológico bajo estas condiciones de mayor exigencia permite verificar si las unidades conservan su rendimiento de diseño o si evidencian señales de saturación frente a picos de carga. Asimismo, este análisis facilita la identificación de los puntos críticos del proceso donde la remoción de parámetros como el NTK y el fósforo total comienza a verse comprometida.

Figura 3 Diagrama de flujo de el tratamiento de agua



Fuente: Autor

4.2.1 Evaluación de Tamiz de finos

El tamiz de finos corresponde a la segunda etapa del pretratamiento y trabaja junto con la fase inicial, compuesta por las rejillas y el pozo de gruesos. Su objetivo principal es retirar de forma física los sólidos de mayor tamaño y residuos que podrían causar daños a los equipos ubicados en las etapas posteriores del tratamiento. Por esta razón, su eficiencia frente a parámetros disueltos es baja, tal como se observa en la Tabla 11.

La escasa remoción de sólidos totales es un comportamiento esperado, ya que el tamiz únicamente retiene la fracción particulada de los sólidos suspendidos. En cambio, la mayor parte de los sólidos totales se encuentra disuelta en el agua y, por lo tanto, atraviesa esta unidad sin ser removida.

Tabla 11 Parámetros de Tamiz de Finos

Parámetro	Unidad	Valor de entrada	Valor de salida	Eficiencia
Turbidez	NTU	64,9	64,8	0,15 %
Sólidos totales	mg/L	1096	1076	1,82 %
Sólidos suspendidos	mg/L	310	210	32,26 %
PH	PH	7,49	7,56	-

Fuente: Autor

4.2.2 Evaluación de desarenador

El desarenador funciona mediante una disminución controlada de la velocidad del flujo, lo que permite la sedimentación de materiales inorgánicos de mayor peso, como arenas y gravas, con el fin de proteger las bombas y los equipos ubicados en las etapas posteriores del tratamiento.

De acuerdo con lo presentado en la Tabla 12, la remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST) fue baja, lo cual resulta esperado en este tipo de unidad, ya que su función principal es la eliminación de material inorgánico pesado. Si bien estos materiales forman parte de los SST, representan solo una fracción de ellos, mientras que la mayor proporción corresponde a materia orgánica ligera que no logra sedimentar en esta etapa.

En contraste, la remoción de Sólidos Totales (ST) fue considerablemente mayor, lo que evidencia una eliminación efectiva de los sólidos inorgánicos sedimentables, principalmente arena. Este resultado confirma que el desarenador cumple adecuadamente su función principal, contribuyendo a la protección del equipamiento.

Asimismo, la baja eficiencia en la remoción de turbidez es consistente con el funcionamiento del desarenador, ya que la turbidez está asociada a partículas muy finas y coloidales que, al igual que la materia orgánica ligera, no se sedimentan únicamente con la reducción de la velocidad del flujo.

Tabla 12 *Parámetros del Desarenador (27 de julio de 2025)*

Parámetro	Unidad	Valor de entrada	Valor de salida	Eficiencia
Turbidez	NTU	64,8	62,7	3,24 %
Sólidos totales	mg/L	1076	916	14,87 %
Sólidos suspendidos	mg/L	210	200	4,76 %
PH	PH	7,56	7,53	-

Fuente: Autor

4.2.3 Evaluación de decantador primario

Como se aprecia en la Tabla 13, la remoción del 40 % de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) refleja un desempeño muy bueno para un decantador primario convencional. Este resultado demuestra que la unidad cumple correctamente su función principal, que es

separar por gravedad la materia orgánica particulada, logrando una reducción importante de la carga de sólidos y de materia orgánica que llega al reactor biológico.

En cuanto a los Sólidos Totales (ST), la remoción del 26,64 % es coherente con lo esperado en esta etapa, ya que la decantación primaria solo elimina la fracción suspendida de los sólidos, mientras que los sólidos disueltos permanecen prácticamente sin ser removidos.

Tabla 13 *Parámetros del Decantador primario (27 de julio de 2025)*

Parámetro	Unidad	Valor de entrada	Valor de salida	Eficiencia
Turbidez	<i>NTU</i>	62,7	57,5	35,81 %
Sólidos totales	<i>mg/L</i>	916	672	26,64 %
Sólidos suspendidos	<i>mg/L</i>	200	120	40,00 %
PH	<i>PH</i>	7,56	7,53	-

Fuente: Autor

4.2.4 Evaluación de Reactor Biológico

Como se muestra en la Tabla 14, el reactor biológico presenta un buen desempeño en la remoción de materia orgánica, acorde con lo esperado para un tratamiento secundario bajo los lineamientos del BID. La DBO₅ se reduce en un 75,56 % (de 180,1 mg/L a 42,22 mg/L) y la DQO en un 68,11 %, lo que indica que la biomasa se encuentra activa y que el sistema de aireación es adecuado.

Sin embargo, a pesar de estos resultados positivos, el comportamiento del reactor frente a los nutrientes es limitado. La alta remoción de nitrógeno amoniacal (74,24 %) evidencia que el proceso de nitrificación se desarrolla correctamente; no obstante, la baja remoción de nitrógeno total de Kjeldahl (27,27 %) pone de manifiesto la ausencia de la etapa de desnitrificación. De manera similar, la remoción de fósforo total es reducida (35,71 %), lo que confirma que el sistema no está diseñado para la eliminación efectiva de este nutriente.

Estas limitaciones en el control del NTK y del fósforo total no se ajustan a los principios de sostenibilidad ambiental promovidos por el BID, orientados a prevenir la eutrofización de los cuerpos receptores. Por ello, se considera fundamental optimizar el

reactor biológico mediante la incorporación de una zona anóxica, lo que permitiría mejorar la remoción de nutrientes y fortalecer la sostenibilidad del proyecto.

Tabla 14 *Parámetros del Reactor Biológico (27 de julio de 2025)*

Parámetro	Unidad	Valor de entrada	Valor de salida	Eficiencia
N-amoniaco	mg/L	33	8,5	74,24 %
P total	mg/L	28	18	35,71 %
DQO	mg/L	344,97	110	68,11 %
N-Kjeldahl	mg/L	110	80	27,27 %
DBO₅	mg/L	180,1	42,22	75,56 %
PH	PH	7,58	7,31	-

Fuente: Autor

4.2.5 Evaluación de Decantador secundario

Como se observa en la Tabla 15, el decantador muestra un muy buen desempeño en la etapa de clarificación, cumpliendo de manera adecuada su función dentro del proceso. La remoción de sólidos suspendidos alcanza el 92,11 %, reduciendo su concentración hasta 15 mg/L, mientras que la turbidez disminuye en un 90,48 %, lo que confirma que la sedimentación del lodo es eficiente.

Gracias a esta correcta remoción de biomasa, la carga orgánica restante también se reduce de forma importante: la DBO₅ baja a 15 mg/L y la DQO a 40 mg/L, indicando que el efluente presenta una buena calidad en términos de materia orgánica.

En relación con el fósforo total, la remoción obtenida es razonable si se considera que la planta no cuenta con un tratamiento específico para la eliminación de este nutriente.

Tabla 15 *Parámetros del Decantador secundario (27 de julio de 2025)*

Parámetro	Unidad	Valor de entrada	Valor de salida	Eficiencia
Turbidez	NTU	57,22	5,45	90,48 %
Sólidos suspendidos totales	mg/L	1064	340	68,05 %
Sólidos suspendidos	mg/L	190	15	92,11 %
PH	PH	7,31	7,35	-

Fuente: Autor

4.2.6 Evaluación de Cloración

La cloración es la etapa final de desinfección y tiene como objetivo principal eliminar los microorganismos patógenos, como bacterias, virus y protozoos, antes de que el agua tratada sea descargada. Si bien este proceso no está diseñado para remover contaminantes fisicoquímicos, puede generar algunos efectos secundarios positivos sobre ciertos parámetros.

