

**Proponer un Diseño Conceptual de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
(PTAR) para el Municipio de Valledupar, Cesar**

Carlos Andrés Montaña Arzuaga

Jesús Andrés Nieves Barros

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Químico

Director Trabajo de Grado

Cesar Augusto Guevara Lastre

Ing. Químico. M.Sc Ciencias y Tecnologías Ambientales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo de grado a:

Dios fuente infinita de amor, sabiduría, luz y misericordia.

Nuestros padres y familias por todo su amor y colaboración en el logro de nuestras metas.

Carlos Andrés Montaña

Jesús Andrés Nieves

Agradecimientos

Los autores del proyecto expresan sus más sinceros agradecimientos a:

La Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Ingeniería Química por la formación brindada..

Nuestros profesores y tutores por la formación académica y humanística ofrecida.

Carlos Andrés Montaña

Jesús Andrés Nieves

Resumen

Título: Diseño Conceptual de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) para el Municipio de Valledupar, Cesar¹

Autores: Carlos Andrés Montaña Arzuaga y Jesús Andrés Nieves Barros²

Palabras Clave: Aguas Residuales, Planta de Tratamiento, Diseño Conceptual, Eficiencia.

Descripción:

Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) son una alternativa para el control de la contaminación en aguas superficiales y subterráneas, ya que con frecuencia los vertimientos se realizan directamente, tanto en los cuerpos de agua como en el suelo. En países como Colombia, en vías de desarrollo, se presentan bajos porcentajes de agua tratada respecto al total generada, siendo sus causas: falta de recursos económicos, escaso control institucional ambiental y desconocimiento de las tecnologías que pueden utilizarse en el tratamiento de las aguas residuales.

En este orden de ideas el presente proyecto de trabajo tiene como objetivo proponer un Diseño Conceptual para una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) adaptada al Municipio de Valledupar, Cesar, con la cual se plantea una solución a la problemática de que solo un 30% de las aguas residuales generadas son tratadas en el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) “Salguero”, dado que su capacidad técnica y tecnológica de tratamiento es insuficiente debido al acelerado desarrollo urbanístico. A nivel metodológico el estudio es de tipo descriptivