UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

"CARACTERIZACIÓN Y MODELACIÓN DE LA FRACCIÓN BIODEGRADABLE DE LA MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES MEDIANTE PARÁMETROS ASM1 PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS BIOLÓGICOS DE TRATAMIENTO"

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingenieras Ambientales

Autoras:
Chiguango Chanaluisa Heidy Yesenia
Martínez Guamán Leydi Lorena

Tutor:
Ágreda Oña José Luis

LATACUNGA – ECUADOR
Marzo 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Chiguango Chanaluisa Heidy Yesenia, con cédula de ciudadanía No. 2200153944 y Martínez Guamán Leydi Lorena, con cédula de ciudadanía No. 0504717794, declaramos ser autoras del presente Proyecto de Investigación: **"CARACTERIZACIÓN Y MODELACIÓN DE LA FRACCIÓN BIODEGRADABLE DE LA MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES MEDIANTE PARÁMETROS ASM1 PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS BIOLÓGICOS DE TRATAMIENTO"**, siendo el Ingeniero Mg. José Luis Ágreda Oña, Tutor del presente trabajo; y, eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 23 de febrero del 2026

Heidy Yesenia Chiguango Chanaluisa
C.C: 2200153944
ESTUDIANTE

Leydi Lorena Martínez Guamán
C.C: 0504717794
ESTUDIANTE

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **Chiguango Chanaluisa Heidy Yesenia**, identificada con cédula de ciudadanía **2200153944** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - LA CEDENTE es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **"CARACTERIZACIÓN Y MODELACIÓN DE LA FRACCIÓN BIODEGRADABLE DE LA MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES MEDIANTE PARÁMETROS ASM1 PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS BIOLÓGICOS DE TRATAMIENTO** ", la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Octubre 2021 - Marzo 2022

Finalización de la carrera: Octubre 2025 – Marzo 2026

Tutor: Ing. José Luis Ágreda Oña, Mg.

Tema: **"CARACTERIZACIÓN Y MODELACIÓN DE LA FRACCIÓN BIODEGRADABLE DE LA MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES MEDIANTE PARÁMETROS ASM1 PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS BIOLÓGICOS DE TRATAMIENTO"**

CLÁUSULA SEGUNDA. - LA CESIONARIA es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - OBJETO DEL CONTRATO: Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
b) La publicación del trabajo de grado.
c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - LA CESIONARIA podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 23 días del mes de febrero del 2026.

Heidy Yesenia Chiguango Chanaluisa	Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
LA CEDENTE	**LA CESIONARIA**

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **Martínez Guamán Leydi Lorena** identificada con cédula de ciudadanía **0504717794** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - LA CEDENTE es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **"CARACTERIZACIÓN Y MODELACIÓN DE LA FRACCIÓN BIODEGRADABLE DE LA MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES MEDIANTE PARÁMETROS ASM1 PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS BIOLÓGICOS DE TRATAMIENTO",** la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Octubre 2021 – Marzo 2022

Finalización de la carrera: Octubre 2025 – Marzo 2026

Tutor: Ing. José Luis Ágreda Oña, Mg.

Tema: **"CARACTERIZACIÓN Y MODELACIÓN DE LA FRACCIÓN BIODEGRADABLE DE LA MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES MEDIANTE PARÁMETROS ASM1 PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS BIOLÓGICOS DE TRATAMIENTO"**

CLÁUSULA SEGUNDA. - LA CESIONARIA es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - OBJETO DEL CONTRATO: Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

f) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
g) La publicación del trabajo de grado.
h) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
i) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
j) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - LA CESIONARIA podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 23 días del mes de febrero del 2026.

Leydi Lorena Martínez Guamán	Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
LA CEDENTE	**LA CESIONARIA**

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación con el título:

"CARACTERIZACIÓN Y MODELACIÓN DE LA FRACCIÓN BIODEGRADABLE DE LA MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES MEDIANTE PARÁMETROS ASM1 PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS BIOLÓGICOS DE TRATAMIENTO", de Chiguango Chanaluisa Heidy Yesenia y Martínez Guamán Leydi Lorena, de la carrera de Ingeniería Ambiental, considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del Aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también han incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la Pre defensa.

Latacunga, 23 de febrero del 2026

Ing. José Luis Ágreda Oña, Mg.
C.C: 0401332101
DOCENTE TUTOR

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, las postulantes: Chiguango Chanaluisa Heidy Yesenia y Martínez Guamán Leydi Lorena, con el título del Proyecto de Investigación: **"CARACTERIZACIÓN Y MODELACIÓN DE LA FRACCIÓN BIODEGRADABLE DE LA MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES MEDIANTE PARÁMETROS ASM1 PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS BIOLÓGICOS DE TRATAMIENTO"** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 23 de febrero del 2026

Ing. Vladimir Ortiz Bustamante, Ph.D.
C.C: 0502188451
LECTOR 1 (PRESIDENTE)

Dra. Kalina Fonseca Largo, Ph.D.
C.C: 1723534457
LECTOR 2 (MIEMBRO)

Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila, Mg.
C.C: 0503220063
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

Agradezco a toda mi familia porque crecimos juntos, soñamos juntos y aprendimos juntos el significado de la vida

A mis padres por permanecer a mi lado con su apoyo constante sin importar su cansancio o desvelo gracias por siempre permanecer juntos con amor.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi Facultad de Ciencias Agropecuaria y Recursos Naturales en especial a la carrera de Ingeniería ambiental por sus conocimientos a lo largo de mi formación académica.

A mi mejor amiga, Leydi Lorena Martínez Guaman, quien ha sido un pilar fundamental a lo largo de este camino. Gracias por el tiempo compartido, por la complicidad que fortaleció nuestra amistad y por cada vivencia que se convirtió en aprendizaje. Tu apoyo incondicional, tu escucha sincera y tu presencia constante han sido un regalo invaluable en cada etapa de este proceso.

A todas las personas que me acompañaron durante este recorrido, expreso mi más profundo agradecimiento por cada palabra de aliento, cada consejo oportuno y cada enseñanza brindada. Sus gestos, por pequeños que parecieran, marcaron profundamente mi vida y contribuyeron de manera significativa a mi crecimiento personal y académico.

A mi tutor de tesis, el Ingeniero José Luis Ágreda Oña por sus enseñanzas su compromiso y acompañamiento académico a lo largo de mi proceso universitario.

Heidy Yesenia Chiguango Chanaluisa

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ser mi refugio en los momentos de debilidad, mi luz en medio de la incertidumbre y quien sostuvo mis pasos cuando el camino parecía difícil.

A mis padres Jorge y Emma, hermano Jahir y a toda mi familia, por ser mi apoyo incondicional, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por no dejarme caer y levantarme cada vez que lo necesité. Gracias por enseñarme, con su ejemplo, que todo sacrificio vale la pena y que los sueños se alcanzan con esfuerzo, perseverancia y valores firmes.

A mi mejor amiga, Heidy Chiguango, por el tiempo, la complicidad y las vivencias compartidas a lo largo de este viaje. A todas las personas que han caminado a mi lado en este proceso, gracias por cada palabra de aliento, cada consejo sincero, cada enseñanza y cada lección que marcaron mi vida.

A mi fiel compañero Monchito, por ser mi compañía incondicional en los días largos y las noches de desvelo. Gracias por tu amor sincero, por tu presencia silenciosa pero reconfortante, tu compañía hizo este camino más ligero y lleno de ternura.

A mi docente tutor, Ing. José Luis Agreda, por su paciencia, dedicación y acompañamiento constante durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por compartir sus conocimientos y por impulsarme a dar siempre lo mejor de mí a lo largo de mi formación profesional.

Leydi Lorena Martínez Guamán

DEDICATORIA

A mi madre, ***Lilia Piedad Chanaluisa Chanaluisa*** *quien con su fortaleza de acero sostiene y guía mi camino a quien amo y por quien he logrado cumplir mis sueños agradezco tus palabras de aliento, de lucha y amor incondicional, esta meta la entrego a ti quien ha sido lo mejor que tengo en mi vida.*

A mi padre, ***Pedro Bartolo Chiguango Arévalo*** *quien ha sido mí, amigo, compañero y cómplice en todas las etapas de mi vida a logrado marcar mi camino universitario, me ha demostrado que las fortalezas vienen de las luchas silenciosas, su sacrificio diario, su dedicación constate e incondicional, su valentía y entrega a lo largo de vida.*

A mis hermanas las cuales han sido mis compañeras de vida les agradezco por caminar conmigo a lo largo de mis etapas llenas te alegrías y tristezas.

A mis sobrinos quienes con sus inocencias han logrado un significado de amor y cariño constante.

Heidy Yesenia Chiguango Chanaluisa

DEDICATORIA

A mi padre, Jorge Raúl Martinez, pilar fundamental en mi vida y mi mayor inspiración. Gracias por su apoyo y amor incondicional, por cada sacrificio silencioso que realizo para que pudiera alcanzar cada una de mis metas. Su ejemplo de esfuerzo y dedicación ha sido la guía que me impulsa a seguir adelante.

A mi madre, Emma Adalguiza Guamán, quien forjo mi carácter y mis valores desde que era una niña. Todo lo que soy hoy lleva la huella de su amor y enseñanza.

A mi pequeño hermano, Jahir Martinez, quien con su amor incondicional ha sido una motivación constante para convertirme en una mejor persona y un ejemplo para él.

A toda mi familia, son lo más valioso que Dios me dio. Les dedico todos mis logros.

Leydi Lorena Martínez Guamán

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TÍTULO: "CARACTERIZACIÓN Y MODELACIÓN DE LA FRACCIÓN BIODEGRADABLE DE LA MATERIA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES MEDIANTE PARÁMETROS ASM1 PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS BIOLÓGICOS DE TRATAMIENTO"

Autoras:
Chiguango Chanaluisa Heidy Yesenia
Martínez Guamán Leydi Lorena

RESUMEN

La adecuada caracterización de la materia orgánica en aguas residuales constituye un elemento clave para comprender su comportamiento biológico y su potencial impacto ambiental. El objeto de investigación del presente estudio fue evaluar la composición biocinética de la materia orgánica presente en aguas residuales del campus CEASA mediante su fraccionamiento bajo el marco del Activated Sludge Model No. 1 (ASM1), con el fin de optimizar la interpretación del proceso biológico de tratamiento. La metodología incluyó la determinación de DQO filtrada (SCOD), $CBOD_5$ y $CBOD_{20}$ mediante SM 5210 B con inhibición de nitrificación (ATU), complementada con ensayos de respirometría para estimar tasas de consumo de oxígeno (OUR). A partir de la relación DQO/DBO y del análisis cinético, se estimaron las fracciones Ss (fácilmente biodegradable), Xs (lentamente biodegradable) y Si (soluble inerte), integrando posteriormente los resultados en una modelación simplificada basada en el modelo ASM1. Los resultados mostraron que la SCOD del efluente se ubicó en el rango de 400–430 mg/L, mientras que la fracción biodegradable total fue cercana a 49 mg DQO/L. Se estimaron valores de Ss ≈ 24,3 mg DQO/L y Xs ≈ 24,8 mg DQO/L, evidenciando una distribución prácticamente equivalente entre fracciones rápida y lenta, con una relación $CBOD_5/CBOD_{20}$ ≈ 0,49. Asimismo, se identificó una fracción soluble inerte dominante dentro de la SCOD. Se concluye que el fraccionamiento biocinético proporciona una interpretación más robusta del comportamiento del efluente que el uso exclusivo de DBO_5, permitiendo anticipar demandas oxigénicas retardadas y riesgos ambientales potenciales. Estos hallazgos fortalecen la aplicación de modelos cinéticos como herramienta técnica para la optimización del tratamiento biológico y la gestión ambiental preventiva.

Palabras clave: Caracterización biocinética, Aguas residuales, Activated Sludge Model No. 1 (ASM1), Fraccionamiento de DQO y Respirometría.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCE AND NATURAL RESOURCES

THEME: "CHARACTERIZATION AND MODELING OF THE BIODEGRADABLE FRACTION OF ORGANIC MATTER IN WASTEWATER USING ASM1 PARAMETERS FOR THE OPTIMIZATION OF BIOLOGICAL TREATMENT SYSTEMS"

AUTHORS:

Chiguango Chanaluisa Heidy Yesenia
Martinez Guaman Leydi Lorena

ABSTRACT

The proper characterization of organic matter in wastewater constitutes a key element for understanding its biological behavior and its potential environmental impact. The objective of this study was to evaluate the biokinetic composition of the organic matter present in wastewater form the CEASA campus through its fractionation under the framework of the activated sludge model N° 1 (ASM1), in order to optimize the interpretation of the biological treatment process. The methodology includes the determination of filtered DQO (SCOD), $CBOD_5$ using Standard Method 5210 B with nitrification inhibition (ATU), complemented by respirometric tests to estimate oxygen uptake rates (OUR). Based on the DQO/DBO ratio and kinetic analysis, the fractions Ss (readily biodegradable), Xs (slowly biodegradable), and Si (soluble inert) were estimated, and the results were subsequently integrated into a simplified modeling approach based on ASM1. The results showed that the effluent SCOD ranged from 400-430 mg/L, while the total biodegradable fraction was approximately 49 mg DQO/L. Estimated values were Ss ≈ 24,3 mg DQO/L y Xs ≈ 24,8 mg DQO/L, indicating a nearly equivalent distribution between readily and slowly biodegradable fractions, with a $CBOD_5/CBOD_{20}$ ratio of approximately 0,49. Additionally, a dominant soluble inert fraction within the SCOD was identified. It is concluded that biokenetic fractionation provides a more robust interpretation of effluent behavior that the exclusive use of DBO_5, enabling the anticipation of delayed oxygen demands and potential environmental risks. These findings strengthen the application of kinetic models as a technical tool for optimizing biological treatment processes and preventive environmental management.

Keywords: biokinetic characterization, wastewater, activated sludge model N° 1 (ASM1), COD fractionation, respirometry.

ÍNDICE DE CONTENIDO.

DECLARACIÓN DE AUTORÍA....ii

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.... iii

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR....v

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN....vii

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN viii

AGRADECIMIENTO ix

AGRADECIMIENTO x

DEDICATORIA....xi

DEDICATORIA....xii

RESUMEN xiii

ABSTRACT....xiv

1. NFORMACIÓN GENERAL....2

2. INTRODUCCIÓN....3

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO....4

4. BENEFICIARIO DEL PROYECTO....7

4.1. Beneficiarios Directos 7

4.2. Beneficiarios Indirectos.....7

5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 8

6. OBJETIVOS DEL PROYECTO 10

6.1. Objetivo General 10

6.2. Objetivos Específicos 11

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS 11

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA TÉCNICA 11

8.1. Contaminación Del Agua 12

8.2. Aguas Residuales 12

8.3. Caracterización de Aguas Residuales 12

8.3.1. Características químicas 12

8.3.2. Características físicas 13

8.3.3. Características biológicas 13

8.4. Demanda Química de Oxígeno (DQO) 14

8.5. Biodegradabilidad de la Materia Orgánica 14

8.6. Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO) 15

8.6.1. Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO_5) 15

8.6.2. Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO_{20}) 15

8.7. Toma de Muestras 16

8.7.1. Muestreo 16

8.7.2. Etiquetado 16

8.7.3. Preservación de la muestra 17

8.8. Técnicas para determinar el DQO 19

8.8.1. Método de Dicromato de Potasio 19

8.9. Relación de la DQO y la $\boldsymbol{DBO5}$ como indicador de biodegradabilidad 20

8.9.1. Indicadores de biodegradabilidad según en la relación del DQO y la DBO_5 20

8.9.2. Fraccionamiento de la DQO (Ss, Xs, Si, Xi) 20

8.10. Planta de Tratamientos de Aguas Residuales 21

8.11. Tratamiento de aguas 21

8.11.1. Niveles de tratamientos de aguas residuales 22

8.12. Modelación de lodos activados ASM1 23

8.12.1. Enfoque y alcance del ASM1 24

8.13. RStudio 24

8.14. Análisis estadístico de datos 24

8.14.1. Análisis de varianza (ANOVA) 24

8.14.2. Planteamiento de hipótesis 24

9. PREGUNTA CIENTÍFICA O HIPÓTESIS 25

10. METODOLOGÍA 25

10.1. Área de Estudio 25

10.2. Enfoque y tipo de investigación 26

10.2.1. Enfoque Cualitativo 27

10.2.2. Enfoque cuantitativo 27

10.3. Diseño Metodológico 27

10.3.1. Fases de investigación 28

10.4. Diseño Experimental 29
10.5. Técnicas e Instrumentos 31
10.5.1. Técnicas 31
10.5.2. Instrumentos 31
10.6. Equipos, materiales y herramientas. 31
10.6.1. Equipos 31
10.6.2. Materiales 31
10.6.3. Herramientas 32
10.7. Metodología para el Análisis de Resultados 32
10.7.1. Variables experimentales (Parámetros) 32
10.7.2. Procedimientos Analíticos 33
11. RESULTADOS 37
11.1. Resultados de Demanda Química de Oxígeno (DQO). 37
11.2. Resultados de DBO_5. 39
11.3. Resultados de la DBO_{20} en el tanque de lodos activados 39
11.4. Análisis del consumo de oxígeno disuelto en sistemas cerrados. 40
11.4.1. Calculo OUR (Oxygen Uptake Rate). 40
11.5. Resultados ANOVA 45
12. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 47
12.1. Variación Temporal de la DQO Filtrada (SCOD) 47
12.2. Tasa de Consumo de Oxígeno en Sistemas Cerrados (OUR) 48

12.3. Análisis de $CBOD_5$ y $CBOD_{20}$ 49
12.3.1. Evaluación Biocinética de la Biodegradación Carbonácea 50
12.4. Modelación y Simulación Biocinética según la ASM1 54
12.4.1. Comportamiento de la fracción Ss (sustrato fácilmente biodegradable) 55
12.4.2. Dinámica de la fracción Xs 56
12.4.3. Estabilidad de la fracción Si (sustrato soluble inerte) 56
12.5. Interpretación de la DQO ejercida acumulada por Ss y Xs 57
12.6. Implicaciones para el análisis y diseño de sistemas biológicos 57
12.6.1. Predominio inicial de la fracción fácilmente biodegradable (Ss) 57
12.6.2. Importancia cuantitativa de la fracción lentamente biodegradable (Xs) 58
12.7. Elevada fracción soluble inerte (Si) dentro de la SCOD 58
12.8. Diferenciación temporal clara de la COD ejercida por Ss y Xs 59
12.9. Implicaciones directas para la interpretación del OUR y la operación del sistema 59
12.10. Presión oxigénica ejercida por la fracción biodegradable 60
12.10.1. Riesgo de agotamiento del oxígeno disuelto y estrés ecológico 60
12.10.2. Implicaciones acumulativas sobre la calidad del río 61
13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 63
13.1. Conclusiones 63
13.2. Recomendaciones 64

14. BIBLIOGRAFÍAS 65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistema de tareas para los objetivos.....11

Tabla 2. Técnicas generales para la conservación de muestras - análisis Fisicoquímico. 18

Tabla 3. Calificación de la biodegrabilidad. 20

Tabla 4. Punto de muestreo coordenadas (UTM). 32

Tabla 5. Variables a calcular. 33

Tabla 6. Resultados diarios de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). 38

Tabla 7. Resultado de DBO_5 del proceso de lodos activados. 39

Tabla 8. Resultado de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a veinte días (DBO_{20}). .39

Tabla 9. OD en sistemas cerrados. 40

Tabla 10. Estadísticos descriptivos de SCOD (mg O_2/L) por periodo. 45

Tabla 11. ANOVA de un factor para SCOD (mg O_2/L) por periodo. 45

Tabla 12. Prueba no paramétrica de respaldo (Mann–Whitney U) para SCOD por periodo. 46

Tabla 13. ANOVA de un factor para tasas instantáneas de consumo de OD ($-\Delta OD/\Delta t$) entre muestras. 46

Tabla 14. Biocinética ASM1 para microrganismos heterótrofos. 51

Tabla 15. Parámetros biocinéticos estimados a partir de $CBOD_5$ y $CBOD_{20}$ (modelo de primer orden). 53

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1. Área de estudio. 26

Figura 2. Sistema al vacío para el OD. 36

Figura 3. Muestra 1- OUR 42

Figura 4. Muestra 2 – OUR 43

Figura 5. Muestra 3 – OUR. 43

Figura 6. Muestra 4 - OUR. 44

Figura 7. Variación temporal de la demanda química de oxígeno filtrada (SCOD) en el afluente. 48

Figura 8. Evolución del oxígeno disuelto en sistema cerrado para la estimación de la tasa de consumo de oxígeno (OUR) en presencia de ATU. 49

Figura 9. Simulación ASM1. 55

ABREVIATURAS

ANOVA: Análisis de Varianza

ASM1: Activated Sludge Model No. 1 (Modelo de Lodos Activados No. 1)

ATU: Inhibidor de nitrificación

hB: Coeficiente de decaimiento endógeno

$CBOD_5$: Carbonaceous Biochemical Oxygen Demand a cinco días

$CBOD_{20}$: Carbonaceous Biochemical Oxygen Demand a veinte días

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno

DBO_5: Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días

DBO_{20}: Demanda Bioquímica de Oxígeno a veinte días

DQO: Demanda Química de Oxígeno

Ks: Constante de semisaturación del sustrato

µH: Velocidad específica máxima de crecimiento heterótrofo

OD: Oxígeno disuelto

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

OUR: Oxygen Uptake Rate (Tasa de consumo de oxígeno)

SCOD: Soluble Chemical Oxygen Demand (DQO soluble filtrada)

Si: Sustrato soluble inerte

Ss: Sustrato fácilmente biodegradable

UTM: Universal Transverse Mercator (Sistema de coordenadas)

Xi: Sustrato particulado inerte

Xs: Sustrato lentamente biodegradable

YH: Coeficiente de rendimiento heterótrofo

1. NFORMACIÓN GENERAL

Título

“Caracterización y modelación de la fracción biodegradable de la materia orgánica en aguas residuales mediante parámetros ASM1 para la optimización de sistemas Biológicos de Tratamiento”

Lugar de ejecución.