Tal como se observa en la Tabla 16, la remoción de coliformes es sobresaliente, lo que demuestra la alta eficacia del proceso de desinfección. El valor final obtenido cumple holgadamente con los límites de descarga más estrictos, garantizando la seguridad sanitaria del efluente. Además, se registra un aumento del oxígeno disuelto, lo cual es coherente y beneficioso, ya que el contacto y la mezcla del agua en el serpentín de cloración favorecen una ligera re-aireación del efluente.

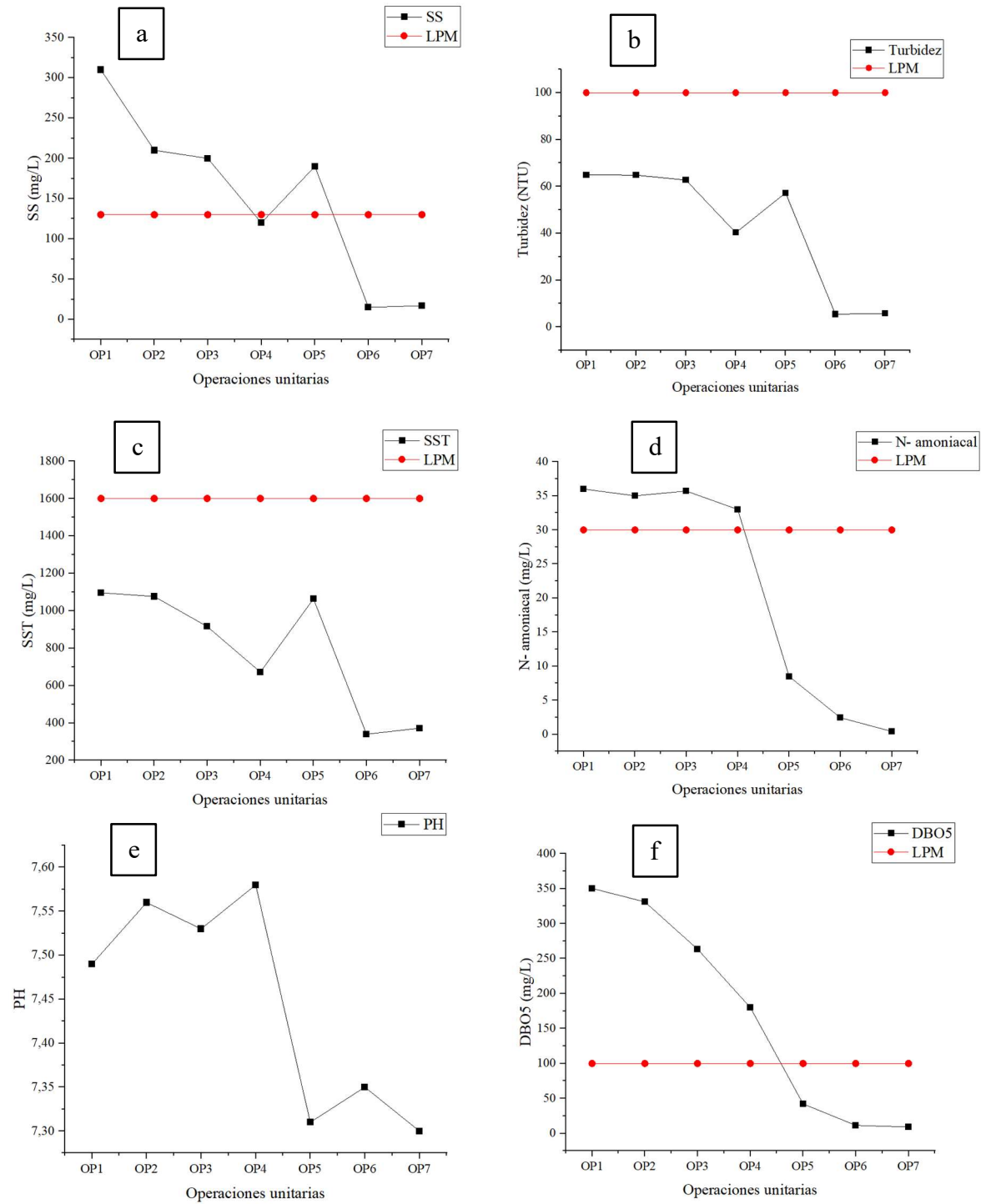
Tabla 16 *Parámetros de la Cloración (Efluente) (27 de julio de 2025)*

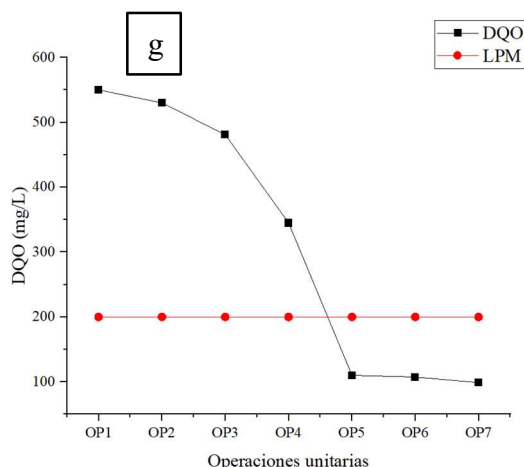
Parámetro	Unidad	Valor de entrada	Valor de salida	Eficiencia
Turbidez	<i>NTU</i>	5,45	5,77	-
Coliformes Fecales	<i>UFC</i>	8800	<0.01	99,99%
Sólidos suspendidos	<i>mg/L</i>	15	17	-
Sólidos suspendidos totales	<i>mg/L</i>	340	372	-
PH	<i>PH</i>	7,35	7,3	-

Fuente: Autor

4.2.7 Análisis por parámetro en la PTAR

Figura 4 Cumplimiento normativo: Muestreo 27 de julio



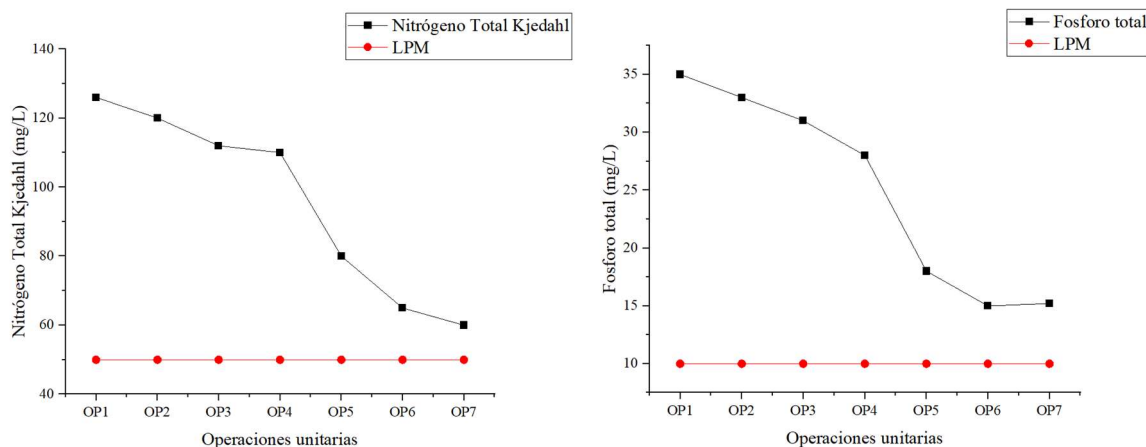


Fuente: Autor.

