

Hacia una Ibagué Sostenible
Estudio de Factibilidad para una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR en la
ciudad de Ibagué”

Fabio Nelson Duran Salguero

Asesor

Lida Margarita Zambrano Cortes

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD
Escuela de Ciencias Básicas de la Tecnología e Ingeniería ECBTI
Ingeniería Industrial

2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios porque me ha llenado de sabiduría y fortaleza desde la humildad para forjarme como un profesional y ante todo ser humano, la oportunidad de contar con esta bendición de proyecto ya hecha realidad de poder terminar mis estudios en la ingeniería y que el orgullo de ser un UNADISTA.

A mi madre YOLANDA SALGUERO quien desde el cielo ha guiado mi vida y mis estudios con amor y con las enseñanzas con la que me formo como hombre íntegro para esta sociedad y familia, sé que a pesar de las circunstancias ella ha sido mi ángel guardián en cada uno de mis proyectos de vida, su humildad y sabiduría han tenido un eco en mí. Ser la persona quien soy hoy se lo agradezco a ella y aquellos que han llegado a formar parte de mi vida.

A mi familia que son el motor a diario de mi vida mi esposa y mis hijos en ellos son en el que cada día levanto la mirada al cielo y me armo de valor para saber llevar los retos que me pongo en mi vida, por ellos he superado los obstáculos y he llegado a mis objetivos, donde cada caído es un impulso para levantarme con todas las fuerzas de alcázar mis metas.

A la universidad nacional abierta y a distancia UNAD la quien me impartió los conocimientos profesionales de la ingeniería industrial, cada tutor complemento mi formación he hizo de mi un profesional con ética y valor frente a una sociedad que ha perdido el sentido profesional.

Agradecimientos

Agradezco de todo corazón a mi Dios porque ha hecho de mí una persona profesional lleno de su presencia, donde cada día su bendición estuvo presente, la humildad y la sabiduría que hicieron que me llenara de perseverancia y fuera una persona innovadora frente a las circunstancias por la que atravesé para lograr mis sueños de ser un profesional de la ingeniería industrial.

A mi familia que estuvo presente en cada momento de mi formación y de las que cada día me lleno de sus buenas energías positivas y que me ayudaron a levantarme cuando me vieron cansado y caído. Son mi aire mi aliento de cada día; entre días y noches la constancia de ser un ingeniero industrial estuvo presente en mi mente y corazón. Siempre me arme de valor mirando a mi familia para alcanzar mi objetivo, donde fue duro, pero no imposible.

Agradezco a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD que confió en mis capacidades profesionales e intelectuales para mi formación. Dispuso de todos sus conocimientos en su talento humano y profesional para hacer de mí un gran ingeniero industrial, cada profesor moldeó mis conocimientos y reafirmo mis saberes dentro del esquema educativo su apoyo fue muy fundamental donde cada materia construyó el amor por la ingeniería industrial.

Resumen

El presente proyecto propone un estudio de viabilidad integral (técnica, económica y ambiental) y el diseño conceptual de una Planta de Tratamiento de Aguas residuales (PTAR) para ciudad de Ibagué, desde un enfoque de la ingeniería industrial, con el objetivo de optimizar los procesos de apuración, reducir el impacto ambiental y contribuir a la sostenibilidad hídrica del municipio.

Para alcanzar este propósito, se empleará una metodología de tipo descriptiva y proyectiva con un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo).

La investigación se desarrollará en cuatro fases: diagnóstico situacional, donde se analizará los caudales y cargas contaminantes; segundo, un análisis tecnológico y logístico técnico, para seleccionar procesos y tecnologías de tratamiento; considerando el diseño de la cadena de valor; tercero, un Análisis de distribución para minimizar flujos, aplicando principios de optimización industrial; y en el cuarto finalmente se llevará a cabo una evaluación integral economía y ambiental, para validar la viabilidad, se utilizará indicadores financieros estándar como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa de interés de Retorno (TIR), junto con métricas de beneficio social. Esta metodología permitirá estructurar un modelo de PTAR técnica y económicamente viable, alineado con las necesidades de la población y las normativas ambientales vigentes.

Este estudio no busca solo mitigar el impacto ambiental generado por las aguas residuales, sino contribuir a la planificación urbana y al bienestar social de la población, promoviendo un uso responsable de los recursos hídricos y fortaleciendo la gestión ambiental desde el ámbito de la ingeniería industrial.

Palabras clave: Aguas residuales, PTAR, ingeniería industrial, contaminación hídrica, tratamiento de agua, sostenibilidad, diseño del proceso.

Abstract

The present project proposes a comprehensive feasibility study (technical, economic, and environmental) and the conceptual design of a Wastewater Treatment Plant (WWTP) for the city of Ibagué, from an industrial engineering perspective, with the objective of optimizing treatment processes, reducing environmental impact, and contributing to the municipality's water sustainability. To achieve this purpose, a descriptive and projective methodology with a mixed approach (quantitative and qualitative) will be applied.

The research will be developed in four phases: first, a situational diagnosis, where flow rates and pollutant loads will be analyzed; second, a technological and technical-logistical analysis to select adequate treatment processes and technologies, considering the design of the value chain; third, a distribution analysis aimed at minimizing flows, applying industrial optimization principles; and fourth, an integrated economic and environmental assessment, to validate feasibility using standard financial indicators such as Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR), along with social benefit metrics.

This methodology will allow the structuring of a technically and economically viable WWTP model, aligned with the needs of the population and current environmental regulations.

This study not only seeks to mitigate the environmental impact generated by wastewater, but also to contribute to urban planning and the social well-being of the population, promoting a responsible use of water resources and strengthening environmental management within the field of industrial engineering.

Keywords: Wastewater, WWTP, Industrial Engineering, Water Pollution, Water Treatment, Sustainability, Process Design.

Tabla de Contenido

Introducción	14
Justificación	15
Objetivos.....	17
Objetivo General.....	17
Objetivos Específicos	17
Metodología	18
Fase 1: Diagnóstico de la Situación Actual del Problema. (meses 1 y 2)	18
<i>objetivo</i>	20
Fase 2: Análisis y Selección Tecnológica de Tratamiento (meses3-4)	20
<i>Objetivo</i>	20
Fase 3: Diseño Conceptual y Logística. (meses 5-6).....	20
<i>objetivo</i>	21
Fase 4: Evaluación de Viabilidad Económica y Ambiental. (meses 7-8).....	21
<i>Objetivo</i>	21
Marco Conceptual y Teórico	22
Aguas Residuales: Definición y Tipos	22
<i>Aguas residuales domesticas:</i>	22
<i>Aguas residuales industriales:</i>	22
<i>Aguas pluviales contaminadas:</i>	22
Importancia del tratamiento de aguas residuales.	22
Etapas de tratamiento de aguas residuales.....	23
Etapas de tratamiento de aguas residuales.....	23

Situación actual de saneamiento en Ibagué.	24
Sostenibilidad y economía circular en el tratamiento de aguas.	25
Resultados o Productos Esperados.....	26
Marco Legal	28
Normativa internacional	28
<i>Directiva marco del agua (2000/60/CE) Unión Europea:</i>	28
<i>Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas:</i>	28
<i>Guideline for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater (OMS, 2006):</i>	28
Normativa internacional	28
Normativa local (Tolima-Ibagué).....	30
Desarrollo de la fase 1: Diagnostico Situacional	31
Caracterización de las aguas residuales	32
Identificación de la población beneficiada del Proyecto De La Planta De.....	34
Población beneficiada por el proyecto PTAR de Ibagué.....	34
comunidades rurales cercanas a las fuentes hídricas.	34
Sector productivos e industriales	35
Agricultores y sector agropecuario	35
Instituciones educativas y de salud.....	35
El ecosistema y la sociedad en general.....	35
Opinión de la comunidad urbana y rural de la implementación de una Planta De Tratamiento De Aguas Residuales (PTAR)	36
¿En su opinión, cuál es el principal problema ambiental relacionado con las aguas residuales en Ibagué?.....	36

¿Qué expectativas tendría frente a la implementación de una PTAR en la ciudad?	36
¿Qué recomendaciones daría para que el proyecto tenga éxito y beneficie a la comunidad? ...	37
Protocolo de entrevista de actores claves entre la comunidad.....	39
Desarrollo de la fase 2: Selección tecnológica	40
Justificación técnica y económica:	42
<i>Eficiencia frente a costos (desde lo industrial)</i>	42
<i>Restricción de espacios</i>	42
<i>Valoración de residuos</i>	42
Matriz de evaluación de alternativas.	43
<i>Conclusión</i>	44
Desarrollo de la fase 3: Diseño e ingeniería	45
Diseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).....	45
<i>Esquema general de la planta</i>	45
Flujograma del proceso.	46
Distribución en planta (vista superior simplificada).....	48
Capacidad y población.....	49
Emplazamiento y geotecnia.....	49
Marco normativo.	49
Especificaciones técnicas.	49
Parámetros del diseño.....	50
mantenimiento y futuro.	50
Importancia De Los Aspectos De La Construcción De Una Planta De Tratamiento De Aguas Residuales (PTAR)	51

Aspectos técnicos y de ingeniería.....	51
Aspectos ambientales	51
Aspectos económicos	52
Aspectos sociales.....	52
Aspectos legales y normativos	52
Aspectos de operación y mantenimiento	53
Definición de la localización de la planta y alcance.....	57
Macro localización estratégica: sector industrial sur oriente.....	58
Esta decisión obedece a un análisis de costo y eficiencia fundamentado en:.....	59
Cumplimiento del marco normativo de RAS-2017	59
Aprovechamiento de los subproductos: la PTAR como unidad de negocio circular.	59
Valorización energética (biogás).....	60
Valorización agrícola (lodos y biosólidos).....	60
Conclusión.....	60
Desarrollo de la fase 4: Estudio de factibilidad	62
Matriz de coherencia de factibilidad	62
. Vinculo técnico y económico	63
Vinculo ambiental y operativo: 1	63
Vinculo territorial y social:.....	64
Vinculo Normativo y financiero:.....	64
Análisis de factibilidad financiera y flujo de caja	64
Escenario 1: incremento del 15% en el costo de la energía eléctrica	64
Escenario 2: crecimiento poblacional superior al proyectado (+10%).....	65

Escenario 3: disminución en los precios de los fertilizantes químicos.....	65
<i>Conclusión del análisis:</i>	66
Herramientas auxiliares	70
Transformación de la PTAR en una unidad de negocio: enfoque en una economía circular	70
Valorización energética del biogás (reducción de OPEX):	70
<i>Conclusión</i>	73
Conclusiones	74
Recomendaciones	75
Profundización de estudios de ingeniería de detalle.....	75
Fortalecimiento institucional del operador.	75
Estrategias de cofinanciación y cierre financiero.	75
Blindaje territorial del corredor logístico.	75
Programa permanente de educación y cultura del agua.	76
Referencias Bibliográficas	77
Apéndices.....	79

Lista de Figuras

Figura 1 <i>áreas por cuencas receptoras de la ciudad de Ibagué</i>	19
Figura 2 <i>Mapa de Ibagué y sus comunas</i>	31
Figura 3 <i>Formas y descripción de las PTAR</i>	34
Figura 4 <i>Diagrama de flujo de los procesos</i>	46
Figura 5 <i>Diagrama de crecimiento de población y contaminación</i>	56
Figura 6 <i>Mapa de Ibagué con sus comunas y las líneas de alcantarillado del proyecto</i>	57
Figura 7 <i>Vista panorámica de la ubicación de la PTAR</i>	58
Figura 8 <i>Trayecto de la línea de alcantarillado</i>	59
Figura 9 <i>Matriz de coherencia de factibilidad</i>	62
Figura 10 <i>Tuberías de alcantarillado de calidad y calibre</i>	63
Figura 11 <i>Diseño conceptual de la PTAR de Ibagué modelo industrial circular y híbrido</i>	72

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Resultados o productos esperados</i>	26
Tabla 2 <i>caracterización de las fuentes contaminantes de las aguas residuales</i>	32
Tabla 3 <i>Criterios de selección de las diferentes alternativas</i>	41
Tabla 4 <i>Evaluación de alternativas de OPEX y CAPEX</i>	43
Tabla 5 <i>La valoración de las alternativas</i>	47
Tabla 6 <i>Crecimiento poblacional y del agua residual.</i>	54
Tabla 7 <i>análisis de factibilidad y resiliencia del proyecto a</i>	66
Tabla 8 <i>maquinaria y herramienta que se usan en una PTAR</i>	67
Tabla 9 <i>Ingresos autos sostenibles de la PTAR</i>	73

Lista de Apéndices

Apéndice A <i>material de tubería PAVCO</i>	79
Apéndice B <i>Planta de tratamiento</i>	80
Apéndice C <i>PTAR de Amalfi es única en Antioquia - Teleantioquia Noticias</i>	81
Apéndice D <i>Cómo funciona la PTAR Aguas Claras - EPM Estamos ahí</i>	82
Apéndice E <i>Cómo funciona la Ptar Aguas Claras - EPM Estamos ahí</i>	83
Apéndice F <i>Planta de tratamiento de aguas residuales de la estrella México</i>	84
Apéndice G <i>¿Cómo funciona una planta de tratamiento de aguas residuales?</i>	85
Apéndice H <i>¿Cómo funciona una planta de tratamiento de aguas residuales?</i>	86

Introducción

En el contexto actual de constante transformación social, tecnológica y económica, resulta fundamental analizar los distintos factores que inciden en el desarrollo de nuestras comunidades. La comprensión de estos elementos permite no solo interpretar los fenómenos contemporáneos, sino también proponer soluciones efectivas que respondan a las necesidades emergentes. Este documento tiene como propósito presentar un análisis detallado sobre [tema específico], considerando sus implicaciones y posibles proyecciones a futuro.