Salache – Latacunga – Cotopaxi

Institución, unidad académica y carrera que auspicia

Universidad Técnica de Cotopaxi-Facultad de Ciencias Agropecuarias y de Recursos naturales-Ingeniería ambiental

Nombres de equipo de investigadores

Tutor: Ing. José Luis Ágreda Oña, Mg.

Lector 1 (presidente): Ing. Mg. Vladimir Ortiz Bustamante

Lector 2: Dra. Kalina Marcela Fonseca Largo, PhD.

Lector3: Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila Mg

Autores: Chiguango Chanaluisa Heidy Yesenia e Martínez Guamán Leydi Lorena

Área de Conocimiento.

Tratamiento de Aguas Residuales

Línea de investigación:

Análisis, modelación y tratamiento de aguas.

Línea de Vinculación:

Gestión ambiental, optimización de tratamiento de aguas residuales.

2. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso indispensable para el desarrollo de los ecosistemas ambientales y la vida humana. En las últimas décadas, el uso de agua se ha incrementado significativamente como consecuencia del crecimiento poblacional, lo que a su vez ha intensificado la presencia de agentes nocivos en los cuerpos de agua, debió al aumento de contaminantes durante los procesos productivos y actividades de la vida diaria (J. C. Díaz González, 2016). La creciente descarga de aguas residuales domésticas e industriales siguen siendo una de las principales causas de deterioro de la calidad del agua (Jiang et al., 2023), tanto a nivel local como global. Dentro de estas descargas la materia orgánica biodegradable es especialmente relevante, ya que durante su proceso de descomposición consume oxígeno, produce lodos y puede generar inestabilidad en los sistemas de tratamiento. Estudios recientes han demostrado, que cuando esta fracción no se caracteriza adecuadamente, los procesos biológicos pueden operar de forma ineficiente y requerir mayor consumo de energía de la necesaria (C. M. Díaz González, 2024).

De este modo, comprender el comportamiento esta fracción es clave para mejorar el funcionamiento de los sistemas de depuración activa. Además, los sistemas de lodos activados constituyen en la actualidad la tecnología más utilizada para el tratamiento biológico de aguas residuales, su desempeño depende en gran medida de la correcta identificación de las fracciones que componen la materia orgánica, como la fracción rápidamente biodegradable, la fracción lentamente biodegradable y la fracción inerte. Sin embargo, en Latinoamérica la información disponible sobre la composición precisa de estas fracciones aun es limitada (Liu et al., 2022). Por lo tanto, la aplicación de herramientas de modelación resulta fundamental para comprender la dinámica interna de los procesos biológicos y mejorar su desempeño.

Entre los modelos más utilizados, se encuentra Modelo de Lodos Activados No. 1 (ASM1), ya que su estructura permite representar el crecimiento heterótrofo, la degradación de sustratos orgánicos y la respiración endógena. Estudios recientes han demostrado que la

calibración adecuada del ASM1, basada en parámetros experimentales como las pruebas respirometricas, mejora sustancialmente la capacidad predictiva del modelo (Abdel-Shafy et al., 2022), sin embargo, el uso del modelo correctamente se requiere una caracterización rigurosa de la fracción biodegradable de la materia orgánica. Sin embargo, para la correcta aplicación de dicho modelo se requiere una caracterización rigurosa de la fracción biodegradable de la materia orgánica.

En este contexto, la presente investigación se orienta a la caracterización y modelación de la fracción biodegradable de la materia orgánica en aguas residuales del sistema de lodos activados del Campus CEASA, mediante el uso del Modelo ASM1 y técnicas experimentales de laboratorio. Este enfoque permitirá generar información local confiable sobre la biodegradabilidad del influente, reducir la incertidumbre en la calibración del modelo y contribuir a la optimización operativa del sistema, en términos de consumo energético, estabilidad del proceso y calidad del efluente.

Finalmente, el estudio adquiere una elevada relevancia ambiental, técnica y social, ya que contribuye al fortalecimiento de la gestión del agua y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS 6 (agua limpia y saneamiento) y el ODS 12 (producción y consumo responsable). Al proporcionar una base científica para la optimización de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en Ecuador, esta investigación aporta al desarrollo de tecnología.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El tratamiento biológico de aguas residuales es un proceso complejo que depende de la interacción entre la composición del afluente y la actividad metabólica de los microorganismos que lo degradan. En este contexto, la caracterización de la materia orgánica en términos de su fracción fácilmente biodegradable (Ss) y lentamente biodegradable (Xs) se convierte en un aspecto esencial para comprender la eficiencia y la estabilidad de los sistemas de lodos

activados. Estas fracciones definen la velocidad y la magnitud del consumo de oxígeno, la generación de biomasa y la remoción de DQO, por lo que su estudio tiene un impacto directo sobre la optimización energética y la sostenibilidad operativa de las plantas de tratamiento (Espinosa Rodríguez et al., 2024).

El modelo ASM1 (Activated Sludge Model No. 1) conceptualiza la materia orgánica biodegradable en dos componentes: la fracción soluble biodegradable (Ss), que es utilizada directamente por los microorganismos heterótrofos, y la fracción particulada biodegradable (Xs), que requiere un proceso previo de hidrólisis antes de ser asimilada. Esta distinción es crucial, pues la fracción Ss determina el comportamiento dinámico inicial del sistema, la respuesta inmediata ante cargas de sustrato, mientras que la fracción Xs controla la cinética de largo plazo, la estabilidad del proceso y la producción de lodos (Males Álvarez et al., 2023). Sin una correcta diferenciación de estas fracciones, el diseño y control de un reactor biológico pueden basarse en supuestos erróneos, generando desviaciones importantes en los balances de oxígeno, en la eficiencia de remoción o en la simulación de la carga orgánica residual (Changoluisa Tandalla & Oña Chuquimarca, 2024).

La mayoría de las plantas de tratamiento en América Latina, incluidas las ecuatorianas, continúan utilizando valores empíricos o bibliográficos extranjeros para representar la composición de sus influentes. Sin embargo, las características locales, como el tipo de dieta, hábitos de consumo, clima, composición de vertidos industriales y nivel de pretratamiento, alteran la proporción entre Ss y Xs de forma significativa (Jiang et al., 2023), Estudios recientes evidencian que las variaciones en la relación Ss/Xs pueden modificar la respuesta cinética del modelo ASM1 en más del 40 %, afectando la simulación de procesos de nitrificación y la predicción del consumo de oxígeno (Elgindy et al., 2025). En consecuencia, la caracterización experimental de estas fracciones no solo aporta información técnica, sino que se convierte en una herramienta estratégica de gestión ambiental.

La determinación experimental de Ss y Xs mediante técnicas como la respirometría (OUR), la filtración con arrastre biológico y los ensayos de aireación prolongada permite obtener información real sobre la fracción biodegradable disponible y la velocidad de degradación de la materia orgánica. Estas metodologías, además de ser reproducibles, se ajustan a los lineamientos del modelo ASM1 y posibilitan calibrar con precisión los parámetros cinéticos μH, Ks, YH y bH, mejorando la capacidad predictiva del modelo y la interpretación de los fenómenos de hidrólisis y consumo de sustrato (Espinosa Rodríguez et al., 2024; Males Álvarez et al., 2023).

Desde el punto de vista operativo, conocer las proporciones de Ss y Xs permite establecer estrategias de control más eficientes. Por ejemplo, una alta proporción de Ss sugiere una respuesta rápida del sistema y un consumo elevado de oxígeno en el corto plazo, lo que obliga a un control fino de la aireación para evitar sobre oxidación o pérdida de biomasa. En contraste, una alta proporción de Xs implica un proceso más lento, con riesgo de acumulación de sólidos y mayor producción de lodos. Estas diferencias afectan directamente el balance energético y el costo operativo de la planta (Vázquez-Mejía et al., 2013).

Además, la adecuada cuantificación de estas fracciones resulta esencial para establecer indicadores de desempeño ambiental. Los efluentes con predominancia de fracciones Xs pueden presentar mayor carga residual incluso tras tratamientos secundarios, lo que compromete el cumplimiento de normativas ambientales. En cambio, identificar una elevada fracción Ss podría permitir optimizar el proceso mediante estrategias como aireación intermitente, control por potencial redox o dosificación secuencial del caudal (Pire Sierra et al., 2011).

Desde una perspectiva científica y académica, la investigación propuesta contribuye a la generación de conocimiento local sobre la biodegradabilidad de las aguas residuales en Ecuador, enmarcada en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 6 y 12). A nivel

tecnológico, ofrece una metodología aplicable en plantas de tratamiento, laboratorios universitarios y estudios de diagnóstico ambiental, fortaleciendo la capacidad nacional de calibración de modelos biológicos. Finalmente, desde el punto de vista ambiental, el estudio de las fracciones Ss y Xs permite formular estrategias que mejoren la eficiencia de remoción de contaminantes, reduzcan la huella energética del tratamiento y promuevan una gestión más sostenible de los recursos hídricos (Espinosa Rodríguez et al., 2024; Males Álvarez et al., 2023).

En síntesis, la justificación de esta investigación radica en la necesidad de determinar de forma precisa y contextualizada la fracción fácilmente biodegradable y la fracción de biodegradación lenta presentes en el influente, con el fin de mejorar la comprensión, simulación y eficiencia de los sistemas de tratamiento biológico. El estudio no solo responde a un vacío técnico en el ámbito nacional, sino que además aporta una base sólida para la optimización energética, económica y ambiental de las plantas de tratamiento, reforzando el vínculo entre investigación aplicada, ingeniería ambiental y desarrollo sostenible.

4. BENEFICIARIO DEL PROYECTO

Los beneficiarios del presente proyecto se dividen de forma directa e indirecta, los cuales se detallan a continuación:

4.1. Beneficiarios Directos

Los beneficiarios directos corresponden a la comunidad de la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, conformada por una población aproximada de 2100 personas, entre las cuales se encuentran estudiantes y docentes de la Universidad técnica de Cotopaxi, extensión CEASA.

4.2. Beneficiarios Indirectos.

Los beneficiarios indirectos corresponden a las poblaciones ubicadas en los alrededores de la institución Universitaria, en el sector Salache, incluyendo las comunidades del área de

influencia donde opera el sistema de tratamiento, quienes se beneficiarán de manera indirecta como resultado de la optimización de procesos biológicos.

5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El tratamiento biológico de aguas residuales mediante sistemas de lodos activados constituye una de las tecnologías más extendidas para la eliminación de materia orgánica y nutrientes en efluentes domésticos e industriales. La eficacia de estos sistemas depende en gran medida de la comprensión de los procesos bioquímicos involucrados en la degradación de la materia orgánica y la estabilización de la biomasa. Para este propósito, los modelos matemáticos han adquirido gran relevancia como herramientas de diagnóstico, predicción y optimización de la operación de plantas de tratamiento. Entre ellos, el Activated Sludge Model No. 1 (ASM1) que se ha consolidado como una referencia fundamental al describir las interacciones entre las fracciones biodegradables de carbono y los procesos de nitrificación y desnitrificación (Espinosa Rodríguez et al., 2024).

Sin embargo, la precisión del ASM1 y de cualquier modelo derivado depende fuertemente de una caracterización detallada del afluente, particularmente de la composición de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). La DQO no se comporta como una variable homogénea; sino que se divide en fracciones con distinto comportamiento biológico: soluble biodegradable (Ss), particulada biodegradable (Xs), soluble inerte (Si) y particulada inerte (Xi). Esta descomposición permite modelar con mayor exactitud los fenómenos de hidrólisis, crecimiento heterótrofo y producción de lodos; no obstante, su determinación experimental continua siendo un desafío técnico (Males Álvarez et al., 2023).

En el contexto latinoamericano, y particularmente en Ecuador, muchas plantas de tratamiento de aguas residuales operan con parámetros de diseño basados en valores teóricos o bibliográficos de fracciones de DQO, sin disponer de una caracterización local actualizada. La falta de datos experimentales específicos impide calibrar correctamente los parámetros

cinéticos del modelo ASM1, generando discrepancias entre las simulaciones y el comportamiento real de los sistemas. Esto puede conducir a una subestimación o sobrestimación de la carga biodegradable, afectando el tiempo de retención hidráulica, la aireación requerida, la producción de lodos y la calidad del efluente final (Changoluisa Tandalla & Oña Chuquimarca, 2024).

Adicionalmente, estudios recientes evidencian que la composición de las aguas residuales ha cambiado en la última década debido a la creciente mezcla de descargas domésticas, industriales y agroindustriales, lo que genera una matriz más compleja, con mayores fracciones de compuestos refractarios y coloides. Esta variabilidad puede alterar significativamente la proporción entre la materia orgánica rápidamente y lentamente biodegradable, afectando la eficiencia de los procesos biológicos cuando no se ajustan los parámetros operativos ni los modelos de simulación (Jiang et al., 2023).

En la mayoría de los sistemas de tratamiento, los métodos convencionales de control operativo, basados en DQO total, DBO_5 o sólidos suspendidos, no permiten distinguir entre las fracciones biodegradables e inertes. Por ello, se requiere aplicar metodologías más precisas como la respirometría, la filtración con separación de fases y la aireación prolongada, que permiten cuantificar las fracciones Ss y Xs en condiciones controladas. La combinación de estos ensayos experimentales posibilita una estimación más robusta de la biodegradabilidad real del influente y una adecuada calibración de los parámetros cinéticos del modelo ASM1 (Elgindy et al., 2025; Espinosa Rodríguez et al., 2024).

El desarrollo de metodologías de fraccionamiento adaptadas a las condiciones locales del cantón Latacunga contribuirá a mejorar la gestión de las plantas de tratamiento, reduciendo costos energéticos por aireación excesiva, optimizando el tiempo de retención de sólidos y minimizando la producción de lodos. Asimismo, estos estudios proporcionan información clave para la modelación y simulación de escenarios operativos que permitan anticipar fallas,

evaluar cargas de choque y ajustar estrategias de control automático (Espinosa Rodríguez et al., 2024).

Este problema se agrava por la escasez de investigaciones recientes que proporcionen valores experimentales de Ss, Xs, Si y Xi para matrices locales. En muchos casos, las plantas a nivel provincial y nacional continúan utilizando los valores propuestos en estudios europeos de los años ochenta y noventa, los cuales no representan adecuadamente las condiciones climáticas, composicionales ni tecnológicas de la región andina. Como señalan Espinosa Rodríguez et al. (2024), la adopción de fracciones genéricas de DQO puede generar errores superiores al 30 % en la predicción de la remoción de carbono y nitrógeno en simulaciones basadas en ASM1.

Por tanto, existe una necesidad urgente de caracterizar experimentalmente las fracciones de la DQO bajo condiciones locales, integrando metodologías de laboratorio reproducibles como filtración, respirometría y aireación prolongada con modelos de simulación calibrados, que permitan ajustar los parámetros cinéticos del ASM1. El desarrollo de este tipo de investigaciones en Ecuador aportara información inédita sobre la biodegradabilidad de los efluentes urbanos e industriales, contribuyendo al cumplimiento de normativas ambientales y a la protección de los ecosistemas acuáticos receptores (Espinosa Rodríguez et al., 2024; Males Álvarez et al., 2023).

6. OBJETIVOS DEL PROYECTO

6.1. Objetivo General

Caracterizar la fracción biodegradable de la materia orgánica presente en las aguas residuales del influente del sistema de lodos activados del campus CEASA, mediante la caracterización de parámetros del modelo ASM1, con el fin de optimizar la operación del sistema de tratamiento.

6.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar la materia orgánica presente en aguas residuales campus CEASA mediante métodos experimentales de laboratorio.
- Calcular experimentalmente las fracciones biodegradables y no biodegradables mediante ensayos de respirometría, filtración y análisis de relación entre DQO/DBO.
- Modelar el ASM1con los datos experimentales con el fin de evaluar y optimar el proceso biológico de tratamiento.

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Tabla 1.
Sistema de tareas para los objetivos.

OBJETIVOS	METODOLOGIA	ACTIVIDADES	RESULTADOS
Caracterizar la materia orgánica presente en aguas residuales campus Salache mediante métodos experimentales de laboratorio.	Analítica y experimental de laboratorio	Recolección de muestras del área de estudio. Medición de parámetros físico químicos. Análisis del DQO y DBO.	Muestras de agua, adecuadamente recolectadas y conservadas.
Calcular experimentalmente las fracciones biodegradables y no biodegradables mediante ensayos de respirometría, filtración y análisis de relación entre DQO/DBO.	Experimental y de fraccionamiento fisicoquímica	Pruebas de filtración para separar Materia orgánica soluble o particulada. Determinación en relación al DQO/DBO.	Determinación de fracciones biodegradables y no biodegradables. Obtención de parámetros experimentales.
Modelar el ASM1con los datos experimentales para evaluar y optimizar el proceso biológico de tratamiento.	Modelación, simulación y análisis estadístico	Procesamiento y análisis de datos. Ingreso de parámetros al modelo ASM1.	Resultados estadísticos de las propiedades fisicoquímicas del agua residual.

Elaborado por: Autoras.

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA TÉCNICA

8.1. Contaminación Del Agua

En la actualidad la contaminación del agua es definida como la introducción de compuestos físico, químico o biológicos a un cuerpo hídrico los cuales afectan negativamente su calidad, de modo que el recurso deja de ser apto para el consumo humano (Misman et al., 2023). Según Ariho et al. (2025), estas alteraciones se originan principalmente por actividades humanas como la descargas de aguas residuales, que incorporando contaminantes a los cuerpos hídricos.