La Figura 4 muestra que los distintos parámetros evaluados se mantienen dentro de los límites normativos, lo que refleja un funcionamiento eficiente y técnicamente consistente a lo largo de todas las etapas del proceso de tratamiento. La eliminación de sólidos (gráficas “a” y “c”) y de turbidez (gráfica “b”) se concentra principalmente en las etapas de sedimentación primaria y secundaria, mientras que los valores elevados observados en el reactor biológico responden a la presencia normal de biomasa activa. El efluente final presenta bajas concentraciones de sólidos y turbidez, lo que evidencia una elevada eficiencia en la clarificación y el cumplimiento de los límites máximos permisibles.

Por su parte, la remoción de materia orgánica, representada por la DQO (gráfica “g”) y la DBO₅ (gráfica “f”), es alta, siendo el reactor biológico la unidad determinante en la degradación de la carga orgánica. Las concentraciones finales se encuentran ampliamente dentro de la normativa vigente y en concordancia con los lineamientos del BID. Asimismo, los valores de pH registrados a lo largo de las diferentes etapas indican un sistema químicamente estable y adecuadamente controlado.

Figura 5 Curvas de los parámetros que sobrepasan la normativa ambiental



Fuente: Autor.

La Figura 5 muestra el comportamiento del nitrógeno total Kjeldahl (NKT) y del fósforo total, dejando en evidencia las principales debilidades operativas de la PTAR Ambato. En el caso del NKT, se observa un incumplimiento de la normativa, con bajas remociones a lo largo del proceso y concentraciones aún elevadas en el efluente final. Esto confirma que, si bien la nitrificación del nitrógeno amoniacal funciona adecuadamente, el proceso de desnitrificación no está presente, lo que limita la protección del cuerpo receptor y hace necesaria la optimización del reactor biológico.

De forma similar, la remoción de fósforo total resulta insuficiente, con reducciones poco significativas tanto en la etapa primaria como en el tratamiento biológico. La concentración final supera el límite máximo permisible, lo que genera un incumplimiento normativo y un potencial riesgo ambiental. En conjunto, estos resultados evidencian la necesidad de fortalecer el tratamiento de nutrientes para cumplir con la normativa y alinearse con los lineamientos ambientales del BID.

4.3 Plan de mejora operativa y rediseño del proceso de tratamiento

4.3.1 Plan de Optimización Operativa y Mejora Continua de la PTAR

1. Fortalecimiento del Control de Calidad y Monitoreo

Con el objetivo de asegurar la sostenibilidad del sistema de tratamiento y prepararse ante el aumento de la carga afluente asociado al crecimiento poblacional, se propone fortalecer los mecanismos de control y seguimiento de la planta. Esto se lograría mediante una gestión integral que priorice el monitoreo continuo de los parámetros operativos más críticos, permitiendo anticipar problemas y tomar decisiones oportunas para mantener un funcionamiento eficiente del sistema.

- **Monitoreo de MLSS y SVI (Índice Volumétrico de Lodos):**

Implementar mediciones diarias de la concentración de sólidos suspendidos en el licor mezcla (MLSS) y de la calidad del asentamiento (SVI) en el Reactor Biológico.

Propuesta: Mantener el SVI dentro del rango óptimo de 80–150 mL/g, garantizando una buena sedimentación en el Decantador Secundario (OPE6) y evitando el arrastre de sólidos.

- **Control del Oxígeno Disuelto (OD) en el Reactor Biológico:**

Incorporar sondas de OD con ajuste automático para mejorar la eficiencia del proceso.

Propuesta: Mantener el reactor operando con un OD de 1,5 – 2,5 mg/L, optimizando la nitrificación y reduciendo el consumo energético.

- **Puntos Críticos de Control:**

Realizar un monitoreo diario de **Sólidos Suspendidos Totales (SST)** y **NKT** en la salida del Decantador Secundario (OP 6), para asegurar la estabilidad del proceso y responder oportunamente ante cualquier desviación.

2. Mantenimiento Preventivo y Control Operativo de las Unidades de Tratamiento

El mantenimiento y control sistemático de las operaciones unitarias es esencial para preservar la eficiencia global del tratamiento, evitar sobrecargas en las etapas posteriores y prolongar la vida útil de los equipos e infraestructuras.

2.1. Pozo de Gruesos

- **Mantenimiento:** Limpieza diaria o según la acumulación de sólidos, evitando la obstrucción y el rebose.
- **Control Operativo:** Verificar semanalmente el funcionamiento de las bombas y rejillas, asegurando un flujo continuo hacia el tamiz de finos.
- **Propuesta:** Implementar un registro de mantenimiento diario para cuantificar el volumen de sólidos removidos y detectar variaciones en la carga afluente.

2.2. Tamiz de Finos

- **Mantenimiento:** Lavado periódico de las mallas y control del sistema de limpieza automática.
- **Control Operativo:** Revisar el caudal de paso y la presión diferencial para identificar taponamientos tempranos.
- **Propuesta:** Instalar un medidor de pérdida de carga (manómetro diferencial) que permita programar la limpieza sin depender de observaciones visuales.

2.3. Desarenador

- **Mantenimiento:** Extracción periódica de arenas y lavado para evitar sedimentación excesiva.
- **Control Operativo:** Medir la velocidad de flujo y ajustar los tiempos de retención hidráulica para mantener el rango de diseño (30–60 s).
- **Propuesta:** Implementar un registro mensual de volúmenes de arena retirada, como indicador indirecto del arrastre de material inerte en la red.

2.4. Sedimentador Primario

- **Mantenimiento:** Limpieza y calibración de rasquetas, revisión de vertederos y purgas de fondo.
- **Control Operativo:** Medir sólidos sedimentables y DBO del efluente primario para verificar la eficiencia (>50%).
- **Propuesta:** Programar limpieza de vertederos y calibración de rasquetas cada tres meses, y establecer una hoja de control de sólidos primarios.

2.5. Reactor Biológico y Sedimentador Secundario

- **Revisión general:** Control de sopladores, difusores, válvulas y sensores.
- **Propuesta:** Programar mantenimiento semestral a los equipos de aireación y revisar la calibración de sondas de OD, pH y temperatura.

2.6. Cloración

- **Mantenimiento:** Inspección y limpieza semanal del sistema de dosificación, válvulas, y líneas de cloro.
- **Control Operativo:** Verificar el residual de cloro libre en el efluente final (0,5–1,0 mg/L) para garantizar la desinfección efectiva sin sobredosificación.
- **Propuesta:** Incorporar un sistema de control automático de dosificación con medición en línea del cloro residual.

3. Recomendaciones Técnicas para la Mejora de la Eficiencia del Sistema

A. Ajustes Operacionales

- **Optimización de la Recirculación de Lodos (RAS/WAS):**
Regular la tasa de recirculación y purga de lodos para mantener el **SRT** adecuado y conservar una biomasa activa eficiente.
- **Nivelación de Vertederos del Decantador Secundario (OP 6):**
Revisar el nivel de vertederos cada tres meses para evitar flujos desiguales y arrastre de sólidos.

B. Mejoras Estructurales

- **Incorporación de Zona Anóxica para Desnitrificación:**

Añadir una zona anóxica previa a la etapa aerobia para promover la reducción biológica de nitratos y optimizar la remoción de nitrógeno total.