El enfoque adoptado en este trabajo se basa en una revisión teórica, complementada con datos actuales y estudios de caso que ilustran la realidad del problema abordado. Se ha procurado mantener una visión crítica y reflexiva que permita no solo describir, sino también evaluar y cuestionar las dinámicas observadas. Además, se destaca la importancia de integrar distintas disciplinas para enriquecer la perspectiva analítica.

A lo largo del documento, se desarrollarán los principales conceptos relacionados con [tema], así como su evolución y estado actual. Finalmente, se presentarán conclusiones que buscan aportar al debate académico y profesional, brindando insumos útiles para futuras investigaciones o intervenciones prácticas. Con ello, se espera contribuir a una mejor comprensión de este fenómeno y sus desafíos.

Justificación

El desarrollo de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTRA) para la ciudad de Ibagué es una necesidad ambiental, sanitaria, económica y social de carácter urgente. La ciudad que cuenta con una población de aproximada 552,035 habitantes según el DANE Enel 2024 y una creciente actividad industrial genera diariamente grandes volúmenes de aguas residuales que son vertidas sin ningún tratamiento adecuado a las fuentes hídricas de la ciudad como lo es el río Combeima, Alvarado, Opia, Chípalo y quebradas, afectando gravemente la calidad del agua, la biodiversidad y la salud de las comunidades ribereñas.

Desde la perspectiva de la ingeniería industrial, la urgencia de este proyecto no solo reside únicamente en los beneficios ecológico, sino en la optimización de los recursos y la mitigación del alto costo de la inacción. La ausencia de un tratamiento adecuado de las aguas residuales genera externalidades negativas cuantificables para la ciudad: como sanciones legales por incumplimiento de la normativa de la legislación colombiana (Ley 99 de 1993, resolución 0631 de 2015). Sobrecostos en la potabilización del agua y pérdida de productividad asociadas a problemas de salud pública en las comunidades rivereñas. Este proyecto busca revertir este esquema de pérdidas mediante un modelo de gestión eficiente que transforme un residuo en un recurso potencial para el sistema económico del departamento.

En este contexto, el proyecto propone aplicar competencias propias de la ingeniería industrial tales como el diseño de procesos, logística inversa, y evaluación financiera para la estructura de una PTAR técnica y económicamente viable. Se busca maximizar el retorno de la inversión pública a asegurando no solo la construcción de la infraestructura, sino su sostenibilidad operativa y financiera a largo plazo en su funcionamiento, permitiendo a si incluso

la reutilización de aguas tratadas para el uso agrícola, industrial de tal manera que se generara una economía circular para la ciudad y el departamento del Tolima.

Finalmente, el proyecto busca alinearse directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), aportando concretamente a:

ODS 6 (Agua Limpia y Saneamiento): específicamente la meta es 6,3 mejorando la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación propuesta para el año 2030.

ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura): desarrollando infraestructuras fiables, sostenibles y resilientes de calidad.

ODS 11(Ciudades y Comunidades Sostenibles): reduciendo el impacto ambiental negativo per-capital de las ciudades.

ODS 12(producción y Consumo Responsables): fomentando la gestión ecológicamente racional de los recursos (12,4)

Nota: los ODS son un conjunto de 17 objetivos globales adoptados por las naciones unidas (ONU) en el año de 2015 como parte de la agenda 2030 la cual funciona como una hoja de ruta universal para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad.

Objetivos

Objetivo General

Realizar un estudio de factibilidad para la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en la ciudad de Ibagué

Objetivos Específicos

Diagnosticar la situación actual de la generación, manejo y disposición de aguas residuales domésticas e industriales en la ciudad de Ibagué.

Estimar la cantidad y características fisicoquímicas y biológicas de las aguas residuales generadas por la población y las industrias locales.

Seleccionar tecnologías adecuadas para el tratamiento de aguas residuales, considerando criterios técnicos, ambientales, operativos y de costos.

Proponer el diseño conceptual de una planta de tratamiento con su capacidad, procesos, ubicación y esquemas de operación.

Evaluar la viabilidad económica y ambiental del proyecto, incluyendo análisis de inversión, operación y beneficios específicos.

Metodología

Esta metodología es una propuesta que constituye el conjunto de procedimientos técnicos y de gestión que guiará al desarrollo del estudio de la propuesta de una planta de tratamiento de aguas residuales para la ciudad de Ibagué.

Su finalidad es garantizar un proceso sistemático, riguroso y verificable que permita recopilar, analizar e interpretar la información necesaria para formular una solución técnica, ambiental al problema de la disposición inadecuada de las aguas residuales domésticas e industriales.

El estudio del proyecto se desarrollará bajo un enfoque mixto ya que combina la recopilación de datos numéricos, caudales concentración de contaminación con información cualitativa obtenida mediante entrevistas, observaciones de campo y revisión documental. Este enfoque integral permite comprender tanto los aspectos técnicos del sistema de saneamiento actual como las condiciones institucionales, sociales y ambientales que influyen en su funcionamiento.

Como parte del componente cualitativo del enfoque mixto, se utilizó la entrevista semiestructurada como instrumento de recolección. Este método permitió obtener información de actores claves (líderes comunales y usuarios industriales), centrandose el análisis en la percepción del impacto ambiental y la aceptación social de la infraestructura propuesta.

Este estudio se estructura en 4 fases, cada una está orientada en cada uno de los objetivos específicos del proyecto:

Fase 1: Diagnóstico de la Situación Actual del Problema. (meses 1 y 2)

En esta fase consiste en la recopilación, análisis y evaluación de la información existente sobre la generación, manejo y disposición actual de las aguas residuales domésticas e industriales

en la ciudad de Ibagué. Se busca identificar las principales fuentes de contaminación, y el estado de la infraestructura de la red de Alcantarillado.

Para dotar de rigor técnico al diagnóstico, la estimación del caudal del diseño se realizará mediante la formulación de proyección demográfica (métodos geométricos o exponencial según el comportamiento de la población), asegurando una capacidad futura adecuada. Asimismo, la caracterización de la carga contaminante se fundamentará en datos secundarios de entidades oficiales como IBAL y CORTOLIMA, contrastado con los valores típicos establecidos en la normativa técnica RAS-2017.

Figura 1

áreas por cuencas receptoras de la ciudad de Ibagué



Fuente. empresa de acueducto y alcantarillado de Ibagué IBAL.

Nota. En esta imagen se muestra el desarrollo urbanístico y los afluentes donde se vierten las aguas residuales.

objetivo

Diagnosticar la situación actual del manejo de las aguas residuales en Ibagué, ubicando las fuentes generadoras, los puntos de vertimiento, sustentando en un análisis cuantitativo de la demanda hídrica y cualitativo del impacto socio ambiental.

Fase 2: Análisis y Selección Tecnológica de Tratamiento (meses3-4)

Esta fase busca determinar las alternativas tecnológicas más adecuadas para el tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Ibagué, teniendo en cuenta las características del afluente los volúmenes generados, las condiciones climáticas, topográficas, operativas y los costos asociados.

Para asegurar una decisión objetiva y trazable, la selección de la tecnología no se basará en criterios subjetivos, sino que se realizará mediante una matriz de ponderación o análisis multicriterio (como el proceso analítico jerárquico AHP). Este método nos permitirá evaluar distintas opciones priorizando indicadores claves de ingeniería industrial como la eficiencia operativa y la optimización del OPEX (costos de operación y mantenimiento), garantizando la sostenibilidad financiera del sistema. Se aplican criterios técnicos, ambientales, económicos y sociales. Para la seleccionar las tecnologías más viables para ciudad.

Objetivo

Comparar y seleccionar las tecnologías de tratamiento mediante de herramientas de decisión multicriterio, asegurando el mejor ajuste técnico, económico y ambiental para la ciudad de Ibagué.

Fase 3: Diseño Conceptual y Logística. (meses 5-6)

En esta fase se desarrollará el diseño conceptual de la planta de tratamiento seleccionada, definiendo su capacidad, componentes principales, esquemas de operación y requerimientos

logísticos. Desde la perspectiva de la ingeniería de métodos, el diseño incluirá un análisis de distribución en la planta (layout) orientado a optimizar los flujos hidráulicos y el manejo de los lodos, con el fin de minimizar distancias y costos de transporte interno. Para la elaboración de los esquemas básicos y planos de flujo, se hará uso de software de diseño asistidos (CAD) asegurando precisión y técnica en la propuesta de la localización y logística operativa.

También se analizará la ubicación óptima del sitio y los aspectos constructivos y operativos básicos.

objetivo

Elaborar el diseño conceptual aplicando a principios de distribución en planta y logística operativa para optimizar el funcionamiento del sistema.

Fase 4: Evaluación de Viabilidad Económica y Ambiental. (meses 7-8)

Esta fase integra los resultados técnicos y con un análisis financiero y ambiental para determinar la viabilidad integral del proyecto. La viabilidad económica se determinará mediante el cálculo riguroso de indicadores financieros estándar: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y el análisis de sensibilidad sobre variables críticas (como el costo de energías o de interés) para evaluar el riesgo financiero. En lo ambiental, se definirán las medidas de mitigación necesarias para asegurar la sostenibilidad del proyecto.

Objetivo

Evaluar la rentabilidad y sostenibilidad del proyecto mediante indicadores financieros y análisis de riesgos, determinando su viabilidad integral para la ciudad de Ibagué.

Marco Conceptual y Teórico

Aguas Residuales: Definición y Tipos

Las aguas residuales son aquellas que han sido utilizadas en actividades humana y que, como resultado contienen contaminantes físicos, químicos y biológicos. Estas aguas pueden clasificarse en:

Aguas residuales domésticas:

generadas por actividades cotidianas en viviendas (baños, cocinas, lavandería)

Aguas residuales industriales:

provenientes de procesos productivos y que pueden contener sustancias específicas como metales pesados, aceites, solventes y productos químicos.

Aguas pluviales contaminadas:

que arrastran residuos sólidos y químicos de la calle y superficies urbanas.

El vertimiento sin tratamiento de estas aguas genera contaminación de fuentes hídricas, afectan la salud pública y ponen en riesgo la biodiversidad acuática.

Importancia del tratamiento de aguas residuales.

El tratamiento de aguas residuales tiene como objetivo remover contaminantes antes de que estas sean devueltas al ambiente o reutilizadas. Entre los beneficios se encuentran:

Reducción de la contaminación de ríos y suelos.

Protección de fuentes hídricas para consumo humano y agrícola.

Prevención de enfermedades transmisibles por aguas.

Cumplimiento de normativas ambientales nacionales e internacionales.

Además, el tratamiento adecuado de estas aguas puede permitir su reutilización en riegos, procesos industriales y recargas de acuíferos, lo que es especialmente importante en un contexto de cambio climático y escasez hídrica.

Etapas de tratamiento de aguas residuales.

El tratamiento de aguas residuales se desarrolla en distintas fases:

Tratamiento preliminar: retiro de sólidos grandes, arenas grasas (rejillas, desalentadores).

Tratamiento primario: sedimentación de sólidos suspendidos.

Tratamientos secundarios: eliminación de materia orgánica mediante procesos biológicos (lodos activados, biodigestores)

Tratamiento terciario: mejora la calidad del afluente mediante filtración, desinfección con cloro o radiación UV y eliminación de nutrientes.

Tratamiento de lodos: manejo de subproductos generados en el proceso.

Etapas de tratamiento de aguas residuales.

En Colombia el tratamiento de aguas residuales está regulado por diversas normativas, las más relevantes son:

Ley 99 de 1993: creada en el ministerio de medio ambiente y establece los principios generales de protección ambiental.