8.2. Aguas Residuales

Las aguas residuales corresponden a composiciones físicas, químicas y biológicas las cuales con alteradas por acciones humanas; estas aguas incorporan compuestos orgánicos e inorgánicos, así como diversas sustancias contaminantes, lo que impide su consumo sin un tratamiento adecuado (Osorio Rivera et al., 2021). De acuerdo con su origen, pueden clasificarse como, domesticas, mixtas o municipales, dependiendo de las actividades.

8.3. Caracterización de Aguas Residuales

Este proceso comprende a la evaluación de la calidad de agua en parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el cuerpo hídrico (Gbekley et al., 2023).

8.3.1. Características químicas

Según Kato & Kansha (2024), las características del agua residual incluyen parámetros como los sólidos totales, conductividad y metales pesados ya que estas afectan a los procesos biológicos los cuales representan riesgos ambientales. La materia orgánica es evaluada mediante la demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), cuya relación constituye un indicador clave para la selección del sistema de tratamientos (Lacalamita et al., 2024), como el nitrógeno y fosforo, es determinante para el control de procesos en la plata de tratamiento de aguas residuales (Moretti et al., 2024).

8.3.1.1. Nitrógeno.

El nitrógeno es esencial para los seres vivos y forman parte de moléculas biológicas claves como proteínas y ácidos nucleicos. En su ciclo natural, el nitrógeno atmosférico debe ser convertido por procesos de fijación biológica (Hayat et al., 2025).

8.3.1.2. Fosforo.

Es considerado un macronutriente crucial para la vida, involucrado en la transferencia de energía dentro de las células y en la estructura de membranas celulares. A diferencia del nitrógeno, el fosforo no tiene fase gaseosa significativa y su ciclo natural es más lento dependiendo de la descomposición orgánica (Hayat et al., 2025).

8.3.2. Características físicas

Las características físicas incluyen parámetros los cuales son el color, olor, temperatura, la turbidez y los sólidos, los cuales permiten medir o evaluar el grado de contaminación y comportamiento durante el tratamiento. Se cuentan con indicadores primarios como el color y olor de los cuales se determinan el deterioro de materia orgánica (Osorio Rivera et al., 2021). Asimismo la temperatura es de gran influencia en la solubilidad del oxígeno, por otra parte la turbidez refleja las cantidades de partículas suspendidas, mientras los sólidos totales determinan la carga particulada la cual debe ser removida para prevenir factores de fallas en sedimentación, filtración y aeración (Ganji et al., 2024).

8.3.3. Características biológicas

Constituye a las características definidas por las presencias diversas de microorganismos, principalmente por bacterias (*Proteobacteria*, *Bacteroidetes* y *Firmicutes*), los cuales son participes en la degradación de materia orgánica. A más las actividades microbianas están relacionadas con parámetros como la Demanda Bioquímica de Oxigeno DBO y la Demanda Química de oxígeno DQO, los cuales pueden reflejar las cargas orgánicas

biodegradables y permiten la capacidad para remover contaminantes (Freeman et al., 2023; Marino et al., 2025).

Chen et al. (2022) menciona que, en los últimos años, se han identificado recientes factores en aguas residuales los cuales cobran relevancia debido a riesgos ambientales y sanitarios, ya que las plantas de tratamiento tienden a reducir o eliminar determinantes genéticos. En conclusión, las caracterizaciones modernas integran procesos microbiológicos tradicionales con herramientas avanzadas para evaluar la calidad de agua y monitoreo ambiental (Corrin et al., 2024).

8.4. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno o DQO es una técnica que permite determina la cantidad de materia orgánica presente en aguas contaminadas, asimismo, se utilizada para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica, mediante un agente química oxidante (Raffo Lecca & Ruiz Lizama, 2014). Este parámetro cuantifica el oxígeno necesario para oxidar una muestra de agua, mediante condiciones específicas de agentes oxidantes, como temperatura y tiempo. Las sustancias inorgánicas y orgánicas en la muestra se oxidan bajo un sistema de reflujo cerrado, aplicando una fuerte solución acida (H_2SO_4) con exceso de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) se incluye sulfato de plata (Ag_2SO_4) como catalizador y sulfato mercúrico (Hg_2SO_4) para la eliminación de cloruros. Después de la digestión, el ($K_2Cr_2O_7$) no consumido es valorado con sulfato ferroso amoniacal para la calculación del ($K_2Cr_2O_7$) consumido (Calo & Fuentes, 2024).

8.5. Biodegradabilidad de la Materia Orgánica

La biodegradabilidad de la materia orgánica en aguas residuales se refiere a la capacidad de los compuestos orgánicos presentes en el influente de ser transformados por los microorganismos, lo es importante para la eficiencia de los procesos biológicos de

tratamientos. Esta biodegrabilidad está relacionada con la proporción de materia orgánica que puede ser a través de índices como la relación DBO_5/DQO, donde los valores más altos indican un mayor proporción de materia orgánica biodegradable, mientras los valores bajos señalan una mayor presencia de compuestos biodegradables (Rodriguez Loaiza, 2022).

Según Espinosa Rodríguez et al. (2024) la propuesta por el Activated Sludge Model N°1 (ASM1), la demanda química de oxígeno se fracciona en componentes que reflejan su disponibilidad: fracción fácilmente biodegradable (SS), fracción lentamente biodegradable (XS), y fracciones inertes que no participan en la degradación biológica. Estudios recientes han demostrado que la adecuada fracción de la DQO y la identificación de las fracciones biodegradables son esenciales para la calibración de modelos ASM. Además, estudios recienten señalan la existencia de materia orgánica es difícil de degradar y se transforma lentamente, puede generar limitaciones en procesos como la desnitrificación (Lin et al., 2025).

8.6. Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO)

8.6.1. Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO_5)

La DBO_5 evidencia la cantidad de oxígeno disuelto los cuales requieren los microorganismos heterogéneos para mineralizar la materia presente en la muestra, se evalúan mediante las diferencias entre el oxígeno disuelto inicial con el oxígeno de incubación de cinco días a 20 °C. Estos resultados me miden en ppm y representan las fracciones de la demanda biológica que se consumen en los primeros cinco días (Delzer & McKenzie, 2003; ISO, 2020).

8.6.2. Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO_{20})

La DBO_{20} es un ensayo el cual se lleva a cabo durante un periodo de vente días y resulta fundamental para determinar el consumo de oxígeno requerido en los procesos de oxidación de compuestos carbonados y nitrogenados (Alayo Atoche, 2023).

8.7. Toma de Muestras

Constituye una etapa crítica dentro del monitoreo y control ambiental, ya que es fundamental garantizar que la muestra sea recolectada, manipulada y conservada en condiciones óptimas. Una correcta toma de muestras permite minimizar la variabilidad, evitar alteraciones en su composición y asegurar que los parámetros fisicoquímicos y biológicos se mantengan estables hasta el momento de análisis.

8.7.1. Muestreo

Proceso inicial y crítico para realizar un análisis de calidad de agua, Según la guía de vigente en Ecuador, NTE INEN-ISO 5667-10. Es importante el uso correctos de los envases para preservar la muestra, este procesos es fundamental para evitar alteraciones de las muestras y no afecten los resultados a obtener (Garcia León, 2024; institutodelaguaes, 2024).

8.7.1.1. Técnica de Muestra Simple.

La técnica de muestra simple consiste en la recolección de una muestra de agua en un momento especifico, con el fin de analizar las condiciones presentes en ese instante. Este tipo de muestreo permite evaluar parámetros fiscos, químicos o biológicos representativos del punto y tiempo de toma.

8.7.2. Etiquetado

El etiquetado es necesario para la identificación de las muestras al momento de interpretar los resultados, deben ser marcadas de una manera clara y permanente conteniendo detalles como fecha y hora del muestreo, nombre de la persona que muestreo, la naturaleza de la muestra, etc.

8.7.3. Preservación de la muestra

La preservación de la muestra busca evitar cambios que puedan alterar la representatividad del análisis. Según la NTE INEN 2169 las técnicas deben ser dependiendo los parámetros a analizar cómo se encuentra detallado en la siguiente tabla N° 2 (*INEN*, 2013).

Tabla 2.

Técnicas generales para la conservación de muestras - análisis Fisicoquímico.

Parámetro	**Tipo de recipiente**	**Volumen típico (ml) y técnica de envasado**	**Técnica de preservación**	**Tiempo Máximo de preservación**	**Comentario**	**Método de ensayo NTE INEN**
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	Vidrio	1000 llenar contenedor completamente para excluir el aire.	Se enfría a 1 ºC y 5 ºC	24 h	Mantener muestras almacenadas en la oscuridad. En caso de congelación para – 20ºc: 6 meses (1 mes si < 50 mg/L)	1202
	Plástico	1000	Congelar a -20 ºC	1 mes		
Demanda Química de Oxigeno (DQO)	Vidrio o plástico	100	Acidificar a pH 1 a 2 con H2SO4	1 mes		1203
	Plástico	100	Congelar a -20 ºC.	1 mes		
Oxigeno	Vidrio o plástico	300 Recipiente deberá llenarse completamente.		4 días.	Fijar el oxígeno en el lugar y mantener las muestras almacenadas en la oscuridad. El método electroquímico puede ser utilizado también y se puede llevar a cabo en el sitio,	1106

Fuente: NTE INEN 2169

8.8. Técnicas para determinar el DQO

Para la evaluación del DQO se tiene el método de dicromato de potasio (Viales de DQO - HI94754C-25), para luego realizar la determinación fotométrica por medio del espectrofotómetro.

8.8.1. Método de Dicromato de Potasio

El método con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), consiste en oxidar la muestra de agua con una solución sulfúrica caliente de dicromato de potasio y sulfato de plata (Ag2SO4) como catalizador, los cloruros son enmascarados con sulfato de mercurio (HgSO4) para evitar interferencias (Perugachi Vásquez, 2015) , el ensayo se realiza a 150 ºC durante 2 horas en un termo reactor Hach DRB 200 Digital Reactor Block.

8.8.1.1. Termoreactor.

El reactor Hach DRB 200 Digital Reactor Block funciona como un equipo de calentamiento de alta precisión en el cual los viales de DQO se calientan y desarrollan un proceso de digestión. Este reactor incorpora un bloque térmico de respuesta rápida capaz de alcanzar temperaturas entre 20 a 150 °C en menos de 10 minutos. Asimismo, cuenta con un temporizador con cuenta regresiva, el cual facilita la gestión eficiente del ensayo, ya que, al finalizar el tiempo establecido, se activa una señal sonora y desactiva automáticamente la fuente de calor, garantizando seguridad operativa (HACH, 2020).

8.8.1.2. Espectrofotómetro.

La espectrofotometría en la determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) es una técnica analítica basada en la medición de la absorbancia de las muestras previamente digeridas con dicromato de potasio en medio ácido. Durante la digestión, el dicromato (Cr^{6+}),

de color naranja, se reduce a Cr^{3+} de color verde, en una proporción directamente relacionada con la cantidad de materia orgánica oxidada (Perugachi Vásquez, 2015).

8.9. Relación de la DQO y la DBO_5 como indicador de biodegradabilidad

Es fundamental conocer la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en el efluente de las aguas residuales; para ello, se determinar la Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO5) y la Demanda Química de Oxigeno (DQO), parámetros que permiten evaluar el comportamiento de los compuestos orgánicos durante el tratamiento. La relación entre DBO_5 y DQO constituye un indicador utilizado para estimar el grado de biodegradabilidad del agua residual, ya que refleja la proporción de materia orgánica susceptible frente a la carga orgánica presente en el efluente (Vazquez, 2025).

8.9.1. Indicadores de biodegradabilidad según en la relación del DQO y la DBO_5

La siguiente Tabla muestra la calificación de la biodegradabilidad en diferentes rangos según el valor de K (o su inverso) (Perojo-Bellido de Luna et al., 2022).

Tabla 3.

Calificación de la biodegrabilidad.

K=DQO/DBO5	Clasificación
< 2,5	Muy biodegradable
0,5 – 1,25	Poco Biodegradable
< 0,5	No biodegradable

Fuente: (Calero, 2023).

8.9.2. Fraccionamiento de la DQO (Ss, Xs, Si, Xi)

El fraccionamiento de la (DQO), es un procedimiento esencial para la correcta caracterización de aguas residuales en estudios de modelación y tratamiento biológicos, ya que permite descomponer la materia orgánica total en fracciones con comportamientos diferenciados frente a los procesos microbianos.

La fracción (Ss) se compone por sustancias orgánicas soluble, los cuales pueden ser utilizadas de manera inmediata por microorganismo como fuente de energía y crecimiento. Por tal razón esta fracción desempeña un papel determinante en la tasa inicial de remoción de la materia orgánica biodegradable, en contraste la fracción (Xs) comprende a los compuestos orgánicos particulados cuya transformación es más lenta. Además las fracciones (Si) (Xi), corresponden a la porción de materia orgánica no es susceptible de degradación bajo condiciones normales de tratamiento (Tandoi et al., 2017).

8.10. Planta de Tratamientos de Aguas Residuales

Las plantas de tratamiento de aguas residuales constituyen infraestructuras diseñadas para mejorar la calidad del agua contaminada mediante la aplicación integrada de procesos mecánicos, físicos, químicos y biológicos, con el propósito de reducir distintos contaminantes. Su propósito fundamental es garantizar que, una vez tratada, el agua sea vertida en un medio receptor (río, lago, red de alcantarillado, etc.), no altere el medio ambiente ni represente un peligro para la salud humana (León Prem, 2017).

8.11. Tratamiento de aguas

Según Font Prieur et al. (2022) menciona que las principales etapas del tratamiento de aguas residuales incluyendo el pretratamiento, el tratamiento primario, tratamiento secundario y el tratamiento terciario en casos especiales

El tratamiento de aguas residuales ya sea de origen domestico o industrial, es un proceso fundamental para reservar la calidad de agua y proteger el medio ambiente, además se refiere al conjunto de procesos físicos, químicos o biológicos aplicados al agua residual para remover contaminantes y devolver el agua tratada con una calidad aceptable a un medio receptor. Los tratamientos dependerán de la composición de las aguas a tratar, modificando así sus condiciones microbiológicas, químicas y físicas (ISA, 2024; Llivisaca Chiqui & Peláez Vera, 2021).

8.11.1. Niveles de tratamientos de aguas residuales

8.11.1.1. Pre – tratamiento.

La función principal de esta etapa es retirar los sólidos de gran tamaño, materiales gruesos y partículas arenosas que podrían obstaculizar el proceso global de tratamiento y comprometer el funcionamiento general de la planta (Jorge, 2020).

8.11.1.2. Tratamiento Primario.

El tratamiento primario dentro del proceso de depuración de aguas residuales se orienta a la separación física de los sólidos sedimentables y flotantes presentes en el afluente. Su finalidad es disminuir la carga contaminante inicial y acondicionar el agua de las etapas posteriores de tratamiento.

En esta fase, el agua residual es conducida a tanques de sedimentación, donde las partículas con mayor densidad se depositan en el fondo, generando el denominado lodo primario. Simultáneamente, los sólidos flotantes, como grases y aceites son retirados de la superficie. Este mecanismo de sedimentación promueve la remoción física de sólidos y reduce significativamente la concentración de materia suspendida. Si bien el tratamiento primario no elimina por completo la materia orgánica, constituye una etapa fundamental para asegurar la eficiencia de los procesos subsiguientes. Al disminuir la carga de sólidos, se optimiza el desempeño de la infraestructura y se mejora la eficacia de las etapas biológicas del tratamiento secundario (Pimiento & Cárdenas, 2021).

8.11.1.3. Tratamiento secundario.

En el tratamiento secundario, el principal objetivo es remover material orgánico y en suspensión. Se utiliza procesos biológicos, aprovechando la acción de microorganismos, que en su proceso de alimentación degradan la materia orgánica. La presencia o ausencia de oxígeno disuelto en el agua residual, define dos grandes grupos de actividad biológica, los

aerobios en presencia de oxígeno y los anaerobios en ausencia de oxígeno (Cando Cisneros & Jibaja Robles, 2018).

Además, entre los métodos más utilizados se encuentran sistemas biológicos como lodos activados, filtros percoladores y laguas de estabilización, en los cuales se introducen bacterias que metabolizan los compuestos orgánicos disueltos y en suspensión. A través de este metabolismo, la materia orgánica compleja se transforma en compuestos más estables logrando una reducción significativa en la carga contaminante del agua residual (Reyes Suárez & Rodríguez López, 2025).

8.11.1.4. Sedimentación.

La sedimentación constituye un proceso físico donde se elimina partículas suspendidas en el agua por influencia de la gravedad. Par que este proceso sea posible, el peso específico de las partículas debe ser superior al peso específico del agua que vaya a ser tratada. Las partículas con mayor peso específico se sedimentarán (se hundirán al fondo), mientras que aquellas con un peso específico menor que el agua flotarán en la superficie. En este intervalo de tiempo el agua fluye a una velocidad relativamente baja generando una condición de aparente reposo del agua dentro del tanque (Gómez-Chaves & Manrique-Prieto, 2016).

8.12. Modelación de lodos activados ASM1

La modelación matemática de los procesos de lodos activados permite comprender como se transforma la materia orgánica y el nitrógeno dentro de los reactores biológicos, gracias a esta herramienta, es posible analizar el desempeño del sistema, mejorar su operación y explorar distintos escenarios de funcionamiento sin necesidad de realizar intervenciones directas en la planta. En los últimos años, estos modelos del tipo ASM han ganado mayor relevancia, no solo como instrumentos de análisis, sino también como base para el desarrollo de sistemas en las plantas de aguas residuales (Yu et al., 2025).

8.12.1. Enfoque y alcance del ASM1

ASM1 es un mecanismo desarrollado para describir, la remoción de carbono, la nitrificación y la desnitrificación, mediante un conjunto de variables de estado en aplicaciones modernas, ASM1 se usa tato en simulaciones a estados estacionario, como en simulación dinámica (Tiar et al., 2024).

8.13. RStudio

El Software RStudio es una herramienta de desarrollo utilizando principalmente para programación en el lenguaje de programación estadístico R, facilitando la estructura de códigos y la visualización de análisis de datos en diversos sectores estadísticos. Ofrece una interfaz gráfica y herramientas organizadas para gestionar proyectos, explorar datos y generar resultados (Posit, 2025).

8.14. Análisis estadístico de datos

Herramienta fundamental funcional en la investigación científica, ya que permite organizar, analizar e interpretar datos, facilitado la toma de decisiones basadas en evidencias. En estudios experimentales, especialmente en el ámbito ambiental resulta esencial para contrastar hipótesis ye valuar la significancia de los resultados obtenidos (Montgomery, 2017).

8.14.1. Análisis de varianza (ANOVA)

Técnica estadística utilizada para determinar si existen diferentes estadísticas significativas entre medidas de tres o más grupos, comprobando la variabilidad entre los grupos con la variable dentro del mismos. Su aplicación es relevante para el análisis de tratamientos, en condiciones experimentales o factores categóricos sobre una variable (Stoker et al., 2020).

8.14.2. Planteamiento de hipótesis

El análisis de varianza se formula en dos hipótesis estadísticas fundamentales la cuales son (Field, 2024):

- **Hipótesis nula (H_0):** Establece que todas las medias poblacionales de los grupos analizados son estadísticamente iguales, es decir, no existen diferencias significativas entre ellas.
- **Hipótesis alternativa (H_1):** Indica que al menos una de las medias poblacionales difiere significativamente de las demás.
- **Nivel de significancia (α):** Valor previamente definido para el análisis estadístico, generalmente $\alpha = 0,05$.
- **Criterio de decisión:** La decisión estadística se basa en la comparación del valor p obtenido con el nivel de significancia α. Si $p \leq \alpha$, se rechaza la hipótesis nula; si $p > \alpha$, no se rechaza la hipótesis nula.