4. Garantía de la Sostenibilidad Ambiental

- **Cumplimiento Normativo Futuro:**

Las mejoras planteadas permiten que el efluente final (OPE7) mantenga, incluso ante el crecimiento poblacional, los límites de descarga establecidos: $NKT \leq 50$ mg/L y $P \text{ total} \leq 10$ mg/L para cuerpos de agua dulce, contribuyendo a la protección del Río Ambato frente a la eutrofización.

4.3.2 Evaluación de las oportunidades de mejora

Se evalúa cada parámetro según la normativa ambiental, para establecer una solución en el proceso de la PTAR.

Tabla 17 Evaluación de cumplimiento de parámetros con la normativa ambiental vigente

Parámetro	Unidad	Valor actual	Valor de la normativa vigente	Observación
Turbidez	<i>NTU</i>	5,77	100	Si cumple
Sólidos totales	<i>mg/L</i>	372	1600	Si cumple
Sólidos suspendidos	<i>mg/L</i>	17	130	Si cumple
N- Amoniacal	<i>mg/L</i>	0,43	30	Si cumple
Fosforo Total	<i>mg/L</i>	15,2	10	No cumple
DQO	<i>mg/L</i>	98	200	Si cumple
N- Kjeldahl	<i>mg/L</i>	60	50	No cumple
DBO5	<i>mg/L</i>	9,174	100	Si cumple
Coliformes Fecales	UFC	<0,01	2000	Si cumple

Nota: Los valores máximos permisibles se tomaron de la Normativa Ambiental 097 A.

La comparación de los parámetros de calidad del efluente con la normativa ambiental vigente muestra que la PTAR Ambato cumple de manera adecuada con los límites

establecidos para la mayoría de los contaminantes, en particular aquellos relacionados con materia orgánica, sólidos y desinfección. Sin embargo, se presentan incumplimientos frecuentes en el nitrógeno total de Kjeldahl (NTK) y en el fósforo total, lo que evidencia una limitación del sistema biológico actual para la remoción de nutrientes.

Esta problemática se asocia a deficiencias en la configuración del reactor biológico existente, que restringen la eficiencia de los procesos de eliminación de nutrientes. Frente a esta situación, se propone el rediseño del reactor biológico, orientado a optimizar los procesos de nitrificación y desnitrificación, con el objetivo de mejorar la remoción de nitrógeno y fósforo en el efluente tratado.

4.4 Propuesta del rediseño del tratamiento biológico

Para el desarrollo del diseño del reactor biológico propuesto, se utilizaron como base los valores de calidad del agua correspondientes al efluente que ingresa a dicha unidad (Tabla 18), es decir, el agua residual proveniente del tratamiento primario. Esta selección es técnicamente pertinente, ya que el tratamiento primario reduce principalmente la fracción particulada de la carga contaminante, estabilizando el afluente que alimenta al proceso biológico.

Tabla 18 *Análisis de Laboratorio después del tratamiento primario*

Parámetro	Unidad	Valor
DQO	mg/L	344,97
DBO ₅	mg/L	180,10
SST	mg/L	672,00
NTK	mg/L	93,00
N-NH ₄ ⁺	mg/L	33,00
P total	mg/L	18,00

4.4.1 Condiciones de Operación

El reactor biológico opera con aireación mediante difusores de burbuja fina, alimentados por sopladores tipo trilobular. Los valores de diseño que fundamentan esta operación se detallan en la metodología dentro de la Tabla 6, los cuales sirven como base técnica para el sistema. El sistema mantiene un control automático del oxígeno disuelto (OD) entre 1,5 y 2,5 mg/L, rango óptimo para garantizar la nitrificación sin un consumo energético

excesivo. Las condiciones de diseño y operación determinadas para la propuesta se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19 Condiciones de diseño y operación del reactor

Parámetro	Valor calculado	Rango de referencia (ATV-DVWK-A131)	Observación
Caudal de diseño (Q)	65 664 m ³ /d (760 L/s)	—	Flujo municipal proyectado
Temperatura media	20,15 °C	15–20 °C	Clima templado andino
Edad de lodos (SRT)	4,5 días	4–8 días	Asegura nitrificación parcial
Tiempo de retención hidráulico (HRT)	13,63 h	8–16 h	En rango recomendado
MLSS (Sólidos suspendidos en licor mezcla)	4 000 mg/L	3 000–5 000 mg/L	Rango óptimo de operación
Carga másica (F/M)	0,08 kg DBO ₅ /kg MLSS·d	0,05–0,10	En rango de diseño
Carga volumétrica (Cv)	0,55 kg DBO ₅ /m ³ ·d	0,3–0,7	Acorde a normas
Relación VD/VR	0,22	0,2–0,3	Proporción anóxica–aerobia adecuada
Oxígeno disuelto (OD)	1,5–2,5 mg/L	1,0–3,0 mg/L	Controlado mediante sondas DO

Fuente: Autor

4.4.2 Dimensiones del Reactor Biológico

Tabla 20 Dimensiones geométricas del reactor

Zona	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad útil (m)	Volumen (m ³)	Nº Compartimientos
Diseñado					
Anóxica	37	18	5	3 330	2
Aerobia	70	35	5	12 250	2
Actualmente instalado					
Aerobia	60	35	5	10 500	1

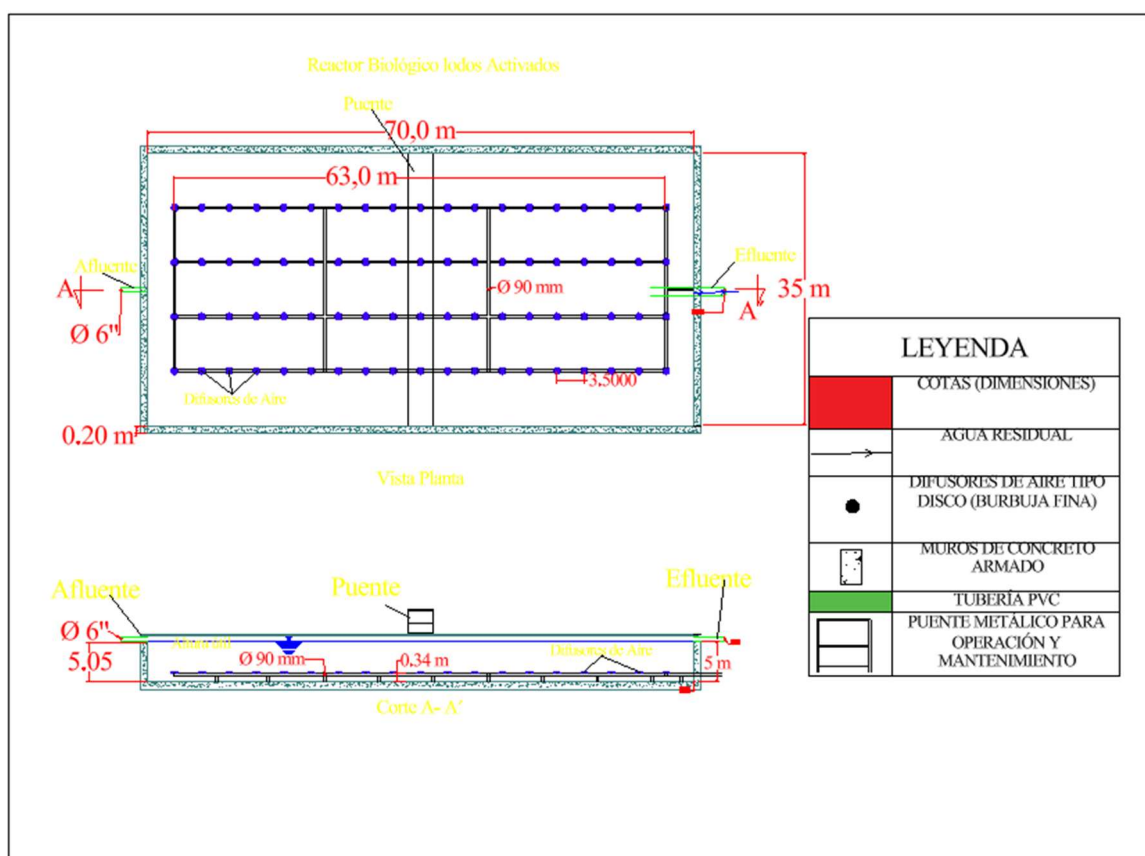
Fuente: Autor

Las dimensiones propuestas garantizan una adecuada distribución del flujo y el tiempo de contacto necesario para la remoción de DBO y nitrógeno. Al compararlas con el reactor actual de la PTAR Ambato, se evidencia que este opera únicamente con una zona