Decreto 3930 de 2010: regula el uso de recursos hídricos y el manejo de vertimientos líquidos.

Resolución 0631 de 2015 (Mi ambiente): establece los parámetros máximo permisible para vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y suelos.

Estas normativas obligan a los municipios e industria a tratar sus aguas residuales antes de sus descargas, lo que justifica la necesidad de implementar una planta de tratamiento de aguas residuales municipales.

Situación actual de saneamiento en Ibagué.

La ciudad de Ibagué enfrenta una deficiencia crítica en cuanto al tratamiento de aguas residuales. A pesar de contar con una red de alcantarillado, no posee una planta de tratamiento de gran escala que procese las aguas recolectadas, lo que deriva en vertimientos directos al río Combeima y sus afluentes. Esto ha generado problemas ambientales visibles, como la eutrofización (enriquecimiento excesivo de nutrientes en cuerpos de agua, ríos, mares causados principalmente por las actividades humanas como las agriculturas “fertilizantes de nitrógeno” las aguas residuales “fosforo”) de cuerpos de agua, pérdida de la biodiversidad y quejas de las comunidades locales.

La falta de infraestructura también limita el acceso a programas de reutilización de aguas tratadas, y representa un incumplimiento de los compromisos ambientales nacionales e internacionales.

Tecnologías apropiadas para plantas de tratamiento de aguas residuales en contexto urbano.

Existen diversas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales. La selección depende del volumen de agua, tipo de contaminante, costo y condiciones climáticas. Algunas de las más comunes para contextos urbanos como Ibagué son:

Lodos activados: proceso aeróbico muy efectivo para remover materia orgánica y nutriente.

Biodigestores anaerobios: adecuados para zonas con menor disponibilidad energética, generan biogás como subproductos.

Filtros percoladores y humedales artificiales: opciones de trabajo mantenimiento y buena eficiencia, especialmente para áreas periféricas.

Sistemas compacto-modulares: ideales para ampliar capacidad futura y adaptarse al crecimiento urbano.

Sostenibilidad y economía circular en el tratamiento de aguas.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) modernas no solo cumplen una función ambiental, sino que se alinean con principios de economías circular al:

Recuperar agua para riego o usos industriales.

Generar lodos utilizables como abono a fuentes de energía (biogás).

Reducir costo de tratamiento a largo plazo.

Promover la educación ambiental y participación comunitarias.

Resultados o Productos Esperados

Tabla 1

Resultados o productos esperados

<i>RESULTADO/PRODUCTO ESPERADO</i>	<i>INDICADOR</i>	<i>BENEFICIARIO</i>
vertimientos, estado actual de manejo y principales fuentes de contaminación.	% de zonas diagnosticadas respecto al área urbana e industrial total. Comparación entre número de sectores evaluados y número total de zonas con descargas según registros de CORTOLIMA y el IBAL. mediante toma de muestras en campo de análisis de laboratorio y comparación con la normativa ambiental (Resolución 0631 de 2015)	Autoridades ambientales (CORTOLIMA, Alcaldía, IBAL), comunidad técnica y académica.
Base de datos consolidada con resultados de análisis de laboratorio de 10 puntos de muestreo.	Número de parámetros analizados y porcentaje de cumplimiento de muestreo. Medición directa mediante análisis fisicoquímicos (DBO, DQO, SST, pH, coliformes) realizados en laboratorio acreditado.	Industrias, empresas prestadoras del servicio, población urbana usuaria del sistema de alcantarillado.
Documento comparativo de tecnologías con justificación	Número de tecnologías evaluadas y validadas según	Instituciones técnicas, IBAL, consultores ambientales y

técnica y económica de la alternativa más viable.	<p>criterios definidos.</p> <p>Aplicación de matriz multicriterio (costo, eficiencia, mantenimiento, área requerida) y revisión de literatura técnica.</p>	sector industrial.
Diseño conceptual de la PTAR con planos, memoria técnica y estimación de capacidad de tratamiento (l/s).	<p>Porcentaje de avance del diseño conceptual aprobado.</p> <p>Validación del diseño por parte de asesores técnicos y comparación con requerimientos normativos (RAS 2000 y Resolución 0631 de 2015).</p>	Alcaldía de Ibagué, IBAL, comunidad local de zonas beneficiadas por la PTAR.
Estudio de factibilidad económica y ambiental con análisis costo-beneficio y proyección de impactos positivos.	<p>Relación beneficio/costo y número de impactos ambientales positivos identificados.</p> <p>Evaluación mediante análisis financiero (VAN, TIR) y matrices de impacto ambiental (Leopoldo o similar).</p>	Gobierno municipal, empresas prestadoras de servicios, comunidad urbana y sector ambiental.

Nota. Por medio de esta tabla se describe del como seria el resultado del estudio que se hace para el proyecto de una PTAR para Ibagué bajo los parámetros legales de las normas locales y nacionales.

Marco Legal

Normativa internacional

Directiva marco del agua (2000/60/CE) Unión Europea:

Establece la obligación de proteger y mejorar la calidad de las aguas, asegurando que todas las aguas residuales urbanas reciban tratamiento adecuado, antes de ser devueltas al medio ambiente.

Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas:

Obligan a los estados miembros de la Unión Europea UE a construir plantas de tratamientos de aguas residuales PTAR en aglomeraciones urbanas.

Guideline for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater (OMS, 2006):

Orientaciones para el manejo seguro de aguas residuales con fines de reutilización en otras actividades.

Convenio de Ramsar (1971)

Promueve la protección de humedales y ecosistemas acuáticos, indirectamente relacionado con el control de vertimientos.

Normativa internacional

Constitución Política de Colombia (1991).

Artículo 79: derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y seguro.

Artículo 80: deber del estado colombiano de planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales.

Ley 99 de 1993.

Mediante esta ley se crea el Ministerio de Ambiente y el Sistema Nacional Ambiental (SINA).

Principio de “quien contamina paga”.

Decreto 2811 de 1974- Código Nacional de Recursos Nacionales Renovables.

Establece que la contaminación de las aguas debe prevenirse y controlarse de manera adecuada.

Decreto 1594 de 1984.

Regulaba los usos del agua y los criterios de calidad. (en gran parte sustituido por Resolución 0631 de 2015).

Decreto 3930 de 2010.

Regula los vertimientos a cuerpos de aguas y sistemas de alcantarillado.

Define la obligación de permisos de vertimiento.

Resolución 0631 de 2015(MADS).

Establece parámetros y valores máximos permisibles de vertimientos puntuales a cuerpos de aguas y alcantarillado públicos.

Define límites para DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), DQO (Demanda Química de Oxígeno), SST (Sólidos Suspendidos Totales), grasas y aceites, nutrientes, materiales pesados, entre otros.

Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales (PNMAR,202).

Meta de tratamiento de aguas residuales urbanas en todo el territorio nacional.

Normativa local (Tolima-Ibagué)

Plan de desarrollo municipal de Ibagué: establecer líneas estratégicas para saneamiento básico y gestión ambiental.

Plan de saneamiento y manejo de vertimientos (PSMV) de Ibagué: instrumento exigido por la normatividad nacional para planear el tratamiento de aguas residuales urbanas.

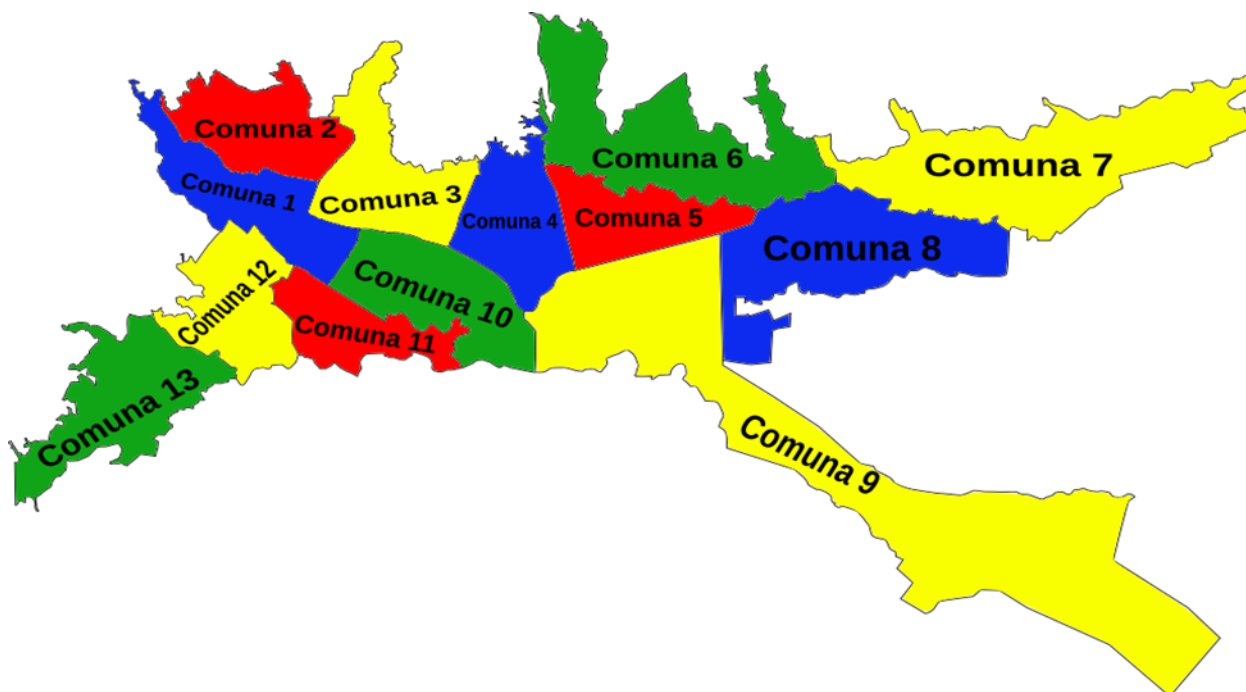
Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA): autoridad ambiental encargada de regular, vigilar y otorgar permisos de vertimientos en la región.

En este marco legal anteriormente presentado la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales para la ciudad de Ibagué se fundamenta en los parámetros establecidos en las obligaciones internacionales sobre la protección de las aguas como recurso primordial para la vida en la tierra, la normativa nacional (constitución, Ley 99/93, decreto 3930/2010, Resolución 0631/2015), los instrumentos locales (PSMV) de Ibagué y regulaciones de CORTOLIMA.

Desarrollo de la fase 1: Diagnostico Situacional

Figura 2

Mapa de Ibagué y sus comunas



Fuente. empresa de acueducto y alcantarillado de Ibagué IBAL

Nota. En este mapa podemos ver que Ibagué está dividida en 13 comunas de las cuales la 7,8 y 9 son las de mayor crecimiento en los últimos años y a si la contaminación del agua.

Específicamente, el área de influencia directa corresponde a la cuenta media del río Combeima, río la Opia y el río Alvarado, sector estratégico por ser el punto de convergencia de los colectores principales del sistema de alcantarillado actual. Esta ubicación permite aprovechar la gravedad para el flujo del afluente, reduciendo costos energéticos de bombeo (aspectos claves de la ingeniería industrial).”

Caracterización de las aguas residuales

Para establecer los parámetros del diseño de la PTAR, es fundamental conocer la carga contaminante de los afluentes implicados. Debido a la naturaleza de este estudio de factibilidad y el cronograma de ejecución de ocho (8) meses, se determinó que la caracterización se fundamenta en datos secundarios oficiales.

Los valores en estos apartados en este apartado provienen de los registros históricos y reportes técnicos de los laboratorios acreditados de la empresa de acueducto y alcantarillado de Ibagué (IBAL S.A.E.S.P) y la corporación autónoma del Tolima (CORTOLIMA). El uso de esta información garantiza que el diseño conceptual no se base en un muestreo puntual, sino en serie de datos de la ciudad, cumpliendo con los requisitos de la información previene del RAS 2017.