9. PREGUNTA CIENTÍFICA O HIPÓTESIS

¿Cómo varía la composición fraccionada de la DQO (fracciones biodegradables y no biodegradables) en las aguas residuales de un influente y en qué medida la caracterización experimental de dichas fracciones permite calibrar con precisión un modelo ASM1 para optimizar el diseño y operación del sistema biológico de tratamiento?

10. METODOLOGÍA

10.1. Área de Estudio

El estudio se desarrolló en el Tanque Sedimentador (Tanque #2) de la planta de tratamiento (PTAR) perteneciente a la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales la cual se encuentra localizada en el campus CEASA - Salache a solo 1.9 km de la carretera E35, en el barrio Salache Bajo, dentro de la parroquia Eloy Alfaro.

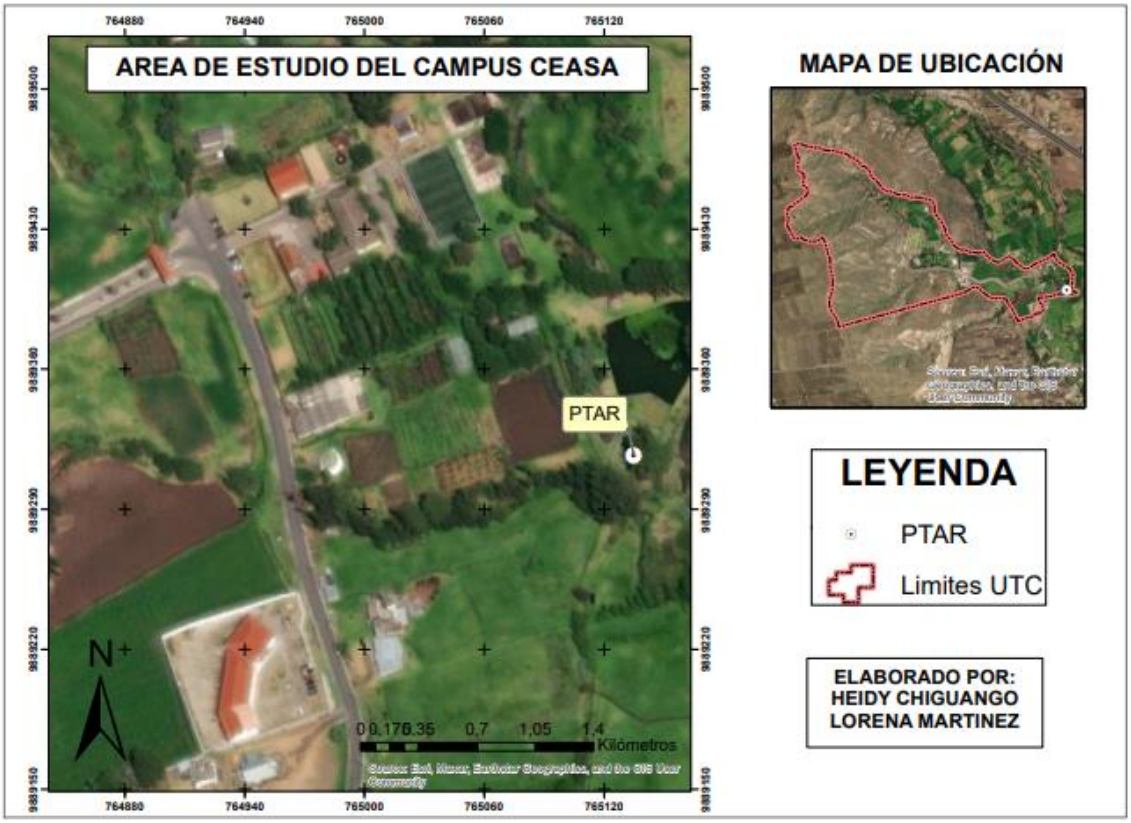


Figura 1. *Área de estudio.*

Elaborado por: Autores.

10.2. Enfoque y tipo de investigación

El estudio contempla un enfoque mixto, de tipo experimental y descriptivo, orientado a la caracterización de la materia orgánica biodegradable en aguas residuales a través de la determinación de parámetros cinéticos y de fraccionamiento de la DQO bajo el marco del modelo ASM. El diseño se basa en la aplicación de metodologías estandarizadas de laboratorio para la determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5 y DBO_{20}), Demanda Química de Oxígeno (DQO filtrada) y Oxígeno Disuelto (OD), utilizando técnicas adaptadas a condiciones locales de temperatura y composición del agua residual.

De acuerdo con Espinosa Rodríguez, Delgado Delgado y Hidalgo Millán (2024), la combinación de mediciones de DBO, DQO y OD constituye la base empírica para la estimación de las fracciones Ss y Xs, fundamentales en la calibración del ASM1. La investigación adopta un enfoque cuantitativo, bajo condiciones controladas de laboratorio, para garantizar la

reproducibilidad y la validez de los resultados obtenidos (Sánchez Proaño, Males Álvarez & Guerrero Aguirre, 2023).

10.2.1. Enfoque Cualitativo

El presente enfoque de la investigación es orientado a la interpretación técnica y contextual del comportamiento de la materia orgánica biodegradable presente en el agua residual, a partir de observaciones y análisis de los resultados obtenidos en laboratorio. Este enfoque comprende la dinámica de procesos biológicos y la coherencia de los datos experimentales frente al modelo del ASM1.

De acuerdo Henze et al. (2015), la adecuada implementación de los modelos de los lodos activados requiere no solo de los resultados numéricos confiables, sino también de una interpretación cualitativa del comportamiento bilógico del sistema en especial cuando se trata de aguas residuales. En este contexto el presente enfoque permite evaluar y sustentar la pertinencia del modelo ASM1, aportando solidez a la técnica de los resultados alcanzados (Solon et al., 2017).

10.2.2. Enfoque cuantitativo

Diversos estudios recientes destacan que el enfoque cuantitativo es indispensable para la calibración y validación de modelos de lodos activados, ya que permite evaluar el desempeño del sistema y ajustar los parámetros del modelo (Corominas et al., 2012). Por lo tanto, el presente enfoque cuantitativo del presente estudio se fundamenta en la medición sistemática y controlada de parámetros físico-químicos y biológicos del agua residual, permitiendo la obtención de datos numéricos y estadísticos.

10.3. Diseño Metodológico

El presente estudio cuenta se fundamentó en un investigación experimental y descriptiva, estructurada en fases secuenciales de campo, laboratorio y gabinete, se aplicaron técnicas de muestreo, análisis fisicoquímico y modelación matemática para caracterizar la

materia orgánica biodegradable y calibración del modelo ASM1, permitiendo el desempeño del sistema biológico como se detalla a continuación:

10.3.1. Fases de investigación

La presente investigación se estructuro en tres fases claramente definidas como son: investigación de campo, investigación de laboratorio e investigación de gabinete, las cuales se llevaron a cabo de forma secuencial y complementaria para alcanzar los objetivos propuestos.

10.3.1.1. Investigación de Campo.

La fase de campo se llevó a cabo por el equipo de investigación en la planta de tratamiento de agua residuales, ubicada dentro de la parroquia Eloy Alfaro. Todos los costos operativos fueron asumidos por el equipo investigador. Se aplica técnicas como: observación directa al sistema de tratamiento, identificación de puntos de muestreo, muestreo de aguas residuales (Tanque 2) y medición de parámetros físicos.

10.3.1.2. Investigación de Laboratorio.

En esta etapa, se denominará la realización de análisis de laboratorio de la cual se evaluará las propiedades de agua de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Técnica de Cotopaxi. Con las muestras tomadas se realizará determinación del DQO, DBO_5, DBO_{20}, pruebas espirométricas y fraccionamiento de la materia orgánica.

10.3.1.3. Investigación de Gabinete

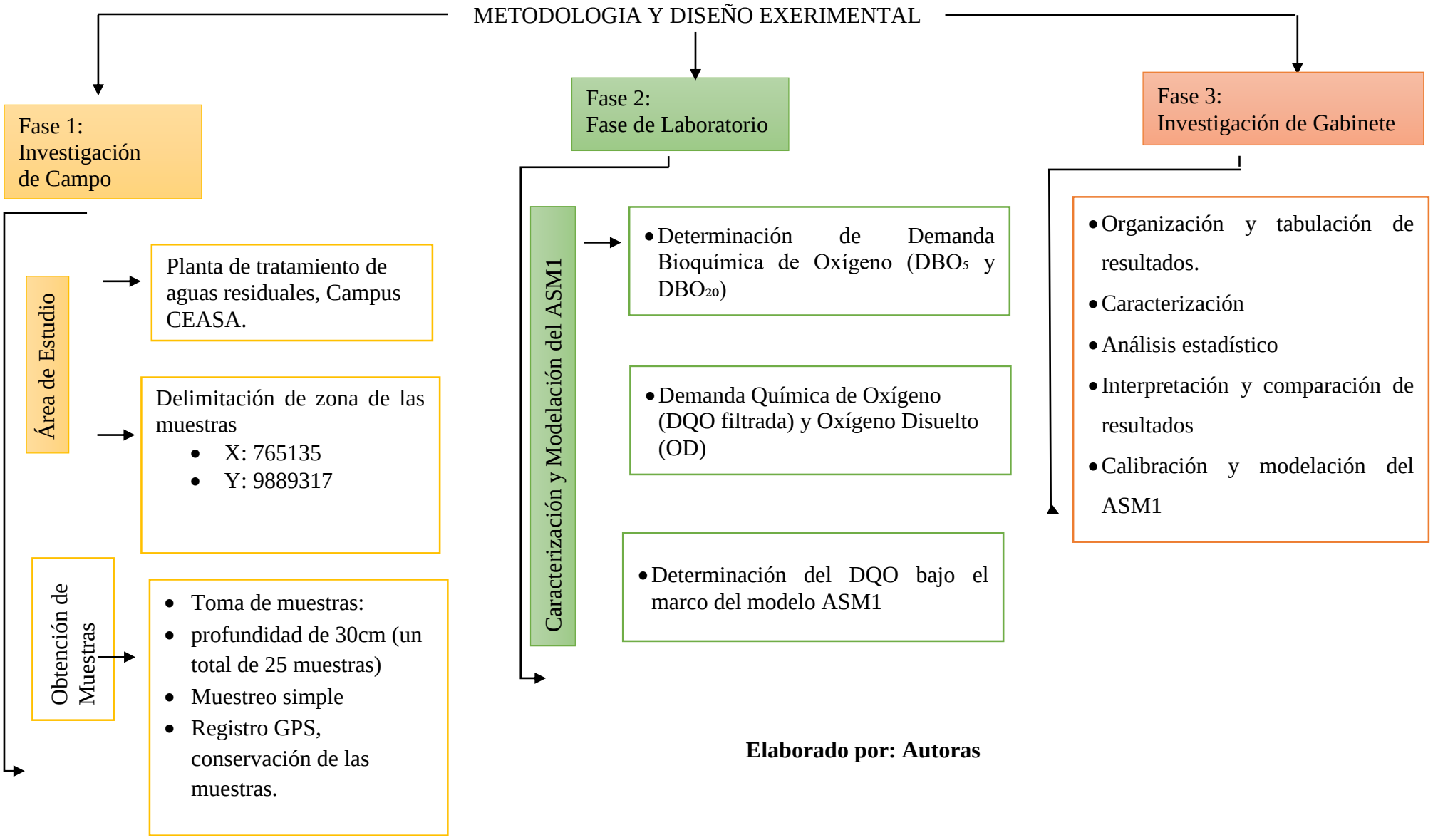
La investigación de gabinete consistió en la organización, procedimientos y análisis estadísticos de resultados obtenidos en las fases anteriores, asimismo se realizó la calibración del modelo ASM1 y validación del modelo. Además, se organizará los resultados en tablas, se realiza el cálculo de fracciones de materia orgánica y ajuste de parámetros del ASM1.

10.4. Diseño Experimental

El diseño experimental se basó en un muestreo puntual de aguas residuales del tanque de lodos activados, con un total de 25 muestras recolectadas durante el período de estudio. Las muestras fueron conservadas a 4 °C y analizadas dentro de las seis horas posteriores a su recolección. Se realizaron cinco réplicas por ensayo para asegurar la confiabilidad de los resultados y reducir la variabilidad experimental. Las variables analizadas incluyeron DQO, DBO_5, DBO_{20} y OD, las cuales permitieron estimar las fracciones biodegradables de la materia orgánica.

A continuación, se presenta el resumen de las fases correspondientes de la metodología y diseño experimental.

Diagrama de fases correspondientes de la metodología y diseño experimental.



Elaborado por: Autoras

10.5. Técnicas e Instrumentos

10.5.1. Técnicas

- Muestreo siempre

10.5.2. Instrumentos

- Multiparámetros o equipo para medición de OD.

10.6. Equipos, materiales y herramientas.

Para la investigación se utilizaron los siguientes materiales

10.6.1. Equipos

- Termoreactor
- Espectrofotómetro

10.6.2. Materiales

- Material didáctico (cinta adhesiva, rotulador, silicona y tijera).
- Filtros de 0.45 µm
- Digestor de DQO
- Botellas o frascos
- Lodo activado acondicionado (24 h de ayuno)
- Jeringa
- Reactivos de DQO
- Compresor de aire
- Agua residual
- Oxímetro o sonda DBO
- Bomba de vacío
- Agua esterilizada

10.6.3. Herramientas

- Computador
- Software Excel
- Software RStudio

10.7. Metodología para el Análisis de Resultados.

El estudio se llevó a cabo utilizando muestras de aguas residuales del campus CEASA de la UTC, recolectadas en el punto de afluente del segundo tanque de tratamiento biológico tipo lodos activados según se indica en la tabla 4.

Tabla 4.
Punto de muestreo coordenadas (UTM).

Punto	X	Y
Tanque #2 PTAR	765135	9889317

Elaborado por: Autoras

Se realizó un muestreo puntual, con almacenamiento en recipientes de polietileno a 4 °C y transporte al laboratorio dentro de las seis horas posteriores a la toma, conforme a las recomendaciones del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al., 2017).

El tamaño de muestra se determinó considerando la variabilidad típica de los parámetros DBO y DQO (coeficiente de variación ≤ 15 %), estableciendo cinco réplicas por ensayo para asegurar potencia estadística y permitir la aplicación de pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas.

10.7.1. Variables experimentales (Parámetros)

Para investigación se adoptó 4 variables que dominan el estricto comportamiento biocinético de los microrganismos que depuran el agua residual de materia orgánica según la tabla 5 descrita a continuación.

Tabla 5.

Variables a calcular.

Variable	Descripción	Unidad	Método
DBO_5	Consumo de oxígeno en 5 días a 20 °C	mg O_2/L	5210 B (APHA et al., 2017)
DBO_{20}	Consumo de oxígeno en 20 días	mg O_2/L	5210 B
OD	Oxígeno disuelto en sistema cerrado (sin reaireación)	mg O_2/L	Winkler-Azida / Oxímetro calibrado
DQO (SCOD)	Materia orgánica soluble total (filtrada 0,45 µm)	mg O_2/L	5220 D (APHA et al., 2017)

Elaborado por: Autoras

10.7.2. Procedimientos Analíticos

10.7.2.1. Determinación de DQO filtrada (SCOD).

La Demanda Química de Oxígeno filtrada (SCOD) se determinó mediante digestión con dicromato en sistema cerrado (método 5220 D), utilizando filtración previa de la muestra a 0,45 µm para separar la fracción soluble de la particulada. La digestión se realizó a 150 °C durante 2 horas en un Termoreactor y la absorbancia se midió en espectrofotómetro a 600 nm. Este parámetro se empleó para calcular la fracción soluble biodegradable (Ss) como:

$$S_s = SCOD_0 - S_i \quad \textbf{(1)}$$

Donde S_i corresponde al valor residual tras ensayos de arrastre biológico. Los controles de calidad incluyeron duplicados, blancos reactivos, recuperación de estándares KHP (85–115 %) y curvas de calibración con $R^2 \geq 0{,}995$ (Espinosa Rodríguez et al., 2024).

10.7.2.1.1. ***Calibración del Espectrofotómetro.***

El dispositivo debe configurarse adecuadamente para acceder al menú de métodos; para ello, una vez encendido, se selecciona la opción “Tests MN”, seguida de “Tests en tubos”, y posteriormente el método “DQO 160”. En esta fase, se procede a la medición empleando los viales de DQO previamente digeridos en el termo reactor.

Inicialmente, se realiza una limpieza superficial del vial utilizando el papel absorbente, evitando agitarlo para no alterar la estabilidad del contenido, se inicia midiendo el blanco, que representa un estándar a seguir para la medición de DQO. Al medir el blanco, se debe seleccionar la opción “cero” y esperar a que se complete la medición. Posteriormente, se retira el blanco y se introduce el tubo con la muestra a analizar, se realiza la medición y finalmente se obtiene el valor de DQO. Este procedimiento se repite de manera sistemática para cada una de las muestras a analizar.

10.7.2.2. Determinación de DBO_5 y DBO_{20} ($CBOD_5$ y $CBOD_{20}$).

La DBO se midió siguiendo el método 5210 B (*Standard Methods*), mediante incubación de botellas de 300 mL a 20 ± 1 °C en oscuridad total. Se utilizaron diluciones del 1–5 %, inoculadas con lodo activado aclimatado, y soluciones nutritivas de fósforo, magnesio, calcio y hierro. La medición del OD inicial y final se realizó mediante el método Winkler con azida o mediante oxímetro digital calibrado a saturación (100 %) y cero oxígenos (solución de sulfito de sodio).

El cálculo de DBO se efectuó mediante la ecuación:

$$\mathrm{DBO}_t = \frac{(OD_0 - OD_t) - f_s(OD_{0b} - OD_{tb})}{P} \quad \textbf{(2)}$$

Donde OD_0 y OD_t son los valores de oxígeno disuelto inicial y final de la muestra, OD_{0b} y OD_{tb} los del blanco sembrado, f_s el factor de siembra y P la fracción volumétrica de muestra en la botella.

El estándar de control **glucosa-ácido glutámico (GGA)** se utilizó para verificación de exactitud (198 ± 30 mg/L a 20 °C).

10.7.2.3. Medición de oxígeno disuelto (OD) en sistemas cerrados.

La determinación del oxígeno disuelto (OD) se efectuó en sistemas cerrados sin reaireación, con medición directa mediante oxímetro o método Winkler-azida inmediatamente después de la toma. Esta variable se empleó tanto para los cálculos de DBO como para el análisis del déficit de oxígeno y la determinación de la tasa de consumo (OUR), lo que permite evaluar la actividad metabólica de la biomasa (Elgindy et al., 2025).

Para la medición del consumo de oxígeno disuelto se implementó un sistema experimental que consistió en una botella hermética de material plástico rígido, con dos orificios en la tapa: uno para la conexión de un compresor de aire y otro para la sonda de oxígeno disuelto (OD). Ambas conexiones fueron selladas cuidadosamente mediante cinta adhesiva (taipe) y silicona, con el fin de garantizar la hermeticidad del sistema y evitar la entrada o salida de aire durante el ensayo.

Posteriormente, el agua residual fue sometida a un periodo de reposo de 24 horas y luego filtrada para eliminar partículas gruesas. Una vez preparada la muestra, fue introducida en la botella y el recipiente se cerró adecuadamente.

A continuación, se utilizó el compresos para extraer el aire del interior, creando un ambiente sin entrada de oxígeno externo. A partir de ese momento, se registraron los valores de OD durante una hora, tomando lecturas cada cinco minutos.