aerobia, lo que explica la ausencia del proceso de desnitrificación y los elevados valores de nitrógeno y fósforo en el efluente. Como solución técnica inmediata, se plantea la incorporación de una zona anóxica previa, lo que permitiría mejorar la remoción de nutrientes sin modificar la infraestructura principal. Considerando que la PTAR fue diseñada con una proyección de 20 años, esta intervención es suficiente para la carga actual, previendo futuras ampliaciones cuando el caudal proyectado lo requiera.

4.4.3 Planos del rediseño del reactor biológico

Figura 6 Volumen aerobio



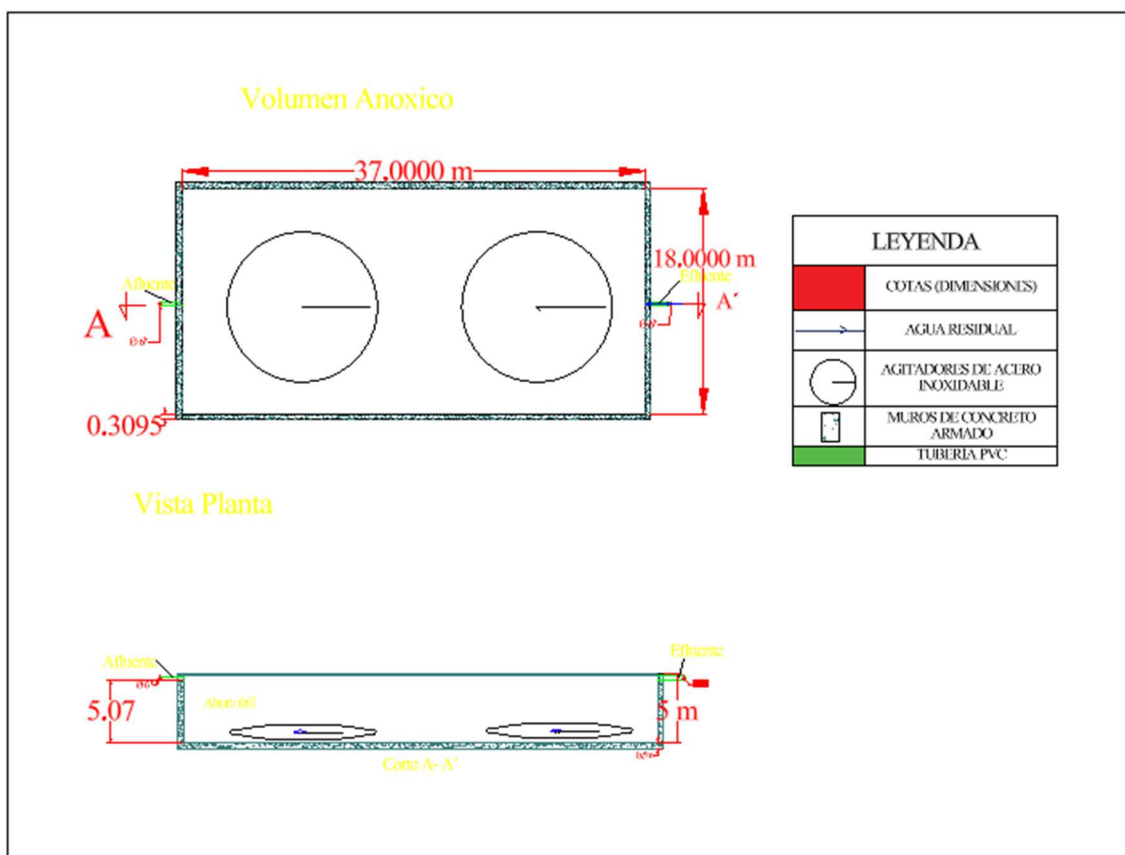
Fuente: Autor

La Figura 19 muestra el plano esquemático del volumen aeróbico del reactor biológico de lodos activados, desarrollado en AutoCAD. En la vista en planta y en el corte longitudinal se aprecia la disposición interna del sistema de aireación mediante difusores, así como el recorrido del flujo desde el ingreso del afluente hasta la salida del efluente.

Este volumen aeróbico está orientado principalmente a la oxidación de la materia orgánica y al desarrollo del proceso de nitrificación, proporcionando condiciones adecuadas de mezcla y una eficiente transferencia de oxígeno para el crecimiento y mantenimiento de la biomasa activa. La configuración presentada permite una distribución hidráulica homogénea, favoreciendo el contacto entre el sustrato y los microorganismos, y contribuyendo a la estabilidad del proceso biológico bajo las condiciones de carga actuales de la PTAR Ambato.

Cabe indicar que el volumen aerobio existente presenta un desempeño adecuado en la remoción de materia orgánica, por lo que la propuesta de optimización se enfoca en la incorporación de una etapa complementaria que permita mejorar la remoción de nutrientes, sin requerir modificaciones estructurales en la zona aerobia actualmente operativa.

Figura 7 Volumen Anóxico



Fuente: Autor

El plano presentado corresponde a la propuesta de incorporación de un volumen anóxico previo al reactor biológico existente de la PTAR Ambato, como parte de la optimización del proceso de tratamiento. La representación en vista en planta y corte longitudinal permite identificar la disposición general del compartimiento, así como el sentido del flujo hidráulico desde el afluente hacia el efluente, garantizando una circulación uniforme del agua residual.

La configuración propuesta busca asegurar condiciones hidráulicas y operativas adecuadas para el desarrollo del proceso de desnitrificación, mediante un régimen de mezcla controlada que evite la formación de zonas muertas y cortocircuitos hidráulicos. El diseño se integra funcionalmente al sistema existente, sin alterar la infraestructura principal, permitiendo una implementación progresiva y compatible con la operación actual de la planta.

4.4.4 Evaluación del Desempeño del Reactor

El reactor fue diseñado para lograr una remoción de DBO₅ superior al 90 %, reduciendo la concentración del efluente del pretratamiento (180,1 mg/L) hasta valores menores a 20 mg/L en el efluente final. Asimismo, se busca una reducción del NTK desde 93 mg/L hasta valores inferiores a 50 mg/L, de acuerdo con los límites del Acuerdo Ministerial 097A (2015) para descargas en cuerpos de agua dulce.

El sistema opera con una temperatura promedio de 20,15 °C, lo cual es favorable para los procesos de nitrificación, evitando la pérdida de actividad de las bacterias nitrificantes.