Tabla 2

caracterización de las fuentes contaminantes de las aguas residuales

Caracterización de afluentes (aguas residuales crudas) ciudad de Ibagué				
Parámetros	Unidad	Valor promedio (datos IBAL)	Límite máximo permitido (RES. 0631/2015)	Observación técnica
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)	mg/LO_2	280 – 320	90.00	Alta carga orgánica. Requiere tratamiento biológico
Demanda química de	mg/L	250- 650	180.00	relación DQO/DBO>5(agua biodegradable)

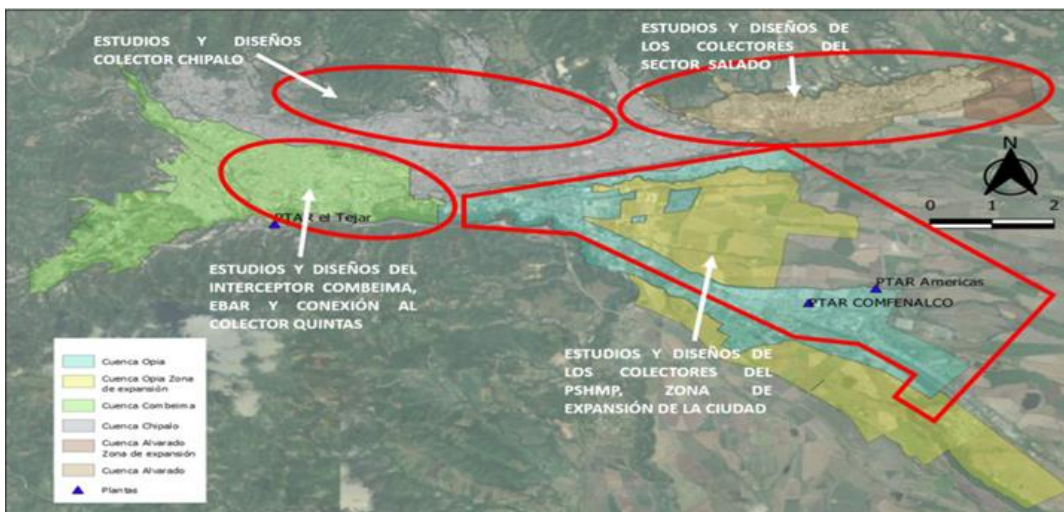
oxígeno (DQO)					
Solidos suspendidos totales (SST)	mg/L	250-300	90.00		Alta presencia de sedimentos y materia particulada.
Potencial de hidrogeno (PH)	unidades	6.5-7.8	6.00-9.00		Rango óptimo para procesos anaerobios (UASB)
Grasa y aceites	mg/L	40 -60	20.00		Requiere pretratamiento (desengrasado)
temperatura	$^{\circ}C$	20-24	≤ 40		Temperatura ideal para actividad metanogénica
Coliformes termo tolerantes	NMP/100ml	$10^7 - 10^8$	Según uso del suelo		Requiere etapas de desinfección final.

Nota. esta tabla se elabora con el fin de dar a comprender todos los entes contaminantes que el agua residual tiene después de su uso en distintas actividades sociales e industriales.

Identificación de la población beneficiada del Proyecto De La Planta De

Figura 3

Formas y descripción de las PTAR



Fuente. empresa de acueducto y alcantarillado de Ibagué IBAL

Nota. En esta imagen se recalca en las zonas donde se han implementado plantas pequeñas para el tratamiento de las aguas residuales de estas zonas.

Población beneficiada por el proyecto PTAR de Ibagué.

- Número de habitantes de la ciudad de Ibagué aproximadamente 550.000 personas (DANE 2023, proyección).
- Beneficios: reciben agua más limpia en ríos y quebradas que atraviesan la ciudad, menor exposición a enfermedades por aguas contaminadas.

comunidades rurales cercanas a las fuentes hídricas.

- Habitantes de veredas cercanas al río Combeima, río chípalo y quebradas afluentes.

- Beneficios: reducción de contaminación de aguas usadas para riegos, recreación o consumo indirecto.

Sector productivos e industriales

- Empresas de alimentos, textiles, curtiembres y otros que generan aguas residuales.
- Beneficios: acceso a un sistema de tratamiento eficiente que les permite cumplir la resolución 0631 de 2015, evitando sanciones y costos mayores.

Agricultores y sector agropecuario

- Agricultores que podrían aprovechar los lodos estabilizados como abono orgánico y un agua apta para el riego.
- Beneficios: acceso a fertilizantes alternativos y reducción de contaminación en riego agrícola.

Instituciones educativas y de salud.

- Escuelas, universidades, hospitales, centros de salud que se benefician de un ambiente más sano y seguro.
- Beneficio: menos enfermedades gastrointestinales y de origen hídrico.

El ecosistema y la sociedad en general

- La fauna acuática de los ríos y quebradas que habitan, animales que habitan sus alrededores.
- El turismo ecológico en zonas como en el cañón del Combeima y otros lugares de bastante concurridos por turista locales y de otras ciudades.

Opinión de la comunidad urbana y rural de la implementación de una Planta De Tratamiento De Aguas Residuales (PTAR)

¿En su opinión, cuál es el principal problema ambiental relacionado con las aguas residuales en Ibagué?

- El mal uso y tratamiento de las aguas residuales de las empresas en especial las textiles
- Mal manejo de las aguas residuales
- La contaminación y los malos olores que generan los vertederos de aguas residuales.
- El problema es la contaminación, entiéndase esto por los residuos que botan en barrios, la falta de cuidado por las aguas, la ignorancia de las personas, la indigencia. Aparte de todo el resultado de las aguas residuales es enfermedades, malos olores, inseguridad.
- El mal manejo que han tenido con las aguas residuales.
- La falta de una buena organización para que allá una planta cómo tal de tratamiento.
- La falta de una buena organización para que allá una planta cómo tal de tratamiento.

¿Qué expectativas tendría frente a la implementación de una PTAR en la ciudad?

- Reducir la contaminación de los recursos hídricos.
- Disminución de contaminación y ayuda a fuentes de empleo.
- Mejoramiento en la calidad del agua.
- Sería bueno porque se acabaría un poco esa problemática de contaminación.

- Esperaría qué si se implementa un sistema de plantas de tratamiento para estas aguas, se debería mejorar el estado general de los ríos que pasan por la ciudad, de los olores que algunas personas tienen que soportar día a día, y de la posibilidad de tener una mejor cultura.

- Con esta implementación se mejoraría la salud y el medio ambiente.
- Mejorar la salud y la falta de agua en varias zonas de la ciudad.
- Espero que la PTAR contribuya a mejorar la calidad del agua de los afluentes, reduzca los riesgos de enfermedades asociadas a la contaminación, mejore el entorno ambiental y promueva un desarrollo sostenible para la ciudad.

¿Qué recomendaciones daría para que el proyecto tenga éxito y beneficie a la comunidad?

- Que no lo haga un político actual.
- Nuestra clase dirigente es corrupta y ladrona. Hay que purgar a esa gente.
- Educar y hacer consiente a la comunidad de la importancia y necesidad de este proyecto.

- Transparencia y legalidad.
- Que tengan en cuenta está propuesta sería una buena opción para esta problemática que tenemos en algunos sectores con estas aguas negras que generan malos olores.

- Diría que para que esto funcione no solo basta con tratar las aguas, se necesita generar mayor conciencia a la comunidad sobre el desuso de las aguas. Adicional a esto pues siendo realista una sola planta de tratamiento no serviría de nada, se necesitarían varias a lo largo de la ciudad, pues he visto que el río Chípalo se contaminación un montón en el kilómetro que dura el barrio san Antonio, uno mira ese mismo río más arriba por el barrio Sorrento y no tiene ese nivel de contaminación.

- Que todos apoyemos el proyecto ya que nos beneficiaría no solo en nuestro presente sino a un futuro.
- Apoyar con el IBAL la propuesta que es la nos beneficia a todos
- Recomiendo una adecuada planeación y ejecución del proyecto, garantizar el mantenimiento constante de la planta, capacitar al personal encargado, incluir campañas de educación ambiental para la ciudadanía y asegurar la transparencia en la gestión de recursos, de manera que toda nuestra comunidad se vea beneficiada.

Protocolo de entrevista de actores claves entre la comunidad

Objetivo: identificar la percepción ciudadana sobre el vertimiento de aguas residuales de Ibagué.

- ¿cómo percibe usted la calidad del agua de los ríos y quebradas en su sector?
- ¿Qué impacto considera usted que tendría la construcción de una PTAR en la salud de la comunidad?
- ¿Estaría usted dispuesto apoyar la gestión de proyecto mediante campaña de educación ambiental?

Tras el proceso de entrevistas realizado a 15 habitantes y 7 líderes comunales de diferentes sectores de la ciudad, se realizó un análisis del contenido cualitativo. Los hallazgos principales evidencian una alta preocupación por la degradación de las fuentes hídricas que hay entre la ciudad, confirmando que la población percibe el vertimiento directo como el principal riesgo para la salud pública. En cuanto a la viabilidad social, se identificó un respaldo unánime a la implementación de una PTAR, condicionado a la transparencia en la gestión de costos operativos por parte de IBAL, lo que valida la dimensión social del estudio de factibilidad del proyecto.

Conclusión: se logró diagnosticar la situación crítica del saneamiento de en Ibagué, determinado que el vertimiento de 27.2 toneladas diarias de carga orgánica (DBO) a él río Combeima y quebradas de la ciudad, representan un riesgo sanitario y ambiental inminente. El análisis demográfico permitió proyectar una demanda de tratamiento para más de 730.000 habitantes al año 2050, validando la urgencia de una infraestructura centralizada de gran escala.

Desarrollo de la fase 2: Selección tecnológica

Una vez consolidado el diagnóstico situacional en la fase anterior donde los registros históricos del IBAL evidenciaron una carga orgánica significativa ([DBO] _5 promedio de 300mg/L y SST de 280 mg/L), se determinó una población proyectada de 734,682 habitantes y una carga contaminante de 27.2 toneladas diarias de DBO, se cuenta con los parámetros técnicos del diseño necesarios. Con base en estos datos de demanda hídrica y caracterizaciones de los afluentes, se procede en esta fase a evaluar y seleccionar la alternativa tecnológica idónea de tratamiento que mejor se adapte a dichas condiciones mediante un análisis multicriterio. Para la ingeniería industrial, esta decisión no solo se debe garantizar la eficiencia técnica de remoción de contaminantes, sino que debe asegurar la sostenibilidad económica a largo plazo.

Los datos obtenidos muestran una temperatura de promedio de 22°C y una alta biodegradabilidad del agua residual de Ibagué, factores que favorecen técnica y financieramente el uso de procesos anaerobios. En este sentido la selección tecnológica se centrará en optimizar el balance entre la inversión inicial (CAPEX) y fundamentalmente, los costos de operación y mantenimiento (OPEX), priorizando aquellas alternativas que permitan la valorización de subproductos (Biogás y lodos) para convertir la PTAR en unidad de negocio autosostenible.

Se evaluaron 3 alternativas tecnológicas validadas para el tratamiento de aguas residuales urbanas en Colombia:

- Alternativa A: lodos activados (aireación extendida). Tecnología convencional de alta eficiencia, requiere menor área, pero tiene un alto consumo energético (alto OPEX).
- Alternativa B: reactor de UASB + filtros percoladores. Sistema anaerobio seguido de aerobio, tiene la ventaja de bajo consumo energético y producción de biogás, ideal para la optimización de costos.

- Alternativa C: lagunas de estabilización. Sistema natural de bajo costo mantenimiento, pero requiere extensiones de tierra muy grandes, lo cual es una limitante en zonas urbanas.

Tabla 3

Criterios de selección de las diferentes alternativas

Criterios de Selección	Peso (%)	Alt. A: Lodos Activados		Alt. B: UASB + Filtros		Alt. C: Lagunas		
		(Importancia)	Puntaje (1-5)	Total, Ponderado	Puntaje (1-5)	Total, Ponderado	Puntaje (1-5)	Total, Ponderado
Eficiencia (Remoción DBO/DQO)	30%		5 (Excelente)	1.50	4 (Buena)	1.20	3 (Regular)	0.90
Costos Operativos (OPEX)	25%		2 (Costoso)	0.50	4 (Bajo)	1.00	5 (Muy Bajo)	1.25
Requerimiento de Área (m²)	20%		5 (Compacto)	1.00	4 (Medio)	0.80	1 (Enorme)	0.20
Costos de Construcción (CAPEX)	15%		3 (Medio)	0.45	3 (Medio)	0.45	4 (Bajo)	0.60
Generación de Lodos	10%		2 (Alta)	0.20	4 (Baja)	0.40	5 (Mínima)	0.50

PUNTAJE TOTAL	3.65	3.85	3.45
FINAL:		(GANADOR)	

Nota. En esta tabla se hace la descripción y la elección de las diferentes alternativas que hay para implementar en este proyecto, de tal manera justificando la más adecuada y eficiente en el proceso y la más rentable.

Tras aplicar la matriz de selección AHP, la alternativa B (sistema combinado UASB+ filtros de percoladores) obtuvo el mayor puntaje ponderado (3.85), posicionándose como la acción más viable para ciudad de Ibagué.