Figura 2. *Sistema al vacío para el OD.*

10.7.2.4. Análisis Estadístico (ANOVA).

Para realizar un análisis estadístico con los siguientes procedimientos:

10.7.2.4.1. Estadística descriptiva.

Para cada variable (DBO_5, DBO_{20}, SCOD, OD), se calcularán:

- Media aritmética ($\bar{x}$)
- Desviación estándar (s)
- Intervalo de confianza (IC95 %)
- Coeficiente de variación (CV %)

La normalidad de los datos se verificó mediante la prueba de Shapiro–Wilk y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene.

10.7.2.4.2. Comparaciones e inferencia.

- DBO_5 vs DBO_{20}: prueba *t* pareada ($p < 0,05$).
- Variabilidad entre réplicas: ANOVA de un factor o prueba de Kruskal–Wallis según normalidad.

- Efecto de inhibidor (ATU): *t* independiente o Mann–Whitney.

Las correlaciones entre SCOD y DBO_5 se evaluaron mediante coeficiente de Pearson (r) o Spearman (ρ) según distribución.

10.7.2.4.3. Ajuste cinético de la DBO

La evolución temporal de la DBO se modeló con la ecuación de primer orden:

$$DBO_t = BOD_u(1 - e^{-k_{20}t}) \quad \textbf{(2)}$$

donde:

- BOD_u= DBO última,
- k_{20}= constante cinética a 20 °C.

El ajuste se realizó por regresión no lineal (mínimos cuadrados) y la bondad de ajuste se verificó con el coeficiente de determinación (R^2) y los intervalos de confianza del 95 % de k_{20}y BOD_u. La corrección de temperatura se aplicó con $\theta = 1{,}047$ (Morant Carmona & Restrepo Lagos, 2016).

10.7.2.4.4. Control de calidad estadístico.

- Se evaluaron valores atípicos mediante las pruebas de Grubbs y Tukey (1,5 × RIQ).
- Las desviaciones relativas (RPD) inferiores al 10 % se consideraron aceptables (Vázquez-Mejía et al., 2013).
- Los resultados fuera de control fueron verificados con gráficas $\bar{X}$–R (Pire Sierra et al., 2011).

11. RESULTADOS

11.1. Resultados de Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Para el análisis se realizó un total de 25 viales, uno por día de manera consecutiva, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 6.
Resultados diarios de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

No. de muestra	Fecha de muestreo	Promedio DQO diario (mg/L O_2)
1	25/11/2025	425
2	26/11/2025	422
3	27/11/2025	435
4	28/11/2025	422
5	29/11/2025	433
6	30/11/2025	380
7	1/12/2025	372
8	2/12/2025	327
9	3/12/2025	365
10	4/12/2025	427
11	5/12/2025	420
12	6/12/2025	390
13	7/12/2025	398
14	8/12/2025	365
15	9/12/2025	375
16	10/12/2025	410
17	11/12/2025	372
18	12/12/2025	106
19	13/12/2025	239
20	14/12/2025	67
21	15/12/2025	35
22	16/12/2025	100
23	17/12/2025	77
24	18/12/2025	55
25	19/12/2025	68
Promedio DQO diario (mg/L O_2)		299,4

Interpretación: Los resultados de DQO obtenidos en la planta de tratamiento de aguas residuales evidencian una variación significativa comprendida entre 35 mg/L O2 y 435 mg/L O2. En las fechas del 25/11 al 11/12 se refleja valores elevados y relativamente constantes, esto es asociado a la presencia normal de estudiantes, docentes y personal en general, además del uso regular de servicios sanitarios, cafeterías y áreas comunes. A partir del 12/12 se evidencia una disminución en los valores del DQO, alcanzando valores entre 35 y 100 mg/L O2, debido a la disminución significativa de la presencia de personas en las instalaciones de la universidad debido a factores como fechas festivas, desarrollo de programas instituciones, es decir la menor

generación de aguas residuales provoca una reducción directa a la carga orgánica afluente de la planta de tratamiento.

11.2. Resultados de DBO_5.

Tabla 7.

Resultado de DBO_5 del proceso de lodos activados.

Fecha de muestreo	Fecha de obtención de resultado	Resultado (mg/L)
28/11/2025	03/12/2025	24,26

Interpretación: El valor de DBO_5 obtenido fue 24,26 mg/L, el cual indica una carga orgánica biodegradable moderada, característica del tanque de lodos activos en operación donde la mayoría de la materia orgánica fácilmente biodegradable ya ha sido removida por la actividad microbiana.

11.3. Resultados de la DBO_{20} en el tanque de lodos activados

Tabla 8.

Resultado de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a veinte días (DBO_{20}).

Fecha de muestreo	Fecha de obtención de resultado	Resultado (mg/L)
28/11/2025	19/12/2025	49,08

Interpretación: El resultado obtenido es 49, 08 mg/L, el valor representa materia orgánica biodegradable remanente que requiere más tiempo para degradarse (fracción lentamente biodegradable) presente en la muestra. Gracias al resultado se confirma la ausencia de inhibición microbiana y se evidencia que el sistema mantiene una fracción orgánica residual compatible con un proceso biológico estable y funcional.

11.4. Análisis del consumo de oxígeno disuelto en sistemas cerrados.

Tabla 9.
OD en sistemas cerrados.

HORA	CONCENTRACIÓN (mg/L)			
	M1: 25/11/2025	**M2:** 01/12/2025	**M3:** 08/12/2025	**M4:** 16/12/2025
0	2,15	2,18	2	2
5	2,06	2,1	2,03	1,76
10	1,42	1,48	1,45	1,4
15	1,92	1,96	1,9	1
20	1,06	1,12	1,3	0,93
25	0,56	0,8	0,7	0,85
30	0,53	0,58	0,55	0,71
35	0,41	0,46	0,43	0,52
40	0,36	0,41	0,38	0,44
45	0,32	0,36	0,34	0,3
50	0,34	0,37	0,33	0,24
55	0,30	0,34	0,31	0,19
60	0,15	0,22	0,17	0,1
PROMEDIO	0,89	0,95	0,91	0,80

Interpretación: En las 4 muestras analizadas, el OD mostro una tendencia decreciente continua a lo largo del periodo de 60 minutos, este comportamiento indica un consumo progresivo de oxígeno, atribuible a: la actividad metabólica de los microorganismos presentes en el agua residual, la oxidación de materia orgánica biodegradable remanente y, potencialmente, a procesos de nitrificación, especialmente en sistemas de lodos activados.

Los promedios inferiores a 1 mg/L, evidencia un alto déficit de oxígeno durante el ensayo, lo cual es característico de muestras con biomasa activa y demanda bioquímica significativa.

La ausencia de incrementos abruptos o estabilización del OD confirma que el sistema se mantuvo hermético, sin aporte externo de oxígeno, validando la confiabilidad del ensayo.

11.4.1. Calculo OUR (Oxygen Uptake Rate).

El **OUR** o la tasa de consumo de oxígeno se calculó por regresión lineal, para cuantificar la actividad biológica real de los microorganismos presentes en un sistema de

tratamiento biológico. Es decir, indica que tan rápido la biomasa consume oxigeno bajo condiciones controladas.

Formula:

$$\boldsymbol{OUR}: -\left(\frac{dOD}{dt}\right) \times 60 \quad \textbf{(3)}$$

Donde:

OUR: Tasa de consumo de oxigeno

dOD: *derivada del oxígeno disuelto*

dt: *Tiempo*

60: Tiempo (h o min).

Resultados del OUR mediante la ecuación (4)

Muestra 1. 25 de noviembre del 2025

$$\boldsymbol{OUR}: -\left(\frac{dOD}{dt}\right) \times 60$$

$$\boldsymbol{OUR}: -(-0{,}0346) \times 60$$

$$\boldsymbol{OUR}: 0{,}0346 \times 60$$

$$\boldsymbol{OUR}: 2{,}076$$

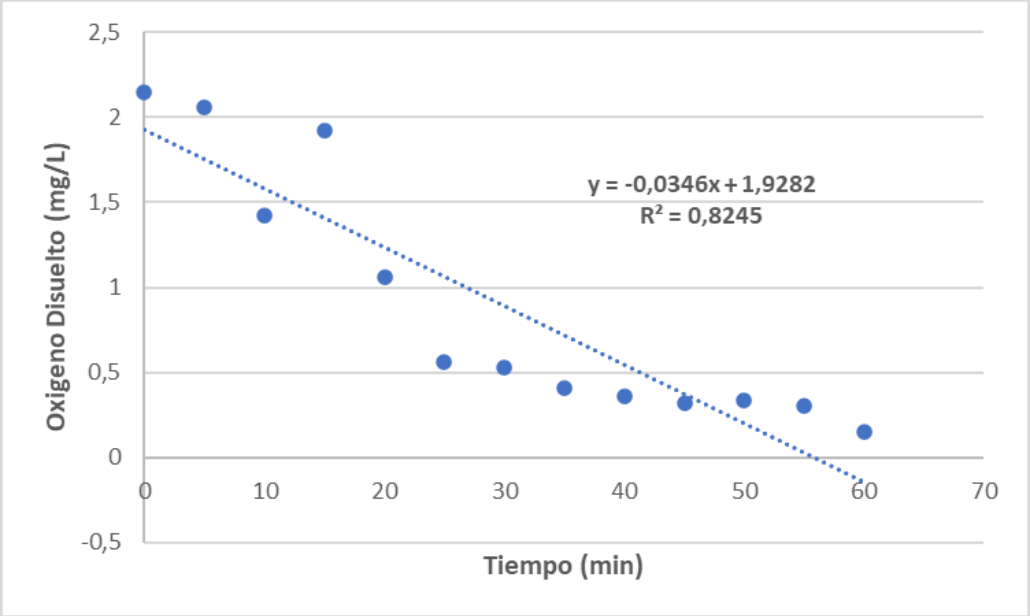


Figura 3. *Muestra 1- OUR*

Elaborado por: Autoras

Muestra 2. 01 de diciembre del 2025

$$\boldsymbol{OUR}: -\left(\frac{dOD}{dt}\right) \times 60$$

$$\boldsymbol{OUR}: -(-0{,}0348) \times 60$$

$$\boldsymbol{OUR}: 0{,}0348 \times 60$$

$$\boldsymbol{OUR}: 2{,}088$$

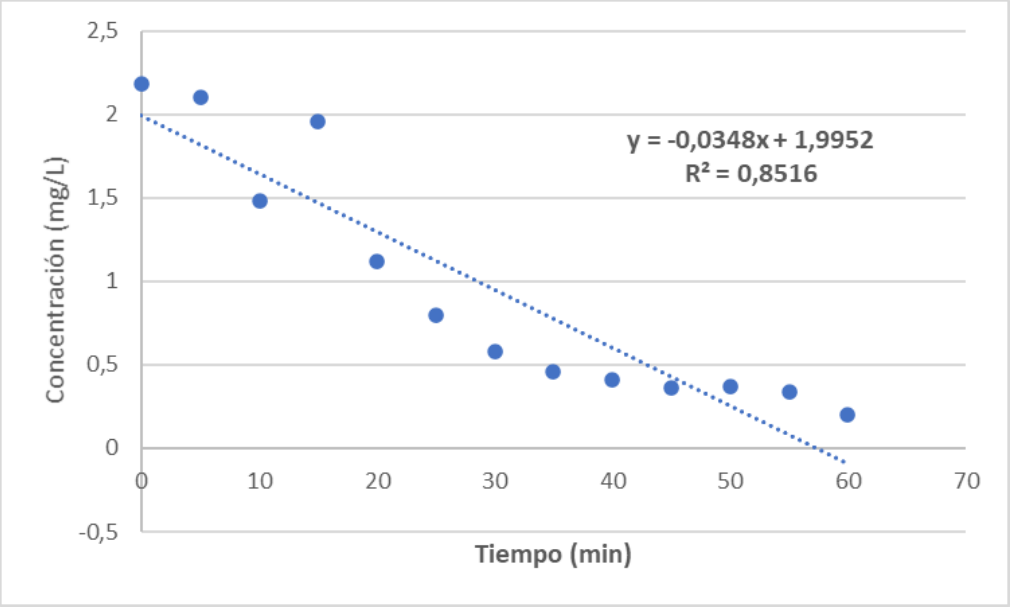


Figura 4. *Muestra 2 – OUR*

Elaborado por: Autoras

Muestra 3. 08 de diciembre del 2025

$$\boldsymbol{OUR}: -\left(\frac{dOD}{dt}\right) \times 60$$

$$\boldsymbol{OUR}: -(-0{,}0339) \times 60$$

$$\boldsymbol{OUR}: 0{,}0339 \times 60$$

$$\boldsymbol{OUR}: 2{,}034$$

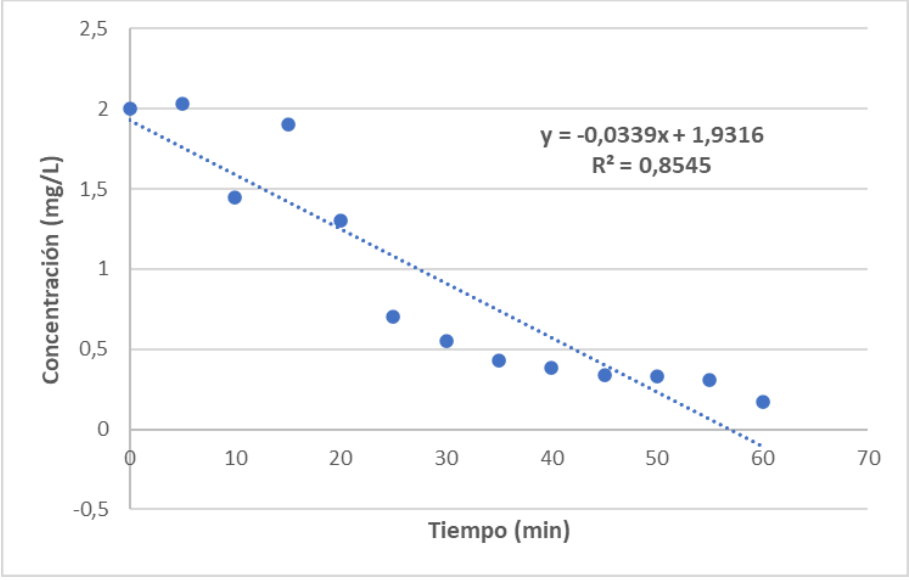


Figura 5. *Muestra 3 – OUR.*

Elaborado por: Autoras.

Muestra 4. 16 de diciembre del 2025

$$\boldsymbol{OUR}: -\left(\frac{dOD}{dt}\right) \times 60$$

$$\boldsymbol{OUR}: -(-0{,}03) \times 60$$

$$\boldsymbol{OUR}: 0{,}03 \times 60$$

$$\boldsymbol{OUR}: 1{,}8$$

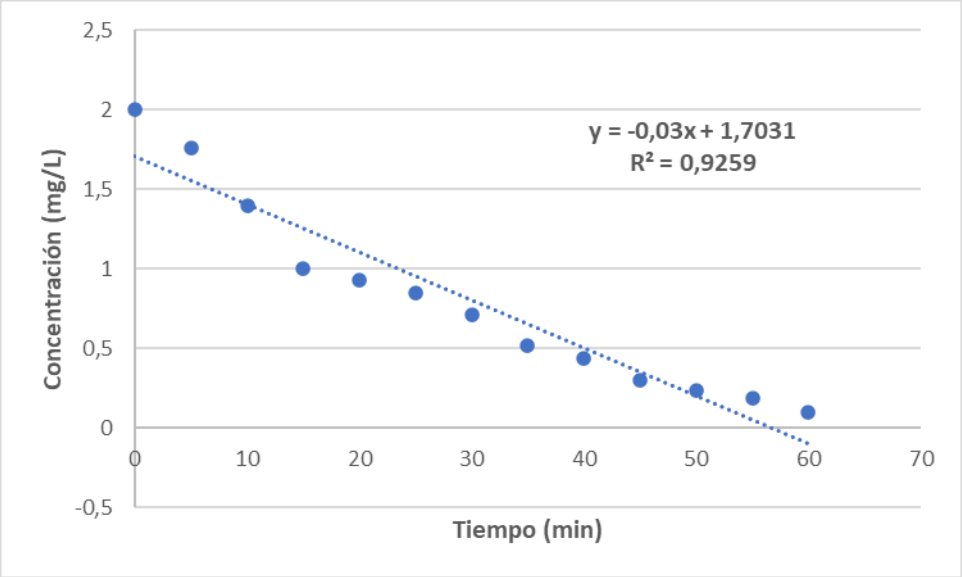


Figura 6. *Muestra 4 - OUR.*

Elaborado por: Autoras

Interpretación*:* La tasa de consumo de oxígeno (OUR) fue determinada mediante regresión lineal de la concentración de oxígeno disuelto en función del tiempo, en un sistema cerrado y sin aireación, con el objetivo de cuantificar la actividad metabólica real de la biomasa presente en el tanque de lodos activados.

Los valores de OUR obtenidos para las cuatro muestras analizadas evidencian un consumo continuo y sosteniendo de oxígeno, lo cual confirma la presencia de microorganismos activos capaces de oxidar la materia orgánica biodegradable remanente en el sistema.

Las tasas calculas se encuentran dentro de un rango moderado y relativamente homogéneo, lo que indica que el sistema de lodos activados mantuvo una actividad biológica estable durante el periodo de estudio, sin evidencias de inhibición metabólica ni de sobrecarga orgánica severa.

11.5. Resultados ANOVA

Con el fin de evaluar estadísticamente las variaciones en la carga orgánica soluble y en el consumo de oxígeno, se aplicaron análisis de varianza (ANOVA) de un factor a los datos de DQO filtrada (SCOD) presentadas en la Tabla 6 y a las tasas instantáneas de consumo de oxígeno derivadas de las curvas OD–tiempo.

Para la SCOD, los datos se agruparon en dos periodos de muestreo:

Tabla 10.

Estadísticos descriptivos de SCOD (mg O_2/L) por periodo.

Periodo	N	Media	DE	Mínimo	máximo
A (25/11–11/12)	17	396.35	31.01	327	435
B (12/12–19/12)	8	93.38	63.13	35	239

Elaborado por: Autoras

El ANOVA de un factor evidenció diferencias estadísticamente significativas entre ambos periodos ($F = 265.35$; $p = 4.01\times10^{-}14$), con un tamaño de efecto muy alto ($\eta^2 = 0.92$), lo que indica que la mayor parte de la variabilidad de la SCOD se explica por el cambio de periodo.

Tabla 11.

ANOVA de un factor para SCOD (mg O_2/L) por periodo.

Fuente	SC	gl	CM	F	P
Entre periodos	499368.24	1	499368.24	265.353	4.01e-14
Dentro de periodos (Error)	43283.76	23	1881.90		

Total	542652.00	24

Elaborado por: Autoras.

Como prueba no paramétrica de respaldo, se aplicó la prueba de Mann–Whitney, confirmándose igualmente la existencia de diferencias significativas ($p = 8.34\times10^{-5}$).

Tabla 12.

Prueba no paramétrica de respaldo (Mann–Whitney U) para SCOD por periodo.

Prueba	n(A)	n(B)	U	P
Mann–Whitney U	17	8	136.0	8.34e-05

Elaborado por: Autoras.

En el caso de la OUR, dado que se obtiene un único valor por muestra, no fue posible aplicar ANOVA directamente sobre estos valores.

En su lugar, se evaluaron diferencias en el consumo de oxígeno a partir de las tasas instantáneas de consumo ($-\Delta OD/\Delta t$) calculadas entre puntos consecutivos de las curvas OD–tiempo, obteniéndose múltiples observaciones por muestra.