4.4.5 Aspectos Constructivos

El reactor biológico se proyecta en estructura de hormigón armado, con tabiques internos que separan las zonas anóxica y aerobia.

Cada compartimiento cuenta con los siguientes elementos técnicos:

- **Zona anóxica:** equipada con mezcladores sumergibles para mantener condiciones homogéneas y evitar la sedimentación.
- **Zona aerobia:** aireación por difusores de burbuja fina instalados en el fondo, garantizando alta eficiencia de transferencia de oxígeno.

- **Recirculación interna:** canalización hidráulica que conecta la salida de la zona aerobia con la entrada de la anóxica, promoviendo la desnitrificación.
- **Recirculación externa de lodos (RAS):** desde el decantador secundario hacia la entrada del reactor.

El modelo hidráulico adoptado es de mezcla completa, recomendado por la DWA-A131 (2000) para plantas municipales de gran capacidad. Esta configuración asegura una alta eficiencia de contacto entre la biomasa y el sustrato, optimizando la oxidación de DBO y la nitrificación biológica.

4.4.6 Parámetros de diseño del SLA según metodología de cálculo propuesta

El propósito de esta sección es presentar y analizar los principales parámetros de diseño del reactor biológico, especialmente aquellos que permiten evaluar su capacidad de tratamiento y la estabilidad del sistema frente a futuras condiciones operativas. Para ello, se consideran parámetros clave como la edad del lodo (SRT), la carga de lodos, el tiempo de retención hidráulico (HRT), la relación volumétrica anóxica/aerobia (VD/VR), la concentración de sólidos suspendidos en el licor mezcla (MLSS) y la temperatura de operación.

El análisis se desarrolla a partir de los valores obtenidos durante el proceso de diseño, teniendo en cuenta las condiciones actuales de operación de la PTAR Ambato y las proyecciones de crecimiento poblacional. Los resultados se contrastan con los rangos de referencia establecidos en la norma DWA-A131 (2016) y en literatura técnica especializada para sistemas convencionales de lodos activados con procesos de nitrificación y desnitrificación.

En la Tabla 21 se presentan los parámetros de diseño del reactor biológico determinados conforme a los lineamientos de la guía alemana DWA-A131 (2016).

Tabla 21 *Parámetros de diseño del reactor*

Parámetro	Símbolo / Unidad	Valor de diseño	Rango de referencia	Fuente / Observación
-----------	---------------------	--------------------	------------------------	-------------------------

Caudal medio diario	Q (m ³ /d)	65 664*	–	Dato de planta
Caudal medio horario	Qh (L/s)	760*	–	Dato de planta
Volumen total del reactor	V (m ³)	34 353,57	–	Cálculo propio
Tiempo de retención hidráulico	HRT (h)	13,63	6–15	DWA-A131, 2016
Edad de lodos	SRT (d)	4,5	3–7	DWA-A131, 2016
Concentración de MLSS	kg/m ³	4,0	3–6	Metcalf & Eddy (2014)
Relación de volúmenes anóx/aerobio	VD/VR	0,22	0,15–0,35	Diseño propuesto
Temperatura de operación	°C	20,15*	18–25	Medición promedio anual
Oxígeno disuelto (zona aerobia)	mg/L	1,5–2,5	1,5–3,0	Recomendado por DWA-A131
Tipo de aireación	–	Difusores de burbuja fina	–	Existente en planta
Configuración propuesta	–	A2/O (una línea actual + proyección a dos trenes)	–	Diseño propuesto
Carga de DBO5 que ingresa	(kg DBO5/d)	11826,09	-	Calculado
Carga de lodos	(kg DBO5/kg SST.d)	0,07926	-	Calculado

Producción Específica de sólidos	(kg SST producidos por carbono/kg DBO5 entrada)	2,51	-	Calculado
Producción de sólidos por degradación de carbono	(kg SST por carbono/día)	29608,07	-	Calculado
Producción de lodos totales	(kg SST/d)	33153,93	-	Calculado
Caudal de purga	(m3/d)	2631,429	-	Calculado
Sólidos que se van con la purga	(kg SST/d)	33153,926	-	Calculado
Velocidad de la zona anóxica	RPM	10-60	-	Recomendado por DWA-A131

Fuente: Autor

4.5 Presupuesto del volumen anóxico

ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. total
CIMENTACION, VIGAS Y COLUMNAS					
1	Limpieza, desmonte, trazado y replanteo	m2	666	\$ 1,02	\$ 679,32
2	Excavación a mano en material común, roca descompuesta, a cualquier profundidad y bajo cualquier condición de humedad. Incluye retiro a lugar autorizado.	M3	3663	\$ 10,00	\$ 36.630,00
3	Rellenos con material seleccionado de cantera, compactado al 95% del Proctor Modificado	M3	550	\$ 13,57	\$ 7.463,50
4	SUMINISTRO E INSTALACION DE GEOTEXTIL NT 1600	M2	670,00	\$ 4,50	\$ 3.015,00
5	SOLADO EN CONCRETO DE 2000 PSI e = 0,07 MTS	M2	666	\$ 22,00	\$ 14.652,00
6	LOSA DE FUNDACION EN CONCRETO DE 4000 PSI e=50 cms	M3	333	\$ 206,13	\$ 68.641,29

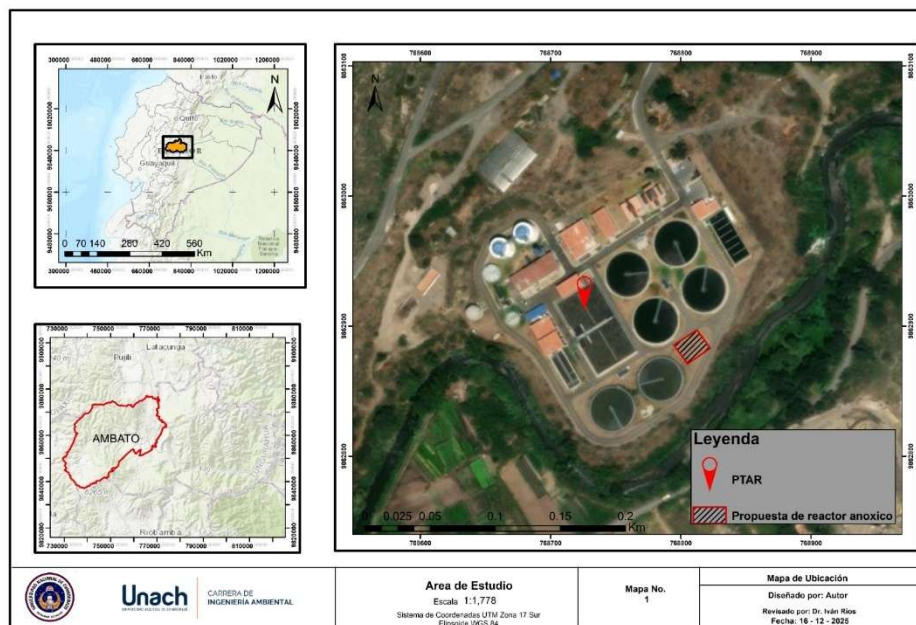
7	VIGAS DE AMARRE DE 50 x 80 cms EN CONCRETO DE 4000 PSI	ML	110	\$ 17,66	\$ 1.942,60
8	PEDESTAL EN CONCRETO DE 4000 PSI 70 x 70 x 70 cms	UND	4	\$ 114,59	\$ 458,36
9	Suministro, figurado e instalación de acero de refuerzo 420 Mpa (60000 Psi) según planos	KGS	25.000,00	\$ 2,00	\$ 50.000,00
10	PASAMANOS EN TUBERIA GALVANIZADA DE 2" A-36, según planos y especificaciones de diseño.	ML	110	\$ 48,01	\$ 5.281,10
11	ESCALERAS EN TUBERIA GALVANIZADA de 2" A-36, según planos y especificaciones de diseño	ML	12	\$ 29,20	\$ 350,40
12	CANASTA DE PROTECCION PARA ESCALERA METALICA, según planos y especificaciones de diseño	ML	12	\$ 35,14	\$ 421,68
13	TUBERIA DE CARGA Y DESCARGA EN Ø8" (INCLUYE, PASAMUROS, BRIDAS CODOS, ANCLAJES)	ML	40	\$ 21,23	\$ 849,20
Tanque					
14	Pared de CONCRETO 3500 PSI (A/C = 0.45)	M3	45,4	\$ 144,45	\$ 6.558,03
15	ESCOTILLAS EN CONCRETO DE 3500 PSI (A/C = 0.5)	UND	4	\$ 25,04	\$ 100,16
16	DISPOSITIVOS DE AIREACION	UND	2	\$ 50,00	\$ 100,00
17	Concreto para vigas de amarre f'c=21 Mpa (3000 PSI)	m3	4	\$ 17,66	\$ 70,64
Sello y Fisuras					
18	Suministro e instalación de cinta flexible para sellar juntas de construcción y dilatación SIKA PVC O-22 o similar según planos y especificaciones de diseño	m	270	\$ 1,62	\$ 437,40
19	Suministro y aplicación de sello expandible contra el paso de agua en juntas de construcción y pases de tubería SikaSwell S o similar según planos y especificaciones de diseño	m	40	\$ 1,06	\$ 42,40