Justificación técnica y económica:

Eficiencia frente a costos (desde lo industrial)

aunque los lodos activados (ALT.A) posee una eficiencia rápidamente superior, su alto costo energético (aireación por medio de ventilación artificial) esto hace que el COPEX sea castigado severamente. El sistema seleccionado ofrece una remoción de carga contaminante superior a 85% (cumpliendo la RES:0631) pero con un costo operativo estimado en un 40% menor, dado que el proceso anaeróbico no requiere oxígeno inyectado.

Restricción de espacios

la alternativa C (lagunas de filtración) aunque parece ser económicas, fue descartada por su bajo puntaje en el criterio de “requerimiento de área”. Ibagué, al ser una ciudad intermedia en expansión, no dispone de grandes extensiones de tierra plana para la construcción de las lagunas, haciendo que el sistema UASB (compacto y vertical) sea más acto urbanísticamente.

Valoración de residuos

el sistema seleccionado produce biogás como subproducto, abriendo la posibilidad futura de cogeneración eléctrica, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y económica circular planteados en la justificación del proyecto.

Tabla 4*Evaluación de alternativas de OPEX y CAPEX*

criterio	Peso	Alt. A: lodos	Alt. B: UASB	Alt. C: lagunas
		activados	más filtros	
Eficiencia	0.30	5 (1.50)	4 (1.20)	3 (0.90)
OPEX	0.25	2 (0.50)	4 (1.00)	5 (1.25)
Area	0.20	5 (1.00)	4 (0.80)	1 (0.20)
CAPEX	0.15	3 (0.45)	3 (0.45)	4 (0.60)
Sostenibilidad	0.10	2 (0.20)	5 (0.50)	3 (0.30)
Puntaje total	1.00	3.65	3.95	3.25

Nota. Este cuadro se evalúa de manera muy específica la eficiencia de cada una de las alternativas y sus óptimos rendimientos en los recursos y procesos

Matriz de evaluación de alternativas.

Evaluamos las tres alternativas que se proponen para el estudio. Tras la aplicación de la matriz, la alternativa B (Reactor UASB más filtros percoladores) resulta ser la más viable para el proyecto con un puntaje de 3.95. el factor determinante fue la optimización del OPEX, ya que esta tecnología requiere un menor consumo de energía eléctrica en comparación con los lodos activas y además permite la producción de Biogás.

Aunque la inversión inicial (CAPEX) es igual a la de la alternativa A el potencial de la alternativa B para funcionar como una planta sostenible (la recuperación de energía eléctrica y los lodos para la agricultura como abono orgánico) esto nos permita que la planta no solo sea un gasto municipal, sino una unidad productiva autosostenible alineada con los principios de la economía circular.

Conclusión

mediante la aplicación de la matriz selección multicriterio AHP, se concluye que el sistema combinado de reactores UASB y filtros percoladores es la alternativa más eficiente para el municipio. Esta tecnología equilibra una remoción de contaminantes superior a 80% con un costo operativo (OPEX) reducido, superando a los sistemas convencionales de lodos en términos de sostenibilidad financiera para el operador IBAL.

Desarrollo de la fase 3: Diseño e ingeniería

Diseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la fase anterior, donde la tecnología de reactores UASB con filtros percoladores fue seleccionada como la alternativa más viable técnica y económicamente, se procede al desarrollo del diseño conceptual. En esta etapa se definirá la distribución en la planta (layout), el dimensionamiento de las unidades y la logística de transporte de fluidos necesaria para materializar la solución tecnológica elegida

Esquema general de la planta

- Entrada de aguas residuales (colector principal)
- Línea de tratamientos

Pretratamiento (rejillas, desarenador, des engrasador)

Tratamiento primario (tanque de sedimentación)

Tratamiento secundario (reactor biológico de lodos activados o UASB “Upflow Anarobic Sludge Blankt – Reactor Anaerobia de Flujo Ascendente”).

Tratamiento terciario (filtros de arena, desinfección UV “desinfección ultravioleta” /cloro).

- Salida de agua tratada al río o reutilización agrícola.
- Línea de lodos: espesador, digestor y el manejo de lodos.

Flujograma del proceso.

Figura 4

Diagrama de flujo de los procesos



Nota. Se hace una descripción del contenido de la tabla en cuestión de lo que se esté exponiendo dentro de esta. Cuando la figura es de elaboración propia no es necesario agregar ningún tipo de declaración de derechos de autor. En APA se asume que todo lo que no tenga cita (o la declaración de derechos de autor) es de autoría del propio autor.

Tabla 5*La valoración de las alternativas*

Código	Area A	Area B	valor	Justificación
R1	pretratamiento	Reactores UASB	A	Flujo continuo de agua (evitar bombeos innecesarios).
R2	Reactores UASB	Línea de lodos	A	El lodo extraído debe ir directo al tratamiento de secado.
R3	Reactores UASB	Cogeneración	A	Minimiza tuberías de transporte de biogás, (seguridad).
R4	Filtros	Desinfección	E	Paso final del flujo de agua antes del vertedero.
R5	administración	Pretratamiento	X	No deseable: olores y ruidos molesto para el personal
R6	laboratorio	Desinfección	I	Facilidad para tomar muestras del afluyente final.

Nota. Se hace una descripción del contenido de la tabla en cuestión de lo que se esté exponiendo dentro de esta, para referenciar la tabla se puede tomar el ejemplo de la figura que esta ubicada en este documento.

Nota: A (absolutamente necesario), E (especialmente importante), I (importante), X (no deseable).

Distribución en planta (vista superior simplificada).

Previa a la definición del esquema de distribución de áreas (layout) de la planta de tratamiento de aguas residuales, se presenta la consolidación de los criterios técnicos que fundamentan la ingeniería del proyecto. El diseño se basa en una capacidad nominal de tratamiento de 1,190.5 litros por segundo, dimensionada para atender a una población proyectada de 734, 682 habitantes bajo un horizonte de diseño de 25 años.

El emplazamiento físico en el sector sur Occidente de Ibagué responde a un análisis topográfico detallado que garantiza el flujo por gravedad. Los estudios geotécnicos preliminares de la zona sugieren suelos con predominio de estratos arcillosos, el cual ha determinado el uso de estructuras de concreto reforzado con recubrimiento epóxidos para prevenir la corrosión química. En cumplimiento de la resolución 0631 de 2025, el proceso se configurado para garantizar una remoción mínima de 80% de la carga de DBO y SST, la cual se estima inicialmente en 27.2 toneladas diarias.

Desde la perspectiva de la gestión operativa, el proyecto integra el uso de maquinaria de alta eficiencia y tuberías GRP de 1,500 mm con una vida útil de superior a los 50 años. Finalmente, para asegurar la sostenibilidad financiera y operativa, el layout contempla un diseño modular escalable que reserva áreas específicas para las futuras ampliaciones, permitiendo que la PTAR evolucione conforme a la dinámica demográfica y económica de la ciudad de Ibagué.

Dimensionamiento de áreas operativas.

- Area de tratamiento biológico (UASB): se proyecta una batería de 10 módulos de 400m² cada uno, ocupando un área núcleo de 4000m².
- Area de pulimiento (filtros): 4 unidades circulares de 35m de diámetro cada una.

- Area de Bifactorial (lodos y energías): se reserva 5.500 m² para deshidratación de lodos y la planta de cogeneración por biogás.

- Area total de lote: 15 hectáreas (incluyendo la zona de expansión y buffer ambiental)

Capacidad y población.

- Población base: 545,210 habitantes.
- Población proyectada: 734,682 habitantes (2050.)
- Horizonte de diseño: 25- 30 años.
- Cobertura: 100% de la cabecera municipal.

Emplazamiento y geotecnia.

- Sur oriente (vía planta caracolito Cemex).
- Topografía: pendiente moderada (2-5%).
- Suelo: predominio de arcilla expansivas (requiere sedimentación profunda).
- Clima: cálido seco (favorece procesos biológicos).

Marco normativo.

- Vertimientos: resolución 0631 de 2015.
- Criterios técnicos: RAS2017(Res.0330).
- Leyes: Ley 99 de 1993 y Dec. 3930.
- Local: PSMV Ibagué el IBAL E.S.P.

Especificaciones técnicas.

- Materiales: tubería GRP, tanque de concreto inoxidable.
- Vida útil: equipos (15 años), obra civil (mas 50 años).
- Insumos: cloro (gas) polímeros para lodos.

- Personal: 25 a 30 operarios (turnos 24/7).

Parámetros del diseño.

- Caudal medio (Qmd): ~1,190 l/s.
- Carga DBO5: 27,260kg/día.
- Carga SST: 27,260kg/día.
- pH esperado: 6.5- 8.5 (rango domestico)

mantenimiento y futuro.

- Complejidad: media (sistema UASB simplifica operación).
- Previsión: 30% de área reservada para fase 2.
- Sostenibilidad: paneles solares y biogás.
- Viabilidad: financiamiento mixto Nacional- ciudad

Importancia De Los Aspectos De La Construcción De Una Planta De Tratamiento De Aguas Residuales (PTAR)

La globalización ha generado una transformación significativa en la forma en que las sociedades interactúan, comparten información y desarrollan sus economías. Esta interconexión ha traído consigo múltiples beneficios, como el acceso a nuevas tecnologías y mercados, pero también ha planteado desafíos importantes en términos de identidad cultural, sostenibilidad y equidad. Comprender estos efectos resulta clave para formular estrategias que permitan un desarrollo más equilibrado y justo.

Aspectos técnicos y de ingeniería.

- Garantizan que la planta se diseñe y construya con capacidad suficiente para el caudal actual y futuro de aguas residuales generadas durante y después.
- Selección adecuada de procesos (pretratamiento, primario, secundario y terciario) para cumplir con las normas de calidad del agua.
- Uso de materiales y equipos resistentes a la corrosión, humedad y químicos.

Importancia: asegurar unos tratamientos adecuado en cada proceso para tener un eficiente y duradero en sistema.

Aspectos ambientales

- Evitar la contaminación de los ríos y fuentes hídricas.
- Contribuye a la conservación de ecosistemas (flora y la fauna acuática)
- Reducir la emisión de olores, vectores y contaminación del suelo por lodos.
- Contribuye a una agricultura sana y sostenible para el medio ambiente.

Importancia: proteger el medio ambiente y la salud pública generando una mejor calidad de vida en la ciudad y la zona urbana de su alrededor.

Aspectos económicos

- Inversión inicial alta, pero con beneficios a largo plazo: agua más limpia, menos enfermedades, cumplimiento
- Posibilidad de aprovechamiento de subproductos (biogás, lodos estabilizados para abono) lo cual nos permite el aprovechamiento de estos productos y obtener un ingreso económico adicional.
- Optimización de costos operativos tecnologías eficientes y energías renovables.

Mediante

Importancia: garantiza la sostenibilidad financiera del sistema.

Aspectos sociales

- Mejora la calidad de vida de la población (menos enfermedades por agua contaminada).
- Mejora la calidad de vida de la población (menos enfermedades por agua contaminada).
- Posibilita programas de educación ambiental y participación ciudadana.

Posibilita programas de educación ambiental y participación ciudadana.

Aspectos legales y normativos

- Cumplimiento de la resolución 0631 de 2015 (vertimientos puntuales).
- Alineación con el plan de saneamiento y manejo de vertimientos (PSMV).
- Evita sanciones ambientales y económicas.

Importancia: asegura que la planta opere dentro de marco legal según lo constituye la constitución colombiana.

Aspectos de operación y mantenimiento

- Capacitación del personal para operar y mantener los equipos en perfecto funcionamiento.
- Diseño que facilite la limpieza, acceso y seguridad en cada uno de los procesos.
- Plan de mantenimiento preventivo para evitar fallas en la actividad laboral.

Importancia: extiende la vida útil de la planta por más o menos entre 20 y 30 años de funcionamiento en los procesos de recuperación de las aguas residuales.

La distribución lograda mediante el SLP no solo optimiza el espacio, sino que reduce el OPEX (gastos operativos) al permitir que el 90 % del transporte de fluidos internos se realice por gravedad y que la captura de biogás sea inmediata a la fuente de generación, cumpliendo con el objetivo de ser una planta auto sostenible.