El ANOVA de un factor aplicado a estas tasas no mostró diferencias estadísticamente significativas entre fechas ($F = 0.00595$; $p = 0.99936$), lo que sugiere que, bajo las condiciones del ensayo, el patrón de consumo de oxígeno fue comparable entre las muestras analizadas.

Tabla 13.

ANOVA de un factor para tasas instantáneas de consumo de OD ($-\Delta OD/\Delta t$) entre muestras.

Fuente	SC	Gl	CM	F	P
Entre muestras	0.000061	3	0.000020	0.005950	0.999
Dentro de muestras (Error)	0.150166	44	0.003413		
Total	0.150227	47			

Estos resultados indican que, mientras la carga orgánica soluble presentó cambios estadísticamente significativos a lo largo del periodo de estudio, la cinética instantánea de consumo de oxígeno mostró un comportamiento relativamente uniforme. Esta diferencia resalta que las variaciones en SCOD influyen principalmente en la magnitud global de la demanda de oxígeno, más que en la forma del patrón respiratorio heterótrofo, lo cual es coherente con los principios cinéticos del modelo ASM1.

12. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos a partir de los ensayos de Demanda Química de Oxígeno filtrada (SCOD), Demanda Bioquímica de Oxígeno carbonácea (método SM 5210 B con ATU), y mediciones de oxígeno disuelto en sistemas cerrados para la estimación de la tasa de consumo de oxígeno (OUR). El análisis se complementa con la evaluación biocinética mediante un modelo de primer orden, en el marco conceptual del modelo ASM1.

12.1. Variación Temporal de la DQO Filtrada (SCOD)

La Figura 7, elaborada a partir de los resultados presentados en la Tabla 6, muestra la variación temporal de la DQO filtrada (SCOD) durante el periodo de estudio. Se observa un comportamiento diferenciado en dos regímenes claramente definidos: un primer periodo caracterizado por valores elevados y relativamente estables de SCOD, y un segundo periodo con una disminución marcada de la carga orgánica soluble. Este comportamiento, según Ágreda Oña et al. (2024), resulta fundamental para el diseño de sistemas de tratamiento y para el desarrollo de simulaciones computacionales dinámicas.

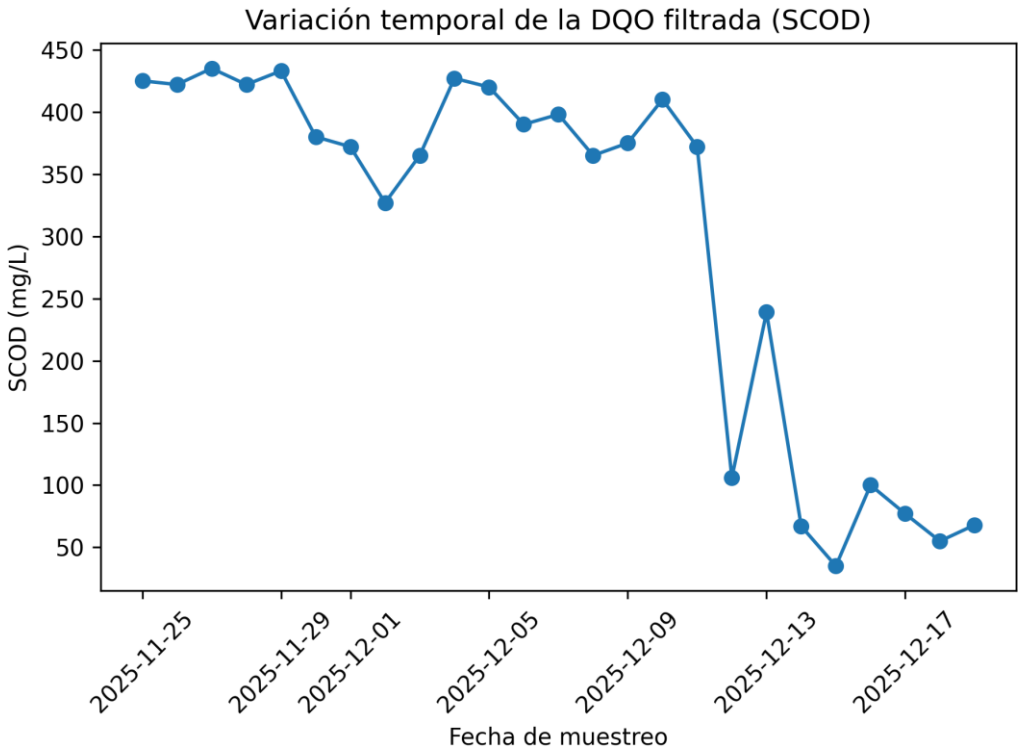


Figura 7. *Variación temporal de la demanda química de oxígeno filtrada (SCOD) en el afluente.*

Elaborado por: Autoras

Dado que la DQO analizada corresponde a la fracción soluble, los cambios observados reflejan variaciones en la carga orgánica soluble del afluente, atribuibles a procesos de dilución hidráulica, cambios en la composición del agua residual o modificaciones operativas producto de una baja de carga orgánica debido a las actividades inherentes del campus. Asimismo, según Płuciennik-Koropczuk & Myszograj. (2019), la facción soluble de la DQO puede representar aproximadamente el 10% de la carga orgánica soluble, lo que sugiere una fuerte activación a partir de cinco días en el metabolismo microbiológico.

12.2. Tasa de Consumo de Oxígeno en Sistemas Cerrados (OUR)

La Figura 8, elaborada a partir de los resultados de OD presentados en la Tabla 9, presenta la evolución del oxígeno disuelto en un sistema cerrado para las muestras analizadas, los cuales fueron coincidentes con los resultados de Fonseca et al. (2018), donde establece un promedio de 2,92 mg/L. La disminución progresiva del oxígeno disuelto evidencia

un consumo activo de oxígeno por parte de la biomasa heterótrofa, dato que compagina directamente con los resultados analizados por Flores-Salgado et al. (2021), determinaron que las bacterias soportaban una captación máxima específica de O_2 de 2,37 ± 1,52 mgO_2, $gVSS^{-1}h^{-1}$.

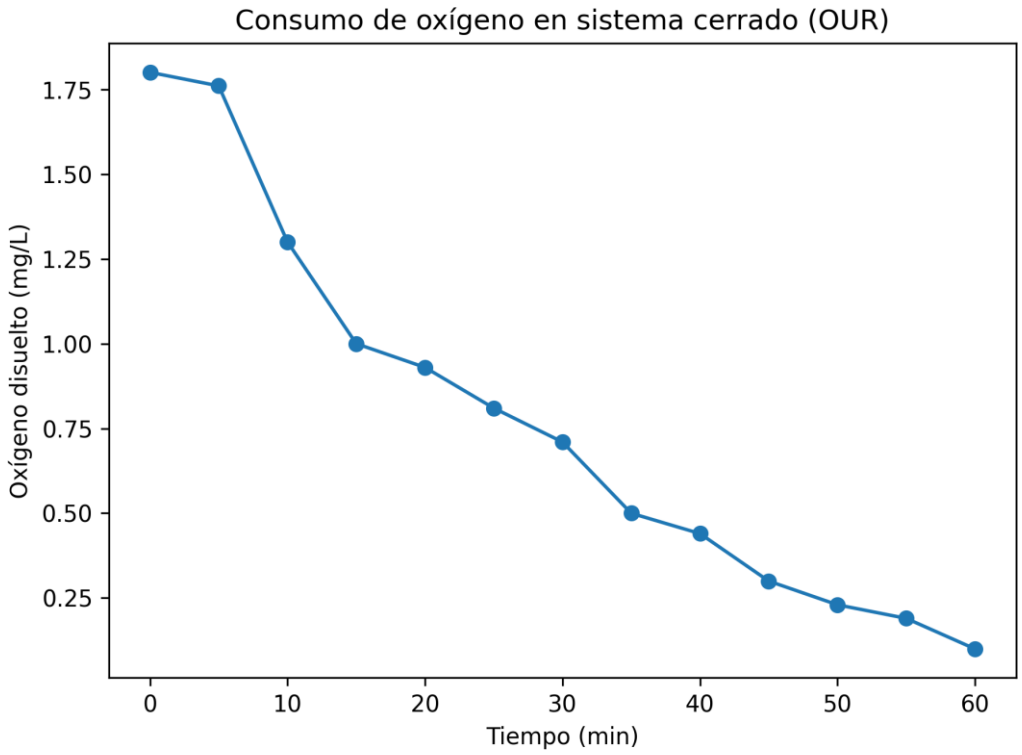


Figura 8. *Evolución del oxígeno disuelto en sistema cerrado para la estimación de la tasa de consumo de oxígeno (OUR) en presencia de ATU.*

Elaborado por: Autoras

El uso de ATU permitió inhibir la nitrificación, de modo que la OUR estimada representa principalmente la respiración heterótrofa en el consumo de carbón orgánico.

12.3. Análisis de $CBOD_5$ y $CBOD_{20}$

Los valores de $CBOD_5$ y $CBOD_{20}$ obtenidos mediante el método SM 5210 B con inhibición de la nitrificación evidencian que una fracción significativa de la demanda bioquímica carbonácea se manifiesta después del quinto día de incubación. La relación

$CBOD_5/CBOD_{20}$ cercana a 0,5 indica la presencia de carbono biodegradable de degradación más lenta dentro de la fracción soluble.

12.3.1. Evaluación Biocinética de la Biodegradación Carbonácea

La evaluación biocinética se realizó mediante un modelo de primer orden, expresado por la ecuación:

$$CBOD_t = CBOD_u\ (1 - e^{k_{20}t}) \quad \textbf{(4)}$$

A partir de los valores experimentales de $CBOD_5$ y $CBOD_{20}$ se estimaron los parámetros biocinéticos, evidenciando una cinética moderada de biodegradación.

La integración de los resultados de SCOD, CBOD y OUR demuestra coherencia entre la carga orgánica soluble, la actividad respiratoria heterótrofa y la cinética global del proceso, respaldando la metodología empleada y su aplicabilidad en estudios basados en ASM1.

La Tabla 6 resume los valores de DQO filtrada (SCOD) y los parámetros obtenidos a partir de las regresiones lineales OD–tiempo empleadas para el cálculo de la tasa de consumo de oxígeno (OUR) en sistemas cerrados con inhibición de la nitrificación mediante ATU. Los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos en todas las muestras son superiores a 0,93, lo que indica un ajuste adecuado del modelo lineal y confirma que el consumo de oxígeno estuvo dominado por procesos biológicos heterótrofos durante el intervalo analizado, lo que corresponde a un modelo de consumo de oxígeno heterótrofo para drenajes que lo analizaron (Cao & Alaerts, 1996), y que definieron que la biomasa suspendida puede desempeñar un papel de importancia crítica, que generalmente no debe ser descuidado. La importancia relativa de los dos tipos de biomasa depende del sistema y puede evaluarse cuantitativamente en función de los parámetros mencionados estudiados en esta investigación, situación similar que se tiene el campus CEASA con materia orgánica suspendida en los tanques de oxidación anaeróbicos.

Tabla 14.

Biocinética ASM1 para microrganismos heterótrofos.

Muestra	Fecha	SCOD (mg/L)	Pendiente dOD/dt (mg/L·min)	OUR (mg O2/L·h)	R^2	N
M1	25/11/2025	425	-0.03458	2.075	0.824	13
M2	01/12/2025	372	-0.03481	2.089	0.852	13
M3	08/12/2025	365	-0.03390	2.034	0.854	13
M4	16/12/2025	100	-0.03000	1.800	0.926	13

Nota. La OUR se calculó como OUR = −(dOD/dt) ×60. SCOD corresponde a DQO filtrada (0,45 μm). Las regresiones se ajustaron sobre el intervalo de 0–60 min (n=13).

Se observa que, para las muestras correspondientes a los días 25/11/2025, 01/12/2025 y 08/12/2025, los valores de SCOD se mantienen relativamente elevados (425, 372 y 365 mg O_2/L, respectivamente), acompañados de OUR similares, con valores comprendidos entre 2,03 y 2,09 mg O_2/L·h. Esta consistencia sugiere que, durante este periodo, la disponibilidad de sustrato carbonáceo soluble biodegradable fue suficiente para sostener una actividad respiratoria heterótrofa estable. Los autores Horn & Hempel. (1997), encontraron similitud en las pendientes de las regresiones lineales que refuerza la hipótesis de un afluente con características orgánicas comparables en términos de carga soluble biodegradable.

En contraste, la muestra del 16/12/2025 presenta una reducción significativa de la SCOD (100 mg O_2/L), acompañada de una disminución en la OUR (≈ 1,8 mg O_2/L·h). Este comportamiento evidencia una relación directa entre la carga orgánica soluble disponible y la tasa de consumo de oxígeno, lo que concuerda con los principios cinéticos del tratamiento biológico aerobio. Dado que la DQO analizada corresponde exclusivamente a la fracción soluble (SCOD), la disminución observada no puede atribuirse a variaciones en sólidos particulados, lo que estudiaron Rodrigues & Williams. (2001), donde se estableció que existen cambios reales en la concentración de compuestos orgánicos solubles, asociados a dilución hidráulica, modificaciones en la fuente del afluente o cambios operativos en el sistema de

recolección, en el caso del campus CEASA las rutinas operativas del personal y la gente se vio reducida por la temporada festiva y la fumigación de las instalaciones.

Desde la perspectiva del modelo ASM1, estos resultados refuerzan la importancia de la fracción soluble biodegradable (Ss) como principal responsable de la respiración heterótrofa inmediata. Lo que concuerda con Sepers et al. (1982) y la coherencia asociada entre SCOD y OUR que confirma que la metodología empleada en el campus CEASA permitió evaluar de forma indirecta la disponibilidad de sustrato soluble biodegradable y su impacto sobre la actividad metabólica de la biomasa.

Adicionalmente, con $CBOD_5$ = 24.26 mg O_2/L y $CBOD_{20}$ = 49.08 mg O_2/L y se estimó k_{20} = 0.119 d^{-1} y $CBOD_u$ = 54.08 mg O_2/L, la Tabla 15 presenta los parámetros biocinéticos estimados a partir de los valores experimentales de $CBOD_5$ y $CBOD_{20}$, obtenidos mediante el método SM 5210 B con ATU, lo que asegura que la demanda medida corresponde fundamentalmente a la oxidación del carbono orgánico, excluyendo la contribución de la nitrificación. La relación $CBOD_5/CBOD_{20} \approx 0{,}49$ indica que aproximadamente la mitad de la demanda bioquímica carbonácea total se expresa durante los primeros cinco días de incubación, mientras que la fracción restante requiere tiempos mayores para su oxidación, lo que también refieren los autores Cole & Pace.(1995), que encontraron que la eficiencia del crecimiento, producción bacteriana/(producción bacteriana + respiración bacteriana), osciló entre el 6 y el 40% y promedió entre el 16%y el 30% en aguas anóxicas, dependiendo de cómo se calculara. La eficiencia de crecimiento de las bacterias anaeróbicas es aproximadamente igual a la reportada para las bacterias aeróbicas, caso que empata con lo visto en CEASA por lo que el consorcio bacteriano estaría formado en su mayoría por bacteria anóxicas que dependen de los procesos de depletación de oxígeno superficial.

Tabla 15.

Parámetros biocinéticos estimados a partir de $CBOD_5$ y $CBOD_{20}$ (modelo de primer orden).

$CBOD_5$ (mg O_2/L)	**$CBOD_{20}$ (mg O_2/L)**	**$CBOD_5/CBOD_{20}$ (-)**	**k_{20} (d^{-1})**	**$CBOD_u$ (mg O_2/L)**	**Fracción ejercida 5 d (-)**	**Fracción ejercida 20 d (-)**
24.26	49.08	0.494	0.119	54.08	0.449	0.908

Nota. La estimación se realizó con $CBOD_t = CBOD_u (1 - e^{(-k_{20} \cdot t)})$ a 20 °C. $CBOD_5$ y $CBOD_{20}$ corresponden a SM 5210 B con ATU (inhibición de nitrificación).

Por otra parte, el ajuste del modelo de primer orden permitió estimar una CBOD última ($CBOD_u$) de aproximadamente 54 mg O_2/L, lo que representa la demanda carbonácea potencial total del sistema bajo condiciones aerobias prolongadas. La fracción ejercida a los 5 días (≈ 0,45) y a los 20 días (≈ 0,91) confirma que una proporción significativa del carbono biodegradable se oxida de manera progresiva según Garner. (2024), alcanzando valores cercanos a la demanda última únicamente tras periodos prolongados de incubación.

La constante cinética $k_{20} \approx 0{,}12\ d^{-1}$ es representativa de un proceso de biodegradación carbonácea moderada, consistente con aguas residuales que contienen una mezcla de sustratos fácilmente biodegradables y otros de degradación más lenta. Este valor se encuentra dentro del rango reportado por Lv. (2018) y en general en la literatura para efluentes municipales con una fracción apreciable de materia orgánica soluble biodegradable, pero no predominantemente rápida como lo es en CEASA.

Desde el enfoque del ASM1, estos resultados sugieren que, dentro de la fracción soluble total (SCOD), coexisten componentes con diferentes velocidades de biodegradación. Aunque el modelo ASM1 distingue la fracción lentamente biodegradable principalmente como particulada (Xs), el comportamiento observado en la cinética de CBOD indica la presencia de carbono soluble de degradación más lenta, el cual influye en la cinética global del sistema y en los requerimientos de oxígeno a largo plazo. Este aspecto es particularmente relevante para el

diseño y operación de sistemas de aireación, ya que una fracción significativa del consumo de oxígeno ocurre más allá del periodo convencional de 5 días.

En conjunto, la integración de los resultados de la Tabla 6 y la Tabla 9, demuestra una coherencia clara entre la carga orgánica soluble (SCOD), la actividad respiratoria heterótrofa (OUR) y la cinética de biodegradación carbonácea. Estos hallazgos respaldan la validez de la metodología experimental aplicada y aportan evidencia sólida para la caracterización de la fracción soluble biodegradable del influente, proporcionando información clave para la calibración de modelos cinéticos como el ASM1 y para la optimización de procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales.

12.4. Modelación y Simulación Biocinética según la ASM1

1. Consumo de Ss (Sustrato Soluble Fácilmente Biodegradable):

$$\rho_H = \mu_H \cdot \frac{S_S}{K_s + S_s} \cdot X_{BH}$$
$$\frac{dS_s}{dt} = -\frac{1}{Y_H}\rho_H + \rho_h \quad \textbf{(6)}$$

2. Hidrolisis de Xs (Sustrato Lentamente Biodegradable):

$$\rho_H = k_h \cdot \frac{X_S}{K_X + X_s} \cdot X_{BH}$$
$$\frac{dX_s}{dt} = -\rho_h \quad \textbf{(7)}$$

3. Fracción Inerte Soluble Si:

$$\frac{dS_i}{dt} = 0 \quad \textbf{(8)}$$

4. OUR carbonáceo (Aproximación Coherente con ASM1):

$$OUR_C \approx \left(\frac{1 - Y_H}{Y_H}\right) \quad \textbf{(9)}$$

En la gráfica 9, se tiene la simulación según el método ASM1 de las variables analizadas en la respirometría de DQO filtrada Ss, baja tasa de oxígeno disuelto e hidrólisis Xs.