20	Fondo de junta Sikarod f=6 mm o similar según planos y especificaciones de diseño	m	270	\$ 1,67	\$ 450,90
Agitadores					
21	Suministro de agitador sumergible anódico ($\approx 3-5$ kW, acero inoxidable)	un	2	\$ 18,50	\$ 37,00
22	Sistema de soporte y anclaje para agitador (guías, placas, pernos inox)	un	2	\$ 2,20	\$ 4,40
23	Instalación mecánica de agitador sumergible	un	2	\$ 1,50	\$ 3,00
24	Cableado sumergible y accesorios eléctricos del agitador	un	2	\$ 1,20	\$ 2,40
				\$	198.190,78

Fuente: Autor.

El costo estimado para la implementación del volumen anódico es de USD 198 190,78, valor que incluye la adecuación del reactor biológico existente para incorporar el proceso de desnitrificación bajo un esquema de pre-nitrificación. La localización más adecuada para la construcción del reactor propuesto se definió considerando la disponibilidad de terreno, tal como se muestra en la Figura 8. El área seleccionada se ubica dentro de la zona de tratamiento secundario, lo que facilita la integración del nuevo sistema a la línea de flujo actual de forma eficiente. Esta disposición espacial confirma que la PTAR Ambato dispone del espacio físico necesario para ejecutar la obra.

Figura 8 mapa de ubicación de la propuesta del reactor anóxico



Fuente: Autor

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

La PTAR Ambato presenta un buen desempeño en la remoción de materia orgánica, sólidos y microorganismos patógenos. Los procesos primarios y biológicos funcionan adecuadamente, reflejándose en reducciones efectivas de DBO, DQO y turbidez. Sin embargo, se identifican limitaciones en la remoción de nutrientes, especialmente del nitrógeno total de Kjeldahl y, en menor medida, del fósforo total, cuyos valores superan la normativa en algunos periodos, evidenciando la necesidad de optimizar los procesos de nitrificación y desnitrificación.

Las unidades de pretratamiento y sedimentación cumplen correctamente con la retención de sólidos y la clarificación del efluente, mientras que el reactor biológico alcanza altas eficiencias en la remoción de DBOs, DQO y nitrógeno amoniacal, lo que demuestra una biomasa activa y una aireación adecuada. No obstante, la ausencia de zonas anóxicas limita la remoción de nutrientes, generando incumplimientos en los valores de NKT y fósforo total en el efluente.

El análisis técnico indica que la incorporación de una zona anóxica al reactor biológico existente es una solución viable en el corto y mediano plazo para mejorar la remoción de nutrientes. Esta intervención permitiría optimizar el funcionamiento del sistema sin requerir modificaciones estructurales mayores, mejorar la calidad del efluente y contribuir al cumplimiento de la normativa ambiental, considerando la ampliación del sistema como una alternativa futura.

5.1 Recomendaciones

Se recomienda incorporar un compartimiento anóxico previo a la etapa aerobia del reactor biológico para habilitar la desnitrificación y mejorar la remoción de NTK y fósforo. Esta intervención es adecuada para la carga actual de la PTAR, mientras que, a largo plazo, será necesaria la ampliación a una configuración con dos trenes operativos conforme aumente el caudal proyectado.

Dado que la investigación se basó en 3 muestreos puntuales, se recomienda implementar un plan compensatorio de validación y mitigación de incertidumbre que combine: (1) uso riguroso de controles de calidad y análisis de incertidumbre; (2) aprovechamiento de datos secundarios (mensuales de 2024) y (3) medidas operativas y de muestreo futuras para fortalecer la representatividad. Estas acciones permitirán sustentar técnicamente los resultados actuales y mejorar la confiabilidad de las propuestas de diseño.

BIBLIOGRAFÍA:

- ATV-A 131. (2000). *Standard DWA-A 131E DWA Set of Rules Dimensioning of Single-stage Activated Sludge Plants*. DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall). www.dwa.de
- BID. (2022). Gestión y tratamiento de aguas residuales en América Latina: avances y desafíos. *Banco Interamericano de Desarrollo*. <https://publications.iadb.org>
- Castillo, J., Moreira, Y., & Banchón, C. (2025). Electrocoagulación de aguas residuales domésticas: Revisión sistemática de efectos operacionales. *Research, Society and Development*, 14(5), e2814548700. <https://doi.org/10.33448/rsd-v14i5.48700>
- Cisneros, B., Molina, R., & García, L. (2022). Urbanización y generación de aguas residuales en América Latina. *Revista Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 27(2), 45–58. <https://www.scielo.org>
- Comisión Nacional del Agua. (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*. www.conagua.gob.mx
- EP-EMAPA-A. (2022). *La PTAR-Ambato ‘Las Viñitas’ y el Intercambiador de Tránsito de Huachi reciben distinciones*.
- Ferrera, E., Ruigómez, I., Vela-Bastos, C., Ferreira, A., Gouveia, L., & Vera, L. (2024). Resources recovery from domestic wastewater by a combined process: anaerobic digestion and membrane photobioreactor. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(37), 49560–49573. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34468-3>
- Guevara, P., Ríos, F., & Torres, L. (2020). Proyección de caudales y carga orgánica para PTAR en función del crecimiento poblacional. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 10(3), 21–36.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2021). *Norma NTE INEN 1108: Calidad del agua para riego agrícola*. <https://www.normalizacion.gob.ec>
- Jiménez, B., Chávez, A., & Pineda, J. (2021). Características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas residuales domésticas en zonas urbanas de América Latina. *Revista Agua y Desarrollo Sostenible*, 13(4), 12–26.
- Koul, B., Yadav, D., Singh, S., Kumar, M., & Song, M. (2022). Insights into the Domestic Wastewater Treatment (DWWT) Regimes: A Review. In *Water (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 21). MDPI. <https://doi.org/10.3390/w14213542>