Tabla 6*Crecimiento poblacional y del agua residual.*

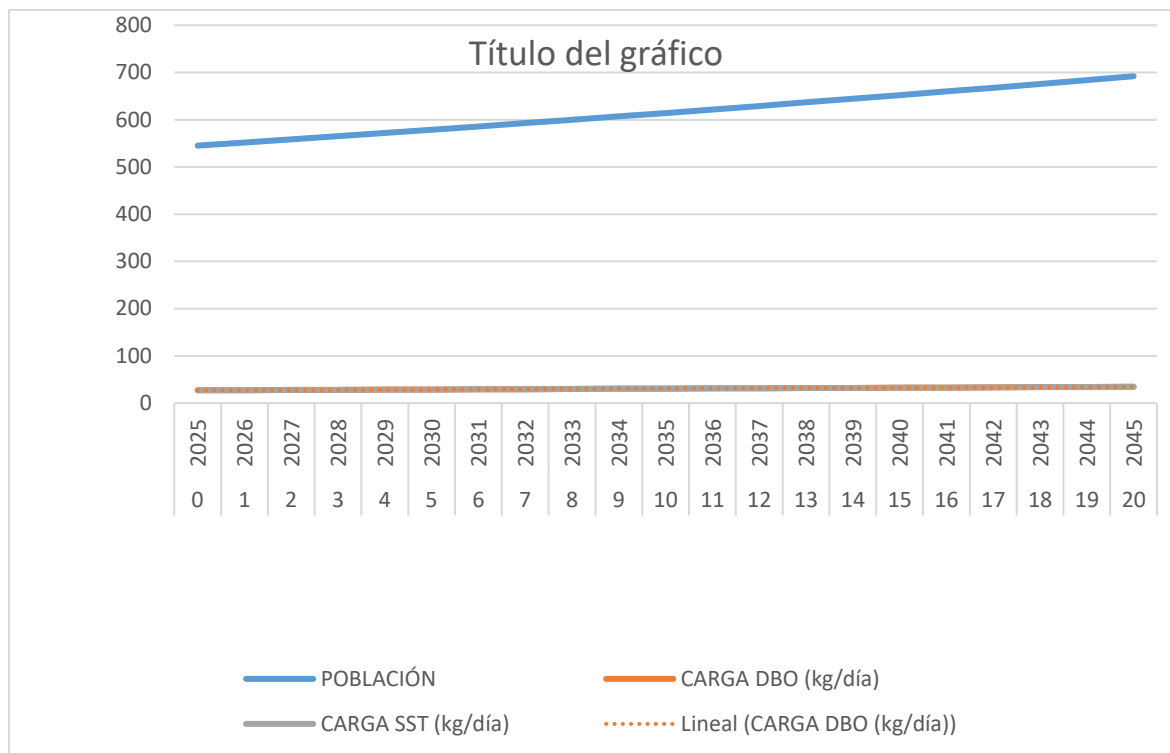
PARÁMETROS DE DISEÑO (RAS 2017)				
Población Actual	545,21	<i>Dato DANE</i>		
(Hab):				
Tasa Crecimiento	1,20%	<i>Estimado anual</i>		
(%):				
Aporte DBO	50	Aporte SST	50	
(gr/hab):		(gr/hab):		
AÑO	AÑO	POBLACIÓN	CARGA	CARGA
PROYECCIÓN	CALENDARIO		DBO	SST
			(kg/día)	(kg/día)
0	2025	545,21	27,26050	27,26050
1	2026	551,7525	27,58763	27,58763
2	2027	558,3736	27,91868	27,91868
3	2028	565,0740	28,25370	28,25370
4	2029	571,8549	28,59275	28,59275
5	2030	578,7172	28,93586	28,93586
6	2031	585,6618	29,28309	29,28309
7	2032	592,6897	29,63449	29,63449
8	2033	599,8020	29,99010	29,99010
9	2034	606,9996	30,34998	30,34998
10	2035	614,2836	30,71418	30,71418

11	2036	621,6550	31,08275	31,08275
12	2037	629,1149	31,45574	31,45574
13	2038	636,6643	31,83321	31,83321
14	2039	644,3042	32,21521	32,21521
15	2040	652,0359	32,60179	32,60179
16	2041	659,8603	32,99302	32,99302
17	2042	667,7786	33,38893	33,38893
18	2043	675,7920	33,78960	33,78960
19	2044	683,9015	34,19507	34,19507
20	2045	692,1083	34,60542	34,60542
Criterio de distribución		Metodología SLP (systematic layout planing)		
Eficiencia del espacio		Alta (configuración modular UASB)		

Nota. En este cuadro se realiza un análisis del crecimiento de la población durante los próximos 20 años y a si la contaminación del agua.

Figura 5

Diagrama de crecimiento de población y contaminación.

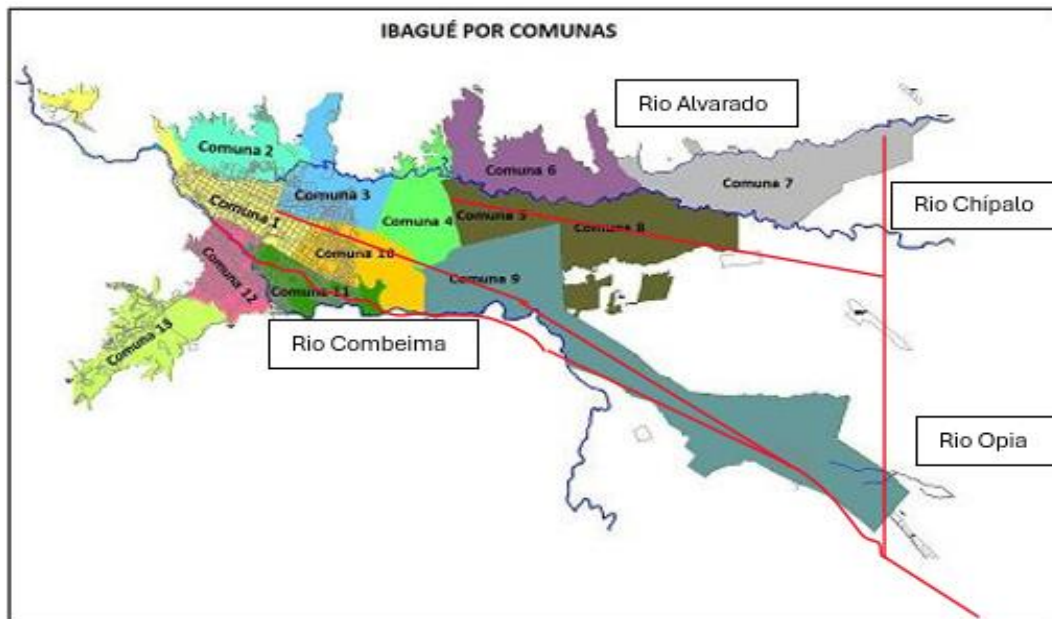


Fuente. De autoría propia.

Nota. Por medio de esta grafica se puede visualizar los crecimientos que sedan basándonos en el crecimiento de la población de Ibagué en cada año.

Figura 6

Mapa de Ibagué con sus comunas y las líneas de alcantarillado del proyecto



Fuente. archivos del IBAL

Nota. En este mapa se recalca como puede ser las líneas recolectoras de las aguas residuales de Ibagué en su totalidad.

Definición de la localización de la planta y alcance

Se plantea que la ubicación de la PTAR por motivos visionarios a largo plazo y por razones de estudio se seleccionó el sector hacia la planta de Cemex “caracolito”.

- Gravedad a favor: la zona hacia caracolito/Cemex (sur oriente de Ibagué) está en una cota de nivel más baja. Esto significa que toda el agua residual de la ciudad puede bajar hasta este sitio por gravedad, ahorrando miles de millones de pesos en bombeo (eficiencia energética).
- Zona de expansión: hacia allá (Picalaña) es hacia donde está creciendo la industria y la vivienda de Ibagué. Ubicar en este sitio de la ciudad anticipa el futuro.

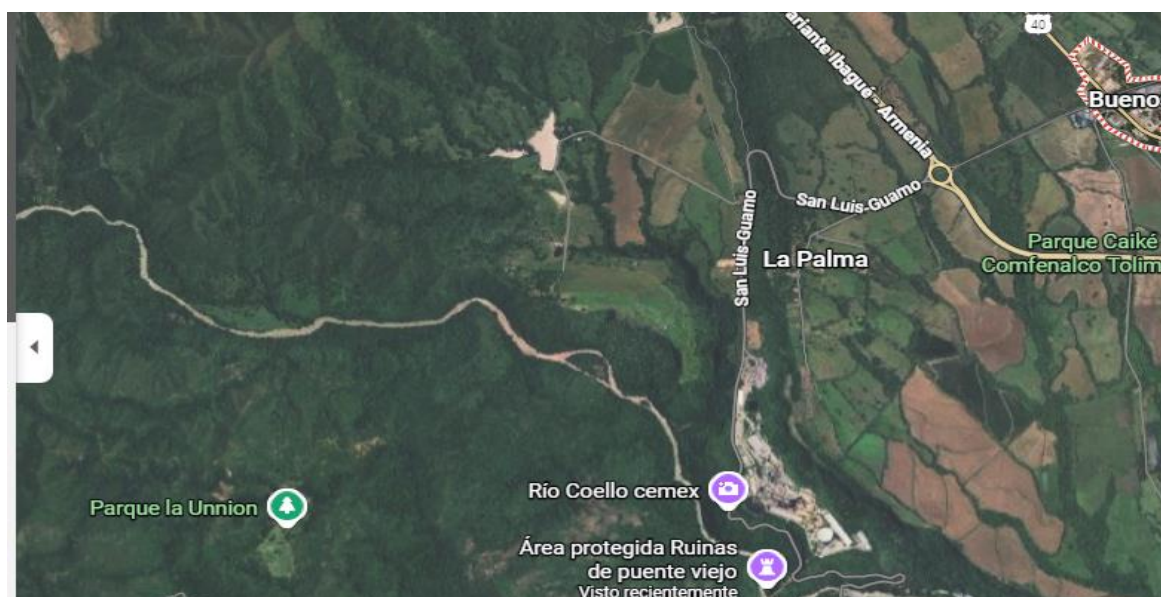
- Alejamiento urbano: Al estar hacia la salida de la ciudad, minimiza el impacto de olores en el centro urbano denso de la ciudad.

Macro localización estratégica: sector industrial sur oriente

Basándonos en criterios de ingeniería hidráulica y ordenamiento territorial, se ha determinado que la ubicación óptima para implantación de la PTAR centralizada en Ibagué corresponde al corredor sur oriente de la ciudad, en la zona de influencia de la vía hacia el corregimiento de Buenos Aires y la planta de caracolito (CEMEX).

Figura 7

Vista panorámica de la ubicación de la PTAR



Fuente. Google MAP

Nota. En esta imagen se puede localizar la ubicación donde estaría la PTAR de Ibagué.

Esta decisión obedece a un análisis de costo y eficiencia fundamentado en:

Figura 8

Trayecto de la línea de alcantarillado



Fuente. Google MAP

Nota. En esta imagen se traza un trayecto de 18 km desde el centro de Ibagué hasta la PTAE

Cumplimiento del marco normativo de RAS-2017

Bajo el enfoque de la economía circular y la visión de la ingeniería industrial, la PTAR de Ibagué trasciende su función tradicional de saneamiento para convertirse en una unidad de negocio productiva. El uso de reactor UASB (alternativa B) permite la captura y valorización de subproductos que transforman un flujo de residuos en activos

Aprovechamiento de los subproductos: la PTAR como unidad de negocio circular.

Bajo el enfoque de la economía circular y la visión de la ingeniería industrial, la PTAR de Ibagué trasciende su función tradicional de saneamiento para convertirse en una unidad de negocio productiva. El uso de reactor UASB (alternativa B) permite la captura y valorización de subproductos que transforman un flujo de residuos en activos.

Valorización energética (biogás)

- Proceso: el tratamiento anaerobio en el reactor UASB genera biogás con una alta concentración de metano (CH_4).
- Aprovechamiento: este gas será capturado y conducido a un sistema de microturbinas o motores de combustión interna para la generación de energía eléctrica.
- Impacto industrial: la energía producida se utilizará para cubrir la demanda de iluminación, sistema de control de equipos de deshidratación de la planta, reduciendo el OPEX por concepto de servicios públicos en un 30% a 40%

Valorización agrícola (lodos y biosólidos)

- Proceso: los lodos purgados del reactor UASB ya cuentan con un proceso de digestión previa, lo que facilita su estabilización.
- Aprovechamiento: mediante un proceso de compostaje aeróbico, los lodos se transforman en una enmienda orgánica (acabado) de alta calidad.
- Impacto industrial: Ibagué, al tener una vocación agrícola fuerte, representa un mercado natural para este subproducto. La comercialización del abono genera ingresos operativos directos y elimina el costo de disposición final en rellenos sanitarios, convirtiéndola en un gasto en una fuente de ingresos.

Conclusión

la localización estratégica en el sector sur oriental de la ciudad (zona de Caracolito Cemex) permite la recolección del 100% de las aguas residuales mediante un interceptor de 18.5 kilómetros funcionando por gravedad. El uso de tubería de gran diámetro en GRP (1,500mm) garantiza una vida útil superior a 50 años y minimiza pérdidas hidráulicas, reduciendo la necesidad de estaciones de bombeo de alto costo energético.