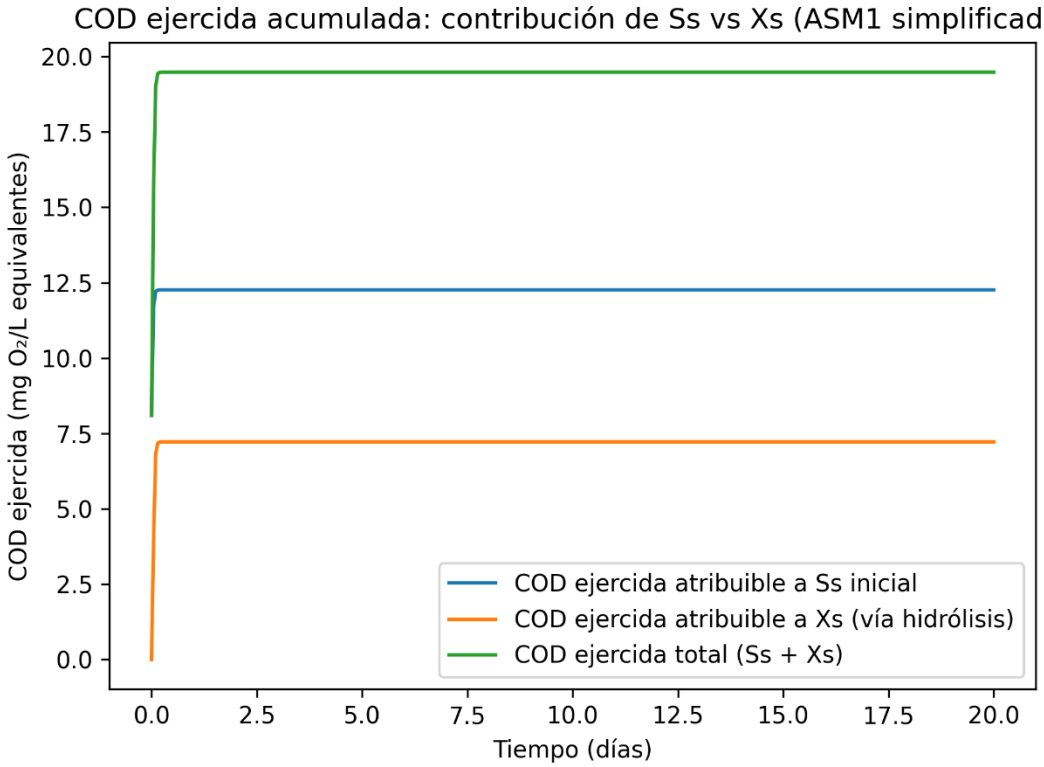


Figura 9. *Simulación ASM1*.

Las gráficas biocinéticas obtenidas a partir de la formulación simplificada del modelo ASM1 permiten interpretar de manera coherente el comportamiento de las fracciones de la DQO biodegradable y su relación con la demanda de oxígeno carbonácea del agua residual estudiada.

12.4.1. Comportamiento de la fracción Ss (sustrato fácilmente biodegradable)

En la **Figura 9,** se observa que la fracción **Ss** presenta un consumo rápido durante los primeros días del periodo de simulación, lo cual es característico de los sustratos solubles fácilmente biodegradables. Este comportamiento está gobernado por la cinética de crecimiento heterótrofo tipo Monod, donde la tasa de consumo depende directamente de la relación S_S / (K_S + S_S). La rápida disminución de Ss explica el elevado consumo de oxígeno observado en las etapas iniciales de los ensayos respirometricas y justifica que una fracción significativa de la demanda carbonácea se exprese dentro de los primeros cinco días, tal como se evidencia en los valores de $CBOD_5$ obtenidos experimentalmente.

Desde el punto de vista operativo, este comportamiento indica que Ss es responsable de los picos iniciales de demanda de oxígeno en sistemas aerobios, por lo que su magnitud tiene una influencia directa sobre los requerimientos de aireación en periodos cortos.

12.4.2. Dinámica de la fracción Xs

La fracción **Xs** muestra una disminución progresiva y mucho más lenta en comparación con Ss, lo que refleja su naturaleza de sustrato particulado lentamente biodegradable. En el marco del modelo ASM1, Xs no es consumido directamente por los microorganismos heterótrofos, sino que primero debe transformarse en Ss mediante el proceso de hidrólisis, cuya velocidad está controlada por el parámetro cinético k_h.

Este comportamiento explica claramente la diferencia observada entre $CBOD_5$ y $CBOD_{20}$, ya que una porción significativa de la demanda de oxígeno asociada a Xs solo se manifiesta en tiempos mayores, una vez que el sustrato ha sido hidrolizado y convertido en formas solubles disponibles para la biomasa. Por tanto, Xs actúa como un reservorio de carbono biodegradable que prolonga la demanda de oxígeno en el tiempo.

12.4.3. Estabilidad de la fracción Si (sustrato soluble inerte)

La fracción $\mathbf{S_i}$ permanece constante durante todo el periodo de simulación, lo cual es consistente con la definición del modelo ASM1, donde esta fracción se considera soluble pero no biodegradable. La estabilidad de Si indica que una porción de la DQO filtrada no contribuye a la demanda bioquímica de oxígeno, incluso en escalas temporales prolongadas.

Un valor relativamente alto de Si implica que la relación CBOD/SCOD es menor, situación que puede llevar a sobreestimar la biodegradabilidad del efluente si únicamente se consideran parámetros globales de DQO. Este aspecto es clave para la correcta interpretación de la calidad del agua residual y para el diseño de procesos biológicos.

12.5. Interpretación de la DQO ejercida acumulada por Ss y Xs

La Figura 9, que representa la DQO ejercida acumulada separando el aporte de Ss y Xs, ofrece una interpretación biocinética más clara que el OUR instantáneo. La curva asociada a Ss muestra una contribución dominante en los primeros días, evidenciando que la fracción fácilmente biodegradable es responsable de la mayor parte de la demanda de oxígeno temprana.

En contraste, la curva correspondiente a Xs incrementa de manera gradual, confirmando que su contribución a la demanda carbonácea ocurre de forma retardada y sostenida en el tiempo, debido a la necesidad previa de hidrólisis. La suma de ambas curvas representa la demanda total ejercida y pone en evidencia que, aunque Ss controla la respuesta inicial del sistema, Xs determina la demanda acumulada a mediano plazo.

12.6. Implicaciones para el análisis y diseño de sistemas biológicos

Los resultados obtenidos demuestran que la caracterización de la materia orgánica únicamente mediante indicadores de corta duración, como $CBOD_5$, puede subestimar la demanda real de oxígeno cuando existe una fracción Xs significativa. La separación biocinética entre Ss y Xs permite comprender mejor la dinámica del consumo de oxígeno y resalta la importancia de considerar procesos de hidrólisis y tiempos de retención adecuados en el diseño y operación de sistemas de tratamiento biológico.

En conjunto, las gráficas confirman la coherencia entre los datos experimentales obtenidos ($CBOD_5$, $CBOD_{20}$, SCOD y OUR) y los principios cinéticos del modelo ASM1, fortaleciendo la validez del fraccionamiento propuesto y su aplicabilidad para la interpretación del comportamiento biodegradativo del agua residual estudiada.

12.6.1. ***Predominio inicial de la fracción fácilmente biodegradable (Ss)***

A partir de los resultados obtenidos, se determinó que la fracción **Ss**, estimada como equivalente a $CBOD_5$**,** presenta un valor aproximado de 24,3 mg DQO/L, lo que representa cerca del 50 % de la DQO biodegradable total ($CBOD_{20} \approx 49{,}1$ mg O_2/L). Este hallazgo

confirma que una proporción significativa de la materia orgánica biodegradable del efluente se encuentra en forma soluble y fácilmente asimilable por los microorganismos heterótrofos.

En la Figura 9, esta condición se refleja en el consumo rápido de Ss durante los primeros días de simulación, coherente con la cinética de crecimiento heterótrofo del modelo ASM1. Desde el punto de vista experimental, este comportamiento explica que aproximadamente la mitad de la demanda carbonácea se exprese dentro de los primeros cinco días del ensayo, validando el uso de $CBOD_5$ como un buen indicador de la fracción rápidamente biodegradable del sistema.

12.6.2. ***Importancia cuantitativa de la fracción lentamente biodegradable (Xs)***

La fracción Xs, estimada como la diferencia entre $CBOD_{20}$ y $CBOD_5$**,** alcanzó un valor cercano a 24,8 mg DQO/L**,** evidenciando que una proporción comparable a Ss corresponde a materia orgánica de degradación lenta. Este resultado constituye un hallazgo clave, ya que demuestra que limitar el análisis de biodegradabilidad a $CBOD_5$ conduce a una subestimación del potencial real de consumo de oxígeno del agua residual.

En términos cinéticos, la Figura 9, muestra que Xs se consume de forma gradual, gobernada por el proceso de hidrólisis (k_h), lo cual explica el incremento progresivo de la demanda de oxígeno observada entre los días 5 y 20 del ensayo. Este comportamiento concuerda con la diferencia observada entre $CBOD_5$ y $CBOD_{20}$ y confirma la presencia de una fracción orgánica que prolonga la actividad biológica en el tiempo.

12.7. Elevada fracción soluble inerte (Si) dentro de la SCOD

El análisis de la DQO filtrada (SCOD) mostró valores significativamente superiores a la fracción biodegradable, lo que permitió estimar una fracción Si elevada, calculada como la diferencia entre SCOD y Ss. En el periodo inicial del estudio, la SCOD alcanzó valores del orden de 400–430 mg/L, mientras que Ss representó únicamente cerca del 6 % de dicha concentración.

Este hallazgo indica que una proporción dominante de la DQO soluble corresponde a compuestos no biodegradables, los cuales no contribuyen ni al $CBOD_5$ ni al $CBOD_{20}$. En la Figura 3, esta condición se refleja en la estabilidad de Si durante todo el periodo de simulación, lo que es consistente con la definición del modelo ASM1, donde la fracción soluble inerte no participa en los procesos biológicos de oxidación.

12.8. Diferenciación temporal clara de la COD ejercida por Ss y Xs

La Figura 9, que representa la COD ejercida acumulada separando el aporte de Ss y Xs, constituye uno de los resultados más relevantes del estudio. Los resultados muestran que la COD ejercida atribuible a Ss se concentra principalmente en los primeros días, mientras que la COD ejercida por Xs se distribuye de forma gradual a lo largo del periodo de simulación.

Cuantitativamente, este comportamiento explica por qué aproximadamente el 50 % de la demanda carbonácea total se ejerce antes del día 5, mientras que la fracción restante se manifiesta de forma retardada, asociada a la hidrólisis de Xs. Este hallazgo proporciona una interpretación biocinética directa de la relación $CBOD_5/CBOD_{20} \approx 0{,}49$, obtenida experimentalmente.

12.9. Implicaciones directas para la interpretación del OUR y la operación del sistema

La separación entre Ss y Xs permite interpretar correctamente los resultados de OUR obtenidos experimentalmente. El OUR elevado en las primeras etapas del ensayo se asocia directamente al consumo rápido de Ss, mientras que la reducción progresiva del OUR refleja el agotamiento de esta fracción y la transición hacia un régimen controlado por la hidrólisis de Xs.

Este hallazgo confirma que la demanda de oxígeno del sistema no depende únicamente de la magnitud de la carga orgánica, sino de su composición biocinética, lo cual tiene

implicaciones directas en el diseño de sistemas de aireación y en la estimación de tiempos de retención adecuados para asegurar la remoción de la fracción lentamente biodegradable.

12.10. Presión oxigénica ejercida por la fracción biodegradable

Los resultados biocinéticos evidencian que el efluente presenta una carga biodegradable significativa, distribuida casi equitativamente entre Ss ≈ 24,3 mg DQO/L y Xs ≈ 24,8 mg DQO/L. Desde una perspectiva ambiental, esto implica que el vertido genera una demanda de oxígeno disuelto (OD) tanto inmediata (asociada a Ss) como prolongada (asociada a Xs).

En el tramo receptor del río, la fracción Ss puede provocar descensos rápidos del OD en las zonas próximas al punto de descarga, afectando de forma aguda a organismos sensibles (macroinvertebrados bentónicos y peces). Por su parte, la fracción Xs, al degradarse lentamente, mantiene una demanda oxigénica residual aguas abajo, ampliando el impacto espacial del vertido.

12.10.1. Riesgo de agotamiento del oxígeno disuelto y estrés ecológico

La relación $CBOD_5/CBOD_{20} \approx 0,49$ indica que solo cerca de la mitad de la demanda carbonácea se ejerce en los primeros cinco días, mientras que la fracción restante se manifiesta en periodos más largos. En un sistema fluvial como el Río Isinche, caracterizado por caudales variables y tramos de baja turbulencia, este comportamiento puede favorecer zonas de estrés crónico por bajo OD, especialmente en épocas de estiaje.

Este patrón incrementa el riesgo de:

- Reducción de biodiversidad acuática,
- Cambios en la estructura trófica,
- Favorecimiento de organismos tolerantes a bajas concentraciones de oxígeno.

Alta proporción de DQO soluble inerte (Si) y acumulación ambiental

El análisis mostró que la SCOD (≈ 400–430 mg/L) está dominada por una fracción inerte soluble (Si), que no es removida por procesos biológicos convencionales. Ambientalmente, esta fracción no genera una demanda directa de oxígeno, pero sí puede:

- Contribuir a la coloración del agua,
- Afectar la transparencia y penetración de la luz,
- Transportar compuestos orgánicos recalcitrantes con potencial impacto ecotóxico a largo plazo.

La persistencia de Si implica que, aun cuando el sistema fluvial se recupere del impacto oxigénico, pueden mantenerse alteraciones fisicoquímicas en el ecosistema acuático.

12.10.2. Implicaciones acumulativas sobre la calidad del río

La combinación de una carga biodegradable activa (Ss + Xs) y una alta fracción inerte (Si) sugiere que el efluente tiene un impacto ambiental mixto: agudo por consumo de oxígeno y crónico por acumulación de compuestos no biodegradables. En descargas continuas, este escenario puede conducir a una degradación progresiva de la calidad del agua, incluso si los valores normativos puntuales son aparentemente cumplidos.

Los hallazgos indican que el efluente descargado al Río Isinche presenta un potencial significativo de impacto oxigénico y fisicoquímico, derivado tanto de fracciones biodegradables activas como de compuestos solubles inertes. La aplicación de medidas de mitigación enfocadas en la reducción de Ss y Xs, junto con estrategias de tratamiento terciario para Si, resulta fundamental para preservar la integridad ecológica del río y garantizar una gestión ambientalmente sostenible del vertido.

La interpretación ambiental del efluente estudiado y su potencial impacto sobre el Río Isinche debe analizarse a la luz del marco normativo ecuatoriano, particularmente del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) y de los criterios de calidad de agua para la protección de ecosistemas acuáticos.

De acuerdo con el Libro VI, Anexo 1 del TULSMA AM 097A, el límite máximo permisible de DBO_5 para descargas a cuerpos de agua dulce es de 100 mg/L (dependiendo del tipo de actividad y cuerpo receptor). Aunque los valores de $CBOD_5$ (~24,3 mg/L) obtenidos en el estudio se encuentran por debajo del límite normativo, los hallazgos biocinéticos evidencian que este cumplimiento no garantiza ausencia de impacto ambiental.

La normativa ecuatoriana se basa en indicadores de corta duración (DBO_5), sin considerar explícitamente la fracción lentamente biodegradable (Xs), la cual en este estudio representa aproximadamente el 50 % de la DQO biodegradable total. En consecuencia, aun cumpliendo el límite de DBO_5, el efluente puede generar una demanda oxigénica prolongada aguas abajo, lo que no es captado por el criterio normativo convencional.

El TULSMA establece que, para la protección de la vida acuática, los cuerpos de agua dulce deben mantener concentraciones de oxígeno disuelto (OD) generalmente superiores a 5 mg/L. Los hallazgos del estudio indican que la fracción Ss puede inducir un consumo rápido de oxígeno en el punto de descarga, mientras que Xs prolonga dicha demanda en el tiempo.

En un río con caudales variables como el Isinche, esta condición puede generar zonas temporales o permanentes con OD inferior a los valores recomendados, particularmente en épocas de estiaje, aun cuando la descarga cumpla con los límites de DBO_5 establecidos en la normativa.

El AM097 A regula la DQO total como un parámetro de control, pero no diferencia entre fracciones biodegradables e inertes. En el presente estudio, la SCOD (~400–430 mg/L) está dominada por la fracción Si, la cual no es removida por procesos biológicos convencionales y no genera DBO medible.

Si bien esta fracción puede no provocar un impacto inmediato por consumo de oxígeno, su descarga continua puede ocasionar:

- Alteraciones estéticas (color, turbidez),

- Acumulación de compuestos orgánicos recalcitrantes,
- Efectos crónicos no evaluados por la normativa actual.

La Constitución del Ecuador y el marco ambiental vigente incorporan el principio de prevención, que establece que la ausencia de certeza científica absoluta no debe utilizarse como razón para postergar medidas que eviten la degradación ambiental. Los resultados del fraccionamiento ASM1 y del análisis biocinético aportan evidencia técnica suficiente para identificar riesgos potenciales no explícitamente contemplados en los límites normativos actuales, particularmente asociados a la fracción Xs y a la acumulación de Si.

Si bien los parámetros convencionales de control establecidos en la normativa ambiental ecuatoriana permiten evaluar el cumplimiento formal de las descargas, los resultados del presente estudio evidencian que el fraccionamiento biocinético de la DQO proporciona información adicional clave para anticipar impactos ambientales sobre el cuerpo receptor, particularmente en términos de consumo de oxígeno y efectos crónicos. En este sentido, el uso complementario de herramientas basadas en ASM1 constituye un enfoque alineado con el principio de prevención ambiental establecido en la legislación ecuatoriana.

13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

13.1. Conclusiones

La caracterización experimental evidenció que la materia orgánica del efluente del campus CEASA presenta una biodegradabilidad parcial, al observarse que la DQO filtrada (SCOD) alcanza valores notablemente superiores a la demanda bioquímica carbonácea determinada por SM 5210 B con ATU ($CBOD_5$ = 24,26 mg/L y $CBOD_{20}$ = 49,08 mg/L). La relación $CBOD_5/CBOD_{20} \approx 0{,}49$ demostró que una fracción importante de la demanda carbonácea se expresa de manera retardada, confirmando la presencia simultánea de fracciones de degradación rápida y lenta.

El fraccionamiento experimental bajo el marco ASM1 permitió estimar una fracción Ss ≈ 24,3 mg DQO/L (≈ $CBOD_5$) y una fracción de degradación lenta Xs ≈ 24,8 mg DQO/L (≈ $CBOD_{20} - CBOD_5$), evidenciando una distribución prácticamente equivalente entre fracciones biodegradables rápida y lenta. Asimismo, la diferencia entre SCOD y Ss indicó una fracción soluble inerte (Si) dominante, lo cual sugiere que una parte considerable de la materia orgánica soluble no contribuye a CBOD, pero puede persistir y trasladarse en el medio receptor.

La integración de los datos experimentales en una formulación basada en ASM1 permitió reproducir el comportamiento biocinético observado: consumo rápido asociado a Ss y demanda prolongada controlada por la hidrólisis de Xs, mientras que Si permanece conservativa. El análisis por fracciones demostró que la optimización del proceso biológico no debe centrarse únicamente en DBO_5, sino también en el control de la fracción lentamente biodegradable (Xs) y en estrategias de pulimiento para la fracción soluble inerte (Si), especialmente cuando el objetivo es minimizar el impacto ambiental en el cuerpo receptor.

13.2. Recomendaciones

Para fortalecer la trazabilidad de la caracterización, se recomienda complementar el paquete analítico con DQO total (TCOD), TSS/VSS, DOC/UV254 y perfiles de pH–alcalinidad, con el fin de diferenciar mejor componentes particulados y solubles y reducir incertidumbre al interpretar biodegradabilidad y potencial de arrastre de compuestos recalcitrantes.