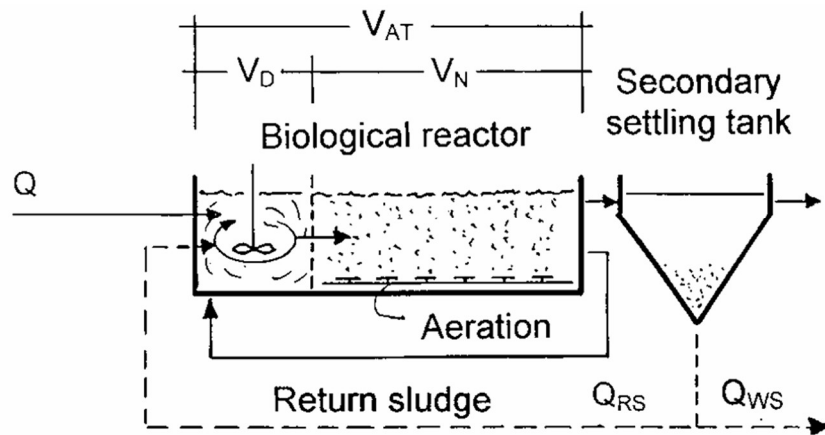
- Liu, M., Lin, Z., Li, J., Zhu, M., Tang, Z., & Li, K. (2024). Performance Assessment of Rural Decentralized Domestic Wastewater Treatment Facilities in Foshan, China. *Water (Switzerland)*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/w16131901>
- Ministerio del Ambiente, A. y T. E. (MAATE). (2021). *Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente – Libro VI, Anexo 1: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua y al Suelo*. <https://www.ambiente.gob.ec/tulsma/>
- Ministerio del Ambiente, A. y T. E. (MAATE). (2023). *Régimen de Control Ambiental y Monitoreo de Vertidos Líquidos*. <https://www.ambiente.gob.ec>
- Morales, S., Morales-Fiallos, F., Mayacela,.; Margarita, & Renteria, L. (2023). Rediseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la comunidad Chiquicha Centro perteneciente al cantón Pelileo, provincia de Tungurahua, Ecuador. *Revista Investigación y Desarrollo*. <https://doi.org/https://doi.org/10.31243/id.v18.2023.2386>
- Organización de las Naciones Unidas – ONU-Agua. (2023). *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: Asociaciones y Cooperación para el Agua* (UNESCO). <https://unesdoc.unesco.org>
- Rodríguez, L., & Méndez, V. (2021). Evaluación de la carga contaminante en aguas residuales domésticas en sistemas de alcantarillado urbano. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Ambiental*, 9(1), 33–48. <https://revistas.uta.edu.ec>
- Rodríguez, Velastequí, M. (2019). EVALUACIÓN AL PROCESO TÉCNICO, OPERATIVO Y AMBIENTAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE JIPIJAPA. *UNIVERSIDAD ESTATAL DEL SUR DE MANABÍ*, 1–23.
- Sha, C., Shen, S., Zhang, J., Zhou, C., Lu, X., & Zhang, H. (2024). A Review of Strategies and Technologies for Sustainable Decentralized Wastewater Treatment. In *Water (Switzerland)* (Vol. 16, Issue 20). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/w16203003>
- Silva, J. A. (2023). Wastewater Treatment and Reuse for Sustainable Water Resources Management: A Systematic Literature Review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 14). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su151410940>
- Sosa, A. (2018). *DIAGNOSTICO DE LA PTAR DEL MUNICIPIO DE GRANADA (CUNDINAMARCA) ANDRES FELIPE SOSA GONZALEZ 20122181163*

*UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS FACULTAD DEL
MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES INGENIERIA SANITARIA.*

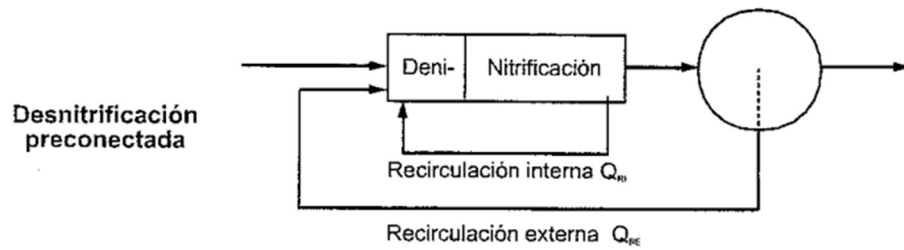
UNESCO-WWAP. (2003). Agua para todos, agua para la vida. *United Nations*, 36.

ANEXOS

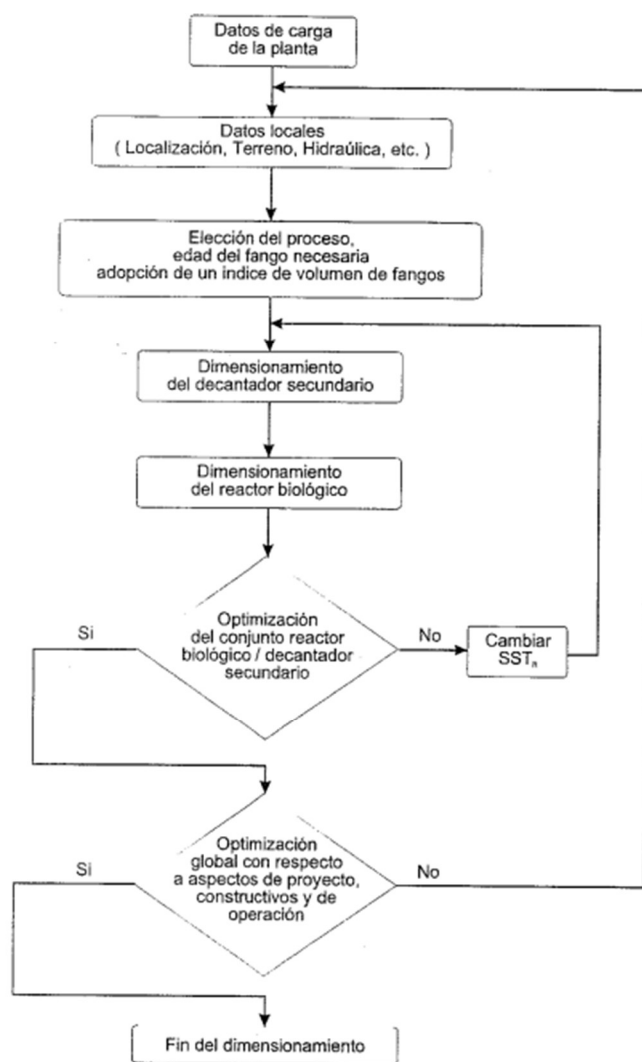
Anexo 1 Esquema general del proceso de tratamiento biológico por lodos activados.



Anexo 2 Esquema del proceso de desnitrificación en zona pre-anóxica (pre-anoxic zone denitrification)



Anexo 3 ESQUEMA DEL DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO



Anexo 4 Plano General de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ambato (PTAR Ambato)



Anexo 5 Punto de muestreo en cloración



Anexo 6 Punto de muestreo en el decantador secundario



Anexo 7 punto de muestreo en el reactor biologico



Anexo 8 punto de muestreo en la salida de tamiz de finos



Anexo 9 Punto de muestreo de la arqueta (salida de desarenador)



Anexo 10 Punto de muestreo en rejillas y pozo de gruesos



Anexo 11 Punto de muestreo Desarenador



Anexo 12 Análisis de laboratorio (N-Amoniacal)



Anexo 13 Análisis de laboratorio (Fosforo total)



Anexo 14 Análisis de laboratorio (Coliformes fecales)