La integración de paneles solares en cubiertas y el aprovechamiento del biogás para la cogeneración eléctrica dota al proyecto de una ventaja competitiva de ingeniería industrial. Este modelo de autosuficiencia energética mitiga la dependencia de la red eléctrica comercial y asegura la operatividad interrumpida de la planta, alineando a Ibagué con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS 6,7 y 13)

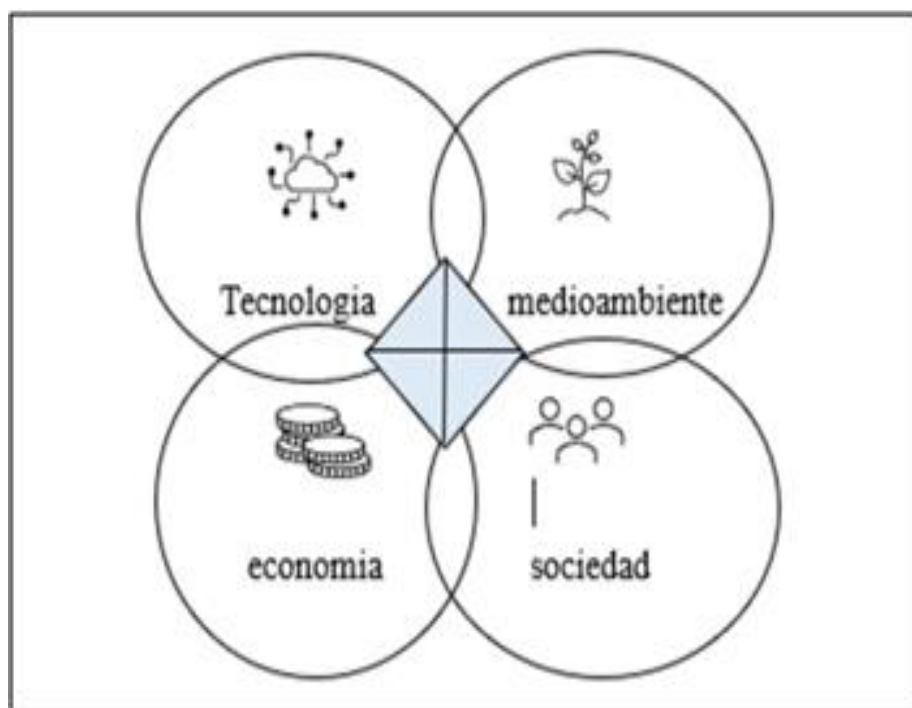
Desarrollo de la fase 4: Estudio de factibilidad

A partir del diseño conceptual y la identificación de la infraestructura, maquinaria, y requerimientos logísticos detallados en la fase previa, se procede a realizar la evaluación de la viabilidad integral. Los planos y especificaciones técnicas definidas anteriormente sirven como insumo principal de para cuantificar la inversión requerida (CAPEX), y determinar la rentabilidad financiera y social del proyecto para la ciudad de Ibagué.

Matriz de coherencia de factibilidad

Figura 9

Matriz de coherencia de factibilidad



Fuente. De autoría propia

Nota. En esta imagen se puede describir como funcionaria la economía circular en este proyecto.

. Vinculo técnico y económico

la selección de la tubería GRP y la tecnología UASB minimizan el OPEX (costo operativo). Al eliminar estaciones de bombeo mediante el flujo gravitacional hacia Picalaña, el proyecto garantiza que la inversión inicial (CAPEX) sea recuperada mediante ahorros energéticos permanentes.

Figura 10

Tuberías de alcantarillado de calidad y calibre



Fuente. empresa PAVCO de Colombia

Nota. En las imágenes anteriores se puede ver la forma como se debe de instalar la tubería y la clase de tubería para este proyecto.

Vinculo ambiental y operativo: I

la innovación en paneles solares y biogás convierte a la planta en una empresa autónoma. Operativamente, esto reduce la dependencia de la red eléctrica externa, asegurando que el tratamiento nunca se detenga por falta de pago de servicios, protegiendo los ríos y las quebradas de la zona.

Vínculo territorial y social:

ubicada en la zona de expansión industrial, la planta se alinea con el POT de Ibagué. Esto evita conflictos por olores en zonas residenciales y valoriza los suelos del sur oriente, promoviendo el bienestar de las comunidades vulnerables mediante saneamiento básico real.

Vínculo Normativo y financiero:

Es la integración de los requisitos legales y técnicas vigentes en Colombia con la estructura de costos y beneficios del proyecto. Este vínculo establece que el cumplimiento de los estándares ambientales (como la Resolución 0631 de 2015) es el motor para los incentivos económicos, exenciones tributarias (como las de la ley 1715 de 2014) y la generación de ingresos a través de la economía circular. En este sentido la norma valida la viabilidad técnica, mientras que su aprovechamiento estratégico asegura la viabilidad financiera, transformando las obligaciones regulatorias en ventajas de competitivas y ahorros operativos (OPEX).

Análisis de factibilidad financiera y flujo de caja

Para alcanzar la robustez financiera de la PTAR de Ibagué, se realizó un análisis de sensibilidad sobre las variables críticas que podría afectar la Tasa Interna de Retorno (TIR) el Valor Actual Neto (VAN). A diferencia de una planta convencional, este diseño basado en la alternativa B (UASB más filtros) utiliza la economía para mitigar riesgos.

Escenario 1: incremento del 15% en el costo de la energía eléctrica

En un proyecto tradicional, un alza en la tarifa de energía aumentaría drásticamente el OPEX, poniendo en riesgo la viabilidad. Sin embargo, para este proyecto el impacto se considera bajo debido a:

- Autogeneración de biogás: el reactor UASB permite capturar metano para cogeneración, cubriendo una parte significativa de la demanda interna.

- Integración de paneles solares: la inclusión de un sistema fotovoltaico en las áreas administrativas y de control reduce la dependencia de la red comercial eléctrica.
- Resultados: ante un aumento del 15% en el costo del KWh, el flujo de caja se mantiene estable, ya que la planta produce más del 40% de su propia energía, protegiendo los recursos de la ciudad.

Escenario 2: crecimiento poblacional superior al proyectado (+10%)

Si la población de Ibagué crece más rápido de lo previsto por el DANE, la carga orgánica recibida será mayor. Bajo una revisión de “Unidad de Negocio”, esto se traduce en una mayor oportunidad operativa.

- Aumento la producción de lodos: un mayor volumen de aguas residuales eso sería una mayor producción de lodos, primarios y secundarios. Esto incrementaría la producción de lodos en la planta de compostaje esto significa que los ingresos aumentarían por la venta de abono orgánico al sector agrícola.
- Mayor protección de biogás: a mayor carga de residuo orgánicos, mayor será la producción de metano, lo que permitiría escalar el sistema de generación eléctrica.
- Resultados: aunque la vida útil de la primera fase se reduciría ligeramente, los ingresos adicionales por la venta de subproductos compensan los costos operativos extras, mejorando la Relación de Beneficios y costos.

Escenario 3: disminución en los precios de los fertilizantes químicos.

Se evaluó que pasaría si el precio de los fertilizantes tradicionales bajase de precios, afectando el compost de la PTAR.

- Estrategia de mitigación: el lodo estabilizado puede seguir siendo utilizado por el municipio para la recuperación de suelos degradados y mantenimiento de zonas verdes propias,

lo que representa un “ahorro por sustitución” de gastos públicos, manteniendo el beneficio social del proyecto.

Conclusión del análisis:

el proyecto demuestra una alta resiliencia financiera. La combinación de energías renovables (solar, biogás) y la valorización de los residuos (lodos) crea un sistema de protección que asegura que la PTAR de Ibagué sea sostenible incluso en escenarios económicos adversos.

Tabla 7

análisis de factibilidad y resiliencia del proyecto a

Viabilidad crítica	cambio	Impacto en la viabilidad	Estrategias de mitigación
Costo de energía	+15%	Bajo	Autogeneración (biogás, paneles solares). Mayor venta de
Población (carga)	+10%	Positivo (ingreso)	lodos (compost) y ahorro energético Uso de gravedad (cero
Mantenimiento	+5%	Controlado	bombas) y materiales GRP (50 años de vida útil)

Nota. En esta tabla se realiza una visualización de cómo la alternativa seleccionada genera una buena implementación de negocio auto sostenible.

Tabla 8

maquinaria y herramienta que se usan en una PTAR

Equipo o Maquina	Función en la RTAR	Vida útil aproximadamente
Rejas de desbaste (manual o mecánica)	Retener solidos grandes como son plásticos, ramas, papeles.	15- 20 años
Tamices rotativos	Su función es la de separar solidos finos que pasan las rejas de desbaste.	8- 12 años
Desarenadores sumergibles o centrifuga	Esta herramienta elimina arena, grava y partículas pesadas	20- 25 años
Bombas sumergibles o centrifugas	La función de esta bomba es la de impulsar el agua residual a diferentes unidades de tratamiento.	10-15 años
Medidores de caudal (flujómetros)	Este dispositivo permite controlar el caudal de entrada y salida	8- 12 años
Sedimentadores primarios (tanques circulares o rectangulares con rastrillos)	Su función es la de separar los sólidos sedimentables (lodos primarios)	25- 30 (estructura) /10-15 años (equipos mecánicos)

Reactores Biológicos (lodos activados, aireadores, difusores)	Su función fundamental es la de reducir la materia orgánica (DBO, DQO) mediante microorganismos.	20-25 años (tanques) /8-12 años (sopladores, difusores)
Filtros biológicos o biofísicos (si aplica)	Son una alternativa de tratamientos biológicos para la remoción de la carga orgánica.	15- 20 años
Sedimentadores secundarios	Esta herramienta tiene la función de separar los lodos biológicos del agua tratada.	25- 30 años (estructura)/10-15 años (mecánicos)
Digestores de lodos (anaeróbicos o aeróbicos)	La función de este dispositivo es la de estabilizar y reducir el volumen de lodos.	20-25 años
Centrifugas/ filtros prensa/ lechos de secado	Es acá donde se deshidrata los lodos antes de su disposición final.	10 – 15 años
Cloradores o sistemas de desinfección UV	En este sistema es donde se eliminan patógenos antes de descargar el agua ya tratada	10 -12 años
Laboratorio de control de calidad (equipos portátiles,	Su función acá es la de medir parámetros como DBO, SST, pH, coliformes.	8 -12 años

espectrofotómetros,

incubadoras)

Sistemas SCADA (software de supervisión y control)	Por medio de un software se supervisa, controla y automatiza el funcionamiento	8 -10 años (actualizable por software)
--	--	--

de PTAR.

Nota. En esta tabla se describe cada uno de los elementos que harán parte de la PTAR y su vida útil y para qué sirve

Herramientas auxiliares

Hay otras herramientas que son muy importantes que permiten ejecutar los procesos o subprocesos estos son equipos de mantenimiento como llaves, gatos hidráulicos, herramientas manuales. Vehículos de servicio como retroexcavadoras, camión cisterna, volqueta (para transporte de lodos. Equipos de seguridad industrial como detectores de gases, EPP (cascos, botas, guantes, arneses, camisas, petos, gafas, tapabocas con filtro para los malos olores)

Se puede decir que la vida útil de los equipos mecánicos suele ser de 8 a 15 años (bombas, sopladores, centrifugadoras). La vida útil de las estructuras civiles (tanques, canales, digestores) puede superar los 25 a 30 años con buen mantenimiento en los tiempos adecuados. En el caso del software y sistemas electrónicos requieren actualización cada 5 a 10 años. Teniendo por comprendido todas las recomendaciones adecuadas se puede garantizar un adecuado proceso en el tratamiento de las aguas residuales y el funcionamiento de cada equipo dando a si la opción de que el talento humano lleve una adecuada actividad laboral dentro y fuera de la planta.

Transformación de la PTAR en una unidad de negocio: enfoque en una economía circular

Tradicionalmente, las plantas de tratamiento se consideran una infraestructura de gasto público. Sin embargo, mediante la implementación de la alternativa B (UASB más filtros), el proyecto de Ibagué se redefine como una planta de producción de recursos a partir de dos corrientes: el biogás y los lodos residuales.