Se recomienda estandarizar los ensayos de respirometría incorporando OUR endógeno (fase sin sustrato) y réplicas experimentales (≥3) por muestra, para permitir comparación estadística directa de OUR. Adicionalmente, para cerrar el fraccionamiento con mayor robustez, se sugiere incluir pruebas complementarias como Zahn–Wellens o BDOC, y diferenciar Si de carbono soluble aromático.

Se recomienda implementar una calibración formal del ASM1 usando curvas OUR y CBOD en varios eventos de muestreo, y evaluar escenarios de optimización: incremento de SRT, control de aireación, y alternativas de tratamiento terciario como: filtración, adsorción y humedades, orientadas a disminuir la fracción Si. Esto permitirá tomar decisiones operacionales basadas en cinética y no solo en cumplimiento normativo puntual.

14. BIBLIOGRAFÍAS

Abdel-Shafy, A.-S., Morsy, M., Mahmoud, H., & Razek, H. (2022, enero 4). *Treatment of industrial electroplating wastewater for metals removal via electrocoagulation continous flow reactors | Water Practice & Technology | IWA Publishing*. https://iwaponline.com/wpt/article/17/2/555/86221/Treatment-of-industrial-electroplating-wastewater

Ágreda Oña, J. L., Carrera Molina, D. S., Oña Chuquimarca, Á. P., & Maldonado Campaña, P. P. (2024). ANÁLISIS DEL DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL CAMPUS SALACHE USANDO DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS. *Revista Recursos Naturales Producción y Sostenibilidad*, *3*(1), 69-91. https://doi.org/10.61236/renpys.v3i1.627

Alayo Atoche, O. R. (2023, diciembre 12). *Evolución del Potencial de óXido-reducción para Predecir la Eficiencia de Ozonización de Coliformes Termotolerantes en Efluentes Terciarios en una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales—ProQuest*. https://www.proquest.com/openview/0a9eb909fa8f96441fd44e7742a4c00f/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y

Ariho, A., Aja, L., Muhammad, T., & Mohammad, L. (2025). *Water pollution: Causes, impacts and current efforts to address the issues of water pollution along river Meizimera-kihihi, Kanugu District,Uganda.* F1000Research. https://doi.org/10.12688/f1000research.155162.2

Calero, A. (2023). *Caracterización de la relación DQO (Demanda Química de Oxígeno)/DBO5, 20 (Demanda Bioquímica de Oxígeno) en los efluentes líquidos residuales de industrias localizadas en Montevideo como método de "screening" rápido para determinar la eficiencia en el tratamiento de los mismos.* https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/39096

Calo, L., & Fuentes, F. (2024, marzo). *Diseño de un sistema secundario biológico para el fortalecimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales anaeróbica del campus CEASA*. https://repoadmin.utc.edu.ec/items/9c329e46-bdc5-4332-8f65-92067c1becd0/full

Cando Cisneros, J. A., & Jibaja Robles, S. D. (2018). *Diseño del sistema de alcantarillado combinado y planta de tratamiento de aguas residuales para la zona baja del barrio El Rosario de la parroquia de Píntag, cantón Quito, provincia de Pichincha*. https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/www.dspace.uce.edu.ec

Cao, Y.-S., & Alaerts, G. J. (1996). A model for oxygen consumption in aerobic heterotrophic biodegradation in dual-phase drainage systems. *Water Research*, *30*(4), 1010-1022. https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00257-X

Changoluisa Tandalla, J. A., & Oña Chuquimarca, A. P. (2024). *Determinación de las fracciones DQO del agua residual del Campus Salache, como insumo fundamental para el funcionamiento de la planta de tratamiento*. http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/11668

Chen, G., Bai, R., Zhang, Y., Zhao, B., & Xiao, Y. (2022). Chen, Geng, Rui Bai, Yiqing Zhang, Biyi Zhao, y Yong Xiao. «Application of Metagenomics to Biological Wastewater Treatment». The Science of the Total Environment 807, n.º Pt 1 (2022): 150737. Https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150737. *The Science of the Total Environment*, *807*(Pt 1), 150737. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150737

Cole, J. J., & Pace, M. L. (1995). Bacterial secondary production in oxic and anoxic freshwaters. *Limnology and Oceanography*, *40*(6), 1019-1027. https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.6.1019

Corominas, L., Flores-Alsina, X., Snip, L., & Vanrolleghem, P. A. (2012). Comparison of different modeling approaches to better evaluate greenhouse gas emissions from whole wastewater treatment plants. *Biotechnology and Bioengineering*, *109*(11), 2854-2863. https://doi.org/10.1002/bit.24544

Corrin, T., Rabeenthira, P., Young, K. M., Mathiyalagan, G., Baumeister, A., Pussegoda, K., & Waddell, L. A. (2024). A scoping review of human pathogens detected in untreated human wastewater and sludge. *Journal of Water and Health*, *22*(2), 436-449. https://doi.org/10.2166/wh.2024.326

Delzer, G. C., & McKenzie, S. W. (2003). *FIVE-DAY BIOCHEMICAL 7.0 OXYGEN DEMAND*.

Díaz González, C. M. (2024). *Revisión bibliográfica sobre la gestión, tratamiento y valorización de los lixiviados procedentes de la disposición de residuos sólidos urbanos*. http://dspace.umh.es/handle/11000/32430

Díaz González, J. C. (2016). El agua, recurso estratégico global, ¿riesgo u oportunidad? *Revista de Pensamiento Estratégico y Seguridad CISDE*, *1*(1), 80-86.

Elgindy, K. T., Nuwairan, M. A., & Ching, L. S. (2025). *Periodic Fractional Control in Bioprocesses for Clean Water and Ecosystem Health* (arXiv:2508.01022). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.01022

Espinosa Rodríguez, M. Á., Delgado Delgado, R., & Hidalgo Millán, A. (2024). Comparación de metodologías para el fraccionamiento de la DQO de aguas residuales municipales y su aplicación en el Modelo ASM1. *Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, 191-205. https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2024.17.1.84916

Flores-Salgado, G., Thalasso, F., Buitrón, G., Vital-Jácome, M., & Quijano, G. (2021). Kinetic characterization of microalgal-bacterial systems: Contributions of microalgae and heterotrophic bacteria to the oxygen balance in wastewater treatment. *Biochemical Engineering Journal*, *165*, 107819. https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107819

Fonseca, K. F., IlbayYupa, M., Bustillos, L., Barbosa, S., & Iza, A. (2018). Comparación de Métodos de Interpolación para la Estimación de Temperatura del Reservorio CEASA. *Revista Bases de la Ciencia. e-ISSN 2588-0764*, *3*(1), 57-66.

Font Prieur, D. Y., Yanelain Olmo, Y., Arias Molina, E., & Lobelles Sardiñas, G. O. (2022). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DESDE UNA PERSPECTIVA CTS. *Revista Minerva*, *3*(4), 131-142.

Freeman, C. N., Russell, J. N., & Yost, C. K. (2023). Temporal metagenomic characterization of microbial community structure and nitrogen modification genes within an activated sludge bioreactor system. *Microbiology Spectrum*, *12*(1), e02832-23. https://doi.org/10.1128/spectrum.02832-23

Ganji, F., Kamani, H., Ghayebzadeh, M., Abdipour, H., & Moein, H. (2024). RETRACTED: Evaluation of physical and chemical characteristics of wastewater and sludge of Zahedan urban wastewater treatment plant for reuse. *Heliyon*, *10*(2), e24845. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24845

Garcia León, M. S. (2024). *MINISTERIO DE PRODUCCIÓN, COMERCIO EXTERIOR, INVERSIONES Y PESCA.*

Garner, C. (2024). *EVALUATION OF METHANE-OXIDIZING BACTERIA PHYSIOLOGICAL RESPONSES TO CHANGES IN OXYGEN CONCENTRATION, INTERACTIONS WITH NON-METHANE-OXIDIZING HETEROTROPHIC BACTERIA, AND THE TAXONOMIC CLASSIFICATION OF METHYLOCYSTIS SUFLITAE SP. NOV.* https://hdl.handle.net/11244/340392

Gbekley, E. H., Komi, K., Houedakor, K. Z., Poli, S., Kpoezou, K., Adjalo, D. K., Zinsou-Klassou, K., Tchacondo, T., Ameyapoh, Y., Adjoussi, P., Gbekley, E. H., Komi, K., Houedakor, K. Z., Poli, S., Kpoezou, K., Adjalo, D. K., Zinsou-Klassou, K., Tchacondo, T., Ameyapoh, Y., & Adjoussi, P. (2023). The Physico-Chemical and Bacteriological Characterization of Domestic Wastewater in Adétikopé (Togo, West Africa). *Sustainability*, *15*(18). https://doi.org/10.3390/su151813787

Gómez-Chaves, J. M., & Manrique-Prieto, I. A. (2016). *Diseño y construcción de una torre de sedimentación para la evaluación de los procesos de remoción y eficiencia en el tratamiento de agua potable*. https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/20e5315f-2b73-46ab-b2e5-ccddb6b3d2ec

HACH. (2020). *DRB200, Bloque reactor digital; 30 pocillos para frascos de 16 mm, 230 V CA, Hach | Hach—Aspectos Generales | Hach*. https://mx.hach.com/drb200-bloque-reactor-digital-30-pocillos-para-frascos-de-16-mm-230-v-ca-hach/product?id=62337774192

Hayat, S., Li, P., Menhas, S., Liu, W., & Hayat, K. (2025). Exploring the nutrient nexus in environmental systems: Nitrogen and phosphorus cycling, removal, recovery, and management. *Environmental Research*, *284*, 122162. https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122162

Henze, M., Gujer, W., Mino, T., & Van Loosedrecht, M. (2015). Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. *Water Intelligence Online*, *5*(0), 9781780402369-9781780402369. https://doi.org/10.2166/9781780402369

Horn, H., & Hempel, D. C. (1997). Growth and decay in an auto-/heterotrophic biofilm. *Water Research*, *31*(9), 2243-2252. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00081-X

institutodelaguaes. (2024, enero 16). Muestreo de Aguas Residuales: Guía Completa en PDF para el Control y Análisis Eficaz. *Instituto del Agua*. https://institutodelagua.es/aguas-residuales/muestreo-de-aguas-residuales-pdfaguas-residuales/

ISA, I. y S. A. (2024). *Etapas del Tratamiento de Aguas Residuales: Cómo Lograr un Ciclo Sostenible – Isa*. https://isa.ec/la-importancia-de-clasificar-y-tratar-aguas-residuales-de-forma-correcta-2/

ISO. (2020). *ISO 5815-1:2019(en), Water quality—Determination of biochemical oxygen demand after n days (BODn)—Part 1: Dilution and seeding method with allylthiourea addition*. https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:5815:-1:ed-2:v1:en

Jiang, C.-K., Deng, Y.-F., Guo, H., Chen, G.-H., & Wu, D. (2023). *A new sulfur bioconversion process development for energy- and space-efficient secondary wastewater treatment* (arXiv:2305.13343). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.13343

Jorge, L. R. de. (2020, diciembre 15). *El proceso de tratamiento de aguas residuales y eliminación de contaminantes emergentes* [Text]. iAgua. iAgua. https://www.iagua.es/blogs/lander-rodriguez-jorge/proceso-tratamiento-aguas-residuales-y-eliminacion-contaminantes

Kato, S., & Kansha, Y. (2024). Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(39), 51064-51097. https://doi.org/10.1007/s11356-024-34584-0

Lacalamita, D., Mongiovi, C., & Gregorio, C. (2024). (PDF) Chemical oxygen demand and biochemical oxygen demand analysis of discharge waters from laundry industry: Monitoring, temporal variability, and biodegradability. *ResearchGate*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1387041

León Prem, R. A. (2017, junio). *EVALUACIÓN TÉCNICA Y PROPUESTA DE MEJORA DE LOS FILTROS PERCOLADORES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR*. https://crailandivarlibrary.primo.exlibrisgroup.com/discovery/fulldisplay/alma990002121590107696/502URL_INST:502URL

Lin, T.-C., Yang, Y.-R., Nguyen, Q. K., Chiu, M.-C., Yen, H.-M., Chen, K.-H., & Chuang, S.-H. (2025). The significance of slowly biodegradable COD on denitrification in the OAO process. *Journal of Environmental Management*, *378*, 124805. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124805

Liu, L., Zou, G., Zuo, Q., Li, S., Bao, Z., Jin, T., Liu, D., & Du, L. (2022). It is still too early to promote biodegradable mulch film on a large scale: A bibliometric analysis. *Environmental Technology & Innovation*, *27*, 102487. https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102487

Llivisaca Chiqui, J. C., & Peláez Vera, M. A. (2021). *Análisis del polielectrolito óptimo en el proceso de acondicionamiento de lodos biológicos previo a la deshidratación con filtros banda en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba*. http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/37095

Lv, W. L. (2018). DETERMINATION AND ANALYSIS OF KINETIC PARAMETERS OF HETEROTROPHIC BACTERIA IN MATHEMATICAL SIMULATION. *Applied Ecology and Environmental Research*, *16*(2), 1507-1518. https://doi.org/10.15666/aeer/1602_15071518

Males Álvarez, J. del C., Guerrero Aguirre, J. E., & Sánchez Proaño, R. G. (2023). Evaluation of the operational status of an extended aeration activated sludge reactor through measurement of COD and nitrogen fractionation. *Religación*, *8*(37), e2301090-e2301090. https://doi.org/10.46652/rgn.v8i37.1090

Marino, L., Todesco, R., Gagliano, E., Santoro, D., & Roccaro, P. (2025). Real-time wastewater quality monitoring by fluorescence sensors: Validation for COD and CEC monitoring and implication for carbon footprint reduction. *The Science of the Total Environment*, *963*, 178464. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178464

Misman, N. A., Sharif, M. F., Chowdhury, A. J. K., & Azizan, N. H. (2023). Water pollution and the assessment of water quality parameters: A review. *Desalination and Water Treatment*, *294*, 79-88. https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29433

Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons.

Morant Carmona, J. F., & Restrepo Lagos, L. F. (2016). *Análisis de las fracciones de DQO en las aguas de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).* https://agris.fao.org/search/en/providers/124906/records/67123243f2af106d913d12ed

Moretti, A., Ivan, H. L., & Skvaril, J. (2024). *A review of the state-of-the-art wastewater quality characterization and measurement technologies. Is the shift to real-time monitoring nowadays feasible?* https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105061

NTE INEN 2169—AGUA. CALIDAD DEL AGUA. MUESTREO. MANEJO Y CONSERVACIÓN DE MUESTRAS.pdf. (s. f.). Recuperado 7 de diciembre de 2025, de https://www.insistec.ec/images/insistec/02-cliente/07-descargas/NTE%20INEN%202169%20-%20AGUA.%20%20CALIDAD%20DEL%20AGUA.%20%20MUESTREO.%20%20MANEJO%20Y%20CONSERVACI%C3%93N%20DE%20MUESTRAS.pdf

Osorio Rivera, M. A., Carrillo Barahona, W. E., Negrete Costales, J. H., Loor Lalvay, X. A., & Riera Guachichullca, E. J. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, *6*(3), 228-245.

Perojo-Bellido de Luna, A. M., Aguilera-Corrales, Y., Villar-Aneiros, A., & Avilés-Aguilera, Y. de la C. (2022, marzo 14). *Caracterización de las aguas residuales generadas en la producción de conjugados monovalentes en el Instituto Finlay de Vacunas*. https://www.redalyc.org/journal/2034/203471465003/html/

Perugachi Vásquez, R. E. (2015). *Evaluación y la propuesta de la demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos disueltos totales (TDS) en las aguas residuales del baño de tintura en la empresa Textiles Tornasol* [bachelorThesis, Universidad Técnica del Norte]. https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/4343

Pimiento, K., & Cárdenas, M. J. (2021). Evaluación del tratamiento preliminar y primario para las aguas residuales del procesamiento industrial de alimentos en La Grita (Venezuela). *Inge CuC*, *17*(1), 1-14. https://doi.org/10.17981/ingecuc.17.1.2021.01

Pire Sierra, M. C., Rodríguez Sargent, K., Fuenmayor Reyes, M., Fuenmayor, Y., Acevedo, H., Carrasquero Ferrer, S., & Díaz Montiel, A. (2011). BIODEGRADABILIDAD DE LAS DIFERENTES FRACCIONES DE AGUA RESIDUAL PRODUCIDAS EN UNA TENERÍA. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, *21*(2), 5-19.

Płuciennik-Koropczuk, E., & Myszograj, S. (2019). New Approach in COD Fractionation Methods. *Water*, *11*(7), 1484. https://doi.org/10.3390/w11071484

Posit. (2025, mayo 14). *Citing RStudio*. Posit Support. https://support.posit.co/hc/en-us/articles/206212048-Citing-RStudio

Raffo Lecca, E., & Ruiz Lizama, E. C. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*, *17*(1), 71-80.

Reyes Suárez, C. J., & Rodríguez López, D. A. (2025). *Evaluación del sistema de alcantarillado sanitario y propuesta de mejoramiento del sector central de la ciudad de Santa Elena.* https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/12680

Rodrigues, R. M. N. V., & Williams, P. J. L. B. (2001). Heterotrophic bacterial utilization of nitrogenous and nonnitrogenous substrates, determined from ammonia and oxygen fluxes. *Limnology and Oceanography*, *46*(7), 1675-1683. https://doi.org/10.4319/lo.2001.46.7.1675

Rodriguez Loaiza, D. C. (2022). Optimización de un sistema de tratamiento mediante ensayos de tratabilidad para la remoción de materia orgánica en aguas residuales de alta complejidad. *Ingenierías USBMed*, *13*(1), 46-55. https://doi.org/10.21500/20275846.4741

Sepers, A. B. J., Cahet, G., & Goossens, H. (1982). Comparison between the carbon-14 and oxygen consumption method for the determination of the activity of heterotrophic bacterial populations. *Marine Biology*, *66*(3), 237-242. https://doi.org/10.1007/BF00397028

Solon, K., Flores-Alsina, X., Kazadi Mbamba, C., Ikumi, D., Volcke, E. I. P., Vaneeckhaute, C., Ekama, G., Vanrolleghem, P. A., Batstone, D. J., Gernaey, K. V., & Jeppsson, U. (2017). Plant-wide modelling of phosphorus transformations in wastewater treatment systems: Impacts of control and operational strategies. *Water Research*, *113*, 97-110. https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.007

Stoker, P., Tian, G., & Kim, J. Y. (2020). Analysis of Variance (ANOVA). En *Basic Quantitative Research Methods for Urban Planners*. Routledge.

Tandoi, V., Rossetti, S., & Wanner, J. (2017). *Activated Sludge Separation Problems: Theory, Control Measures, Practical Experiences*. IWA Publishing.

Tiar, S. M., Bessedik, M., Abdelbaki, C., ElSayed, N. B., Badraoui, A., Slimani, A., & Kumar, N. (2024). Steady-State and Dynamic Simulation for Wastewater Treatment Plant Management:

Case Study of Maghnia City, North-West Algeria. *Water*, *16*(2), 269. https://doi.org/10.3390/w16020269

Vazquez, A. (2025, mayo 21). DBO 5 y DQO: Parámetros clave en el análisis de aguas. *Eurofins Environment Testing Spain*. https://www.eurofins-environment.es/es/dbo5-dqo-analisis-aguas/

Vázquez-Mejía, G., Ortega-Aguilar, R. E., Esparza-Soto, M., & Fall, C. (2013). *Fraccionamiento de DQO del agua residual de Toluca por el protocolo STOWA*.

Yu, H., Wang, Y., Li, T., Gan, Q., Qu, D., & Qu, F. (2025). Calibrating activated sludge models through hyperparameter optimization: A new framework for wastewater treatment plant simulation. *Npj Clean Water*, *8*(1), 80. https://doi.org/10.1038/s41545-025-00513-y