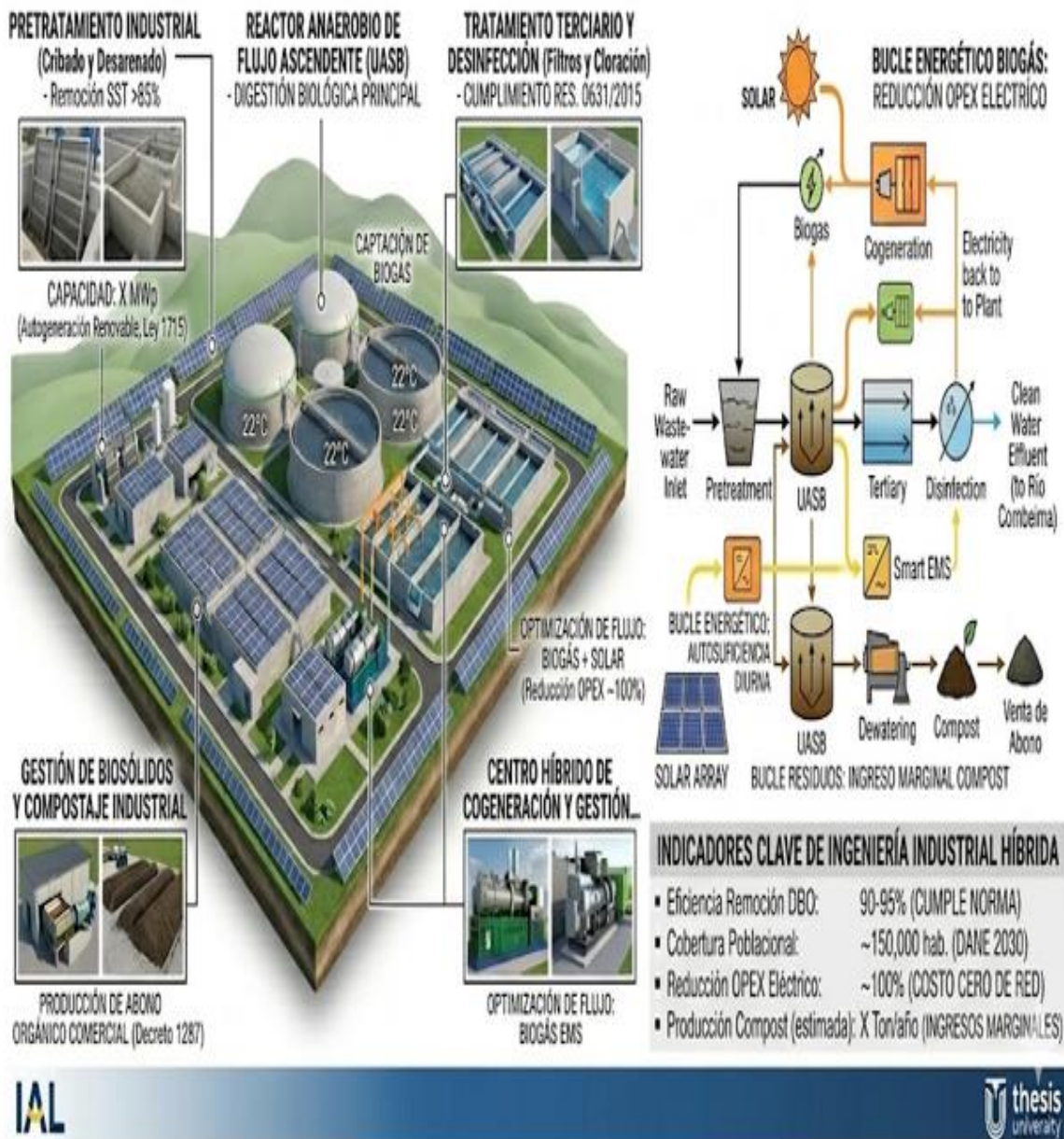
Valorización energética del biogás (reducción de OPEX):

los reactores anaeróbicos de flujo ascendente (UASB) produce gas como subproducto natural de la degradación de la materia orgánica. Este gas, compuesto especialmente por metano (CH₄), representa una oportunidad financiera directa.

- Autogeneración eléctrica: el biogás puede ser filtrado y conducido a microturbinas o motores de combustión interna para generar energía eléctrica y térmica. Esto permitiría cubrir entre el 20% y el 40% del consumo energético de la propia planta (bombas, iluminación, sistemas de control).
- Impacto financiero: al reducir la factura de energía eléctrica (uno de los ítems más costosos del OPEX) se mejora el Valor Actual Neto (VAN) del proyecto, librando recursos presupuestales que el municipio de Ibagué.

Figura 11

Diseño conceptual de la PTAR de Ibagué modelo industrial circular y híbrido



Fuente. Esta imagen se generó con la ayuda de la inteligencia artificial IA Gemini

Nota. esta imagen se puede ver como estaría estructurada la PTAR y su proceso de manera dinámica en la economía circular.

Tabla 9*Ingresos autos sostenibles de la PTAR*

Subproductos	De centro de costos (tradicional)	Unidad de negocio (propuesta)	Impacto en la viabilidad
Biogás	Emisión a la atmosfera (contaminación)	Generación de energía propia y paneleres solares	Reducción de gastos OPEX
Lodos	Pago por transporte y disposición en relleno.	Transformación en compost y venta comercial.	Ingresos marginales.
Aguas tratadas	Vertimiento simple al rio	Potencial de reusó en riegos agrícolas.	Valor social y ambiental.

Nota. En este cuadro se presenta la viabilidad de la alternativa B UASB que nos proporciona un ingreso y una sostenibilidad de la PTAR como negocio circular.

Conclusión

finalmente, el estudio demuestra la viabilidad integral del proyecto bajo un esquema de cofinanciación mixta. La rentabilidad social, refleja en la valorización de los predios y la reducción de enfermedades de origen hídrico, justifica la inversión pública necesaria (CAPEX), mientras que el recaudo tarifario y el ahorro en multas ambientales a segura la salud financiera del proyecto a largo plazo.

Conclusiones

Tras el análisis multidimensional realizado en el presente estudio, se concluye que la implementación de una PTAR para la ciudad de Ibagué bajo el modelo centralizado en el centro de buenos aires sector de caracolito, constituye una solución de alta solidez académica y profesional. La factibilidad del proyecto no se limita a una viabilidad técnica aislada, sino que se sustenta en una articulación sistemática de sus componentes.

Desde el eje técnico ambiental, la adopción de tecnología anaerobia (UASB) y el uso de energías renovables (solar y biogás) posicionan a la planta como una infraestructura resiliente al cambio climático y con baja huella de carbono. Económicamente, el proyecto optimiza el ciclo de vida del activo mediante la selección de materiales de larga duración como el GRP, lo que reduce los costos de mantenimiento y reposición futura.

En el ámbito operativo y territorial, la administración por parte del IBAL E.S.P. asegura el aprovechamiento de las capacidades institucionales existentes, mientras que la localización estratégica en la zona de expansión industrial garantiza la armonía con el crecimiento urbano proyectado. Finalmente, la propuesta se blinda normativamente al garantizar niveles de remoción superiores a los exigidos por la legislación colombiana, asegurando que la inversión pública se traduzca en una mejora tangible de la calidad de vida de los habitantes de Ibagué y en la recuperación definitiva del ecosistema de los ríos y quebradas de la ciudad. Esta visión holística garantiza que el proyecto sea sostenible en el tiempo, financieramente responsable y socialmente transformador.

Recomendaciones

Profundización de estudios de ingeniería de detalle.

Se recomienda a la secretaria de infraestructura y al IBAL E.S.P. proceder con la contratación de la ingeniería de detalle basado en el diseño conceptual aquí propuesto. Es imperativo realizar estudios del suelo (geotecnia) a lo largo de 18.5 Km del trazado del intercepto marginal, con el fin de validar los métodos de excavación y entibado necesarios para la instalación de la tubería GRP, minimizando a si los riesgos de sobre costos por imprevistos geológicos.

Fortalecimiento institucional del operador.

Dada la complejidad de la tecnología de reactores UASB y los sistemas de cogeneración de energía propuestos, se sugiere que el IBAL cree una unidad administrativa y operativa especializada en el tratamiento de aguas residuales. Esta unidad deberá liderar un plan de capacitación técnica para los operarios, centrada en microbiología de procesos anaerobios y gestión de mantenimiento preventivos de equipos electromecánicos de alta eficiencia.

Estrategias de cofinanciación y cierre financiero.

Se recomienda a la alcaldía de Ibagué gestionar de manera inmediata la inclusión del proyecto en el Plan Nacional de Desarrollo y radicar la propuesta ante el ministerio de vivienda, ciudad y territorio. La magnitud del CAPEX requiere de asegurar fuentes de financiación no reembolsables por parte de la nación y CORTOLOMA, de modo que el impacto de las tarifas de saneamiento de los usuarios de estratos 1 y 2 sean mínimos y socialmente viables.

Blindaje territorial del corredor logístico.

Es fundamental que la oficina de Planeación municipal incorpore en la actualización del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) la reserva de la franja servidumbre necesaria para el

interceptor marginal y el área de expiación de la planta en el sector de caracolito. Esto evitara futuras conflictos por invasión de cause o desarrollo urbanístico incompatibles que pueda encarecer o bloquear la logística de recolección de aguas residuales.

Programa permanente de educación y cultura del agua.

Se sugiere implementar un programa transversal de educación ambiental dirigidos a las industrias y comunidades de Ibagué. El objetivo es reducir la carga contaminante en la fuente (evitar grasas y solidos en el alcantarillado), lo cual optimizará la vida útil de los equipos de la PTAR y reducirá los costos de operación. La aceptación de la tarifa de saneamiento será mayor si el ciudadano comprende que su aporte garantiza la salud de los ríos y quebradas de la ciudad.

Referencias Bibliográficas

- Corporación Autónoma Regional del Tolima. (s. f.). CORTOLIMA | Corporación Autónoma Regional del Tolima. <https://www.cortolima.gov.co/>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2024). DANE - PIB Información técnica. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-trimestrales/pib-informacion-tecnica>
- Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado. IBAL S.A. E.S.P. OFICIAL - IBAL SA ESP OFICIAL. (2026, 19 febrero). IBAL SA ESP OFICIAL. <https://ibal.gov.co/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -. (2015, 17 marzo). <https://www.minambiente.gov.co/>
- (2015, 17 de marzo). Resolución 0631 de 2015: Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.
- MinViVienDa. (2017). <https://www.minvivienda.gov.co/> 2017). Resolución 0330 de 2017 (RAS 2017): Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico.
- Organización Mundial de la Salud. (2006). <https://www.who.int/es> Directrices para el uso seguro de aguas residuales, excrementos y aguas grises. OMS
- ULTRAAQUA. (2024, 6 noviembre). Hospital Wastewater in Denmark Case - ULTRAAQUA. <https://ultraaqua.com/cases/hospital-wastewater-in-denmark/>
- United Nations. (2015). United Nations. <https://www.un.org/site-search/?query=ODS>
- Objetivos de Desarrollo Sostenible: Agenda 2030. ONU

Chain, N. S., & Chain, R. S. (2014). Preparación y evaluación de proyectos ((6.a ed.)).

McGraw-Hill. Útil para justificar el flujo de caja y la toma de decisiones financieras en proyectos de inversión pública.

Tarquin, A. J., & Blank, L. T. (2004). Ingeniería Económica ((7.a ed.)). McGraw-Hill

Education. En gestión de costos de capital (CAPEX) y costos operativos (OPEX) en proyectos de infraestructura.

Urbina, G. B. (2013). Evaluación de proyectos ((7.a ed.)). McGraw-Hill Education.

Este libro es el estándar en Latinoamérica para entender cómo se calculan y para qué sirven el Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno

Apéndices

Apéndice A *material de tubería PAVCO*



Nota. <https://www.youtube.com/watch?v=qxYNdHhMaSg>

Apéndice B
Planta de tratamiento



No

Apéndice C

PTAR de Amalfi es única en Antioquia - Teleantioquia Noticias



Nota. <https://www.youtube.com/watch?v=Ux8eIF8GDsk>

Apéndice D

Cómo funciona la PTAR Aguas Claras - EPM Estamos ahí



Nota. <https://www.youtube.com/watch?v=4f05xDsBgB8>

Apéndice E

Cómo funciona la Ptar Aguas Claras - EPM Estamos ahí



www.ingenieria.com/colombia/2014/07/22/como-funciona-la-ptar-aguas-claras-epm-estamos-ahi/

Apéndice F

Planta de tratamiento de aguas residuales de la estrella México



Nota. <https://www.youtube.com/watch?v=1OdtJwujFlo>

Apéndice G

¿Cómo funciona una planta de tratamiento de aguas residuales?



Nota. <https://www.youtube.com/watch?v=LLJd9JYIrk>

Apéndice H

¿Cómo funciona una planta de tratamiento de aguas residuales?



Nota. <https://www.youtube.com/watch?v=jwo1gk0EjG0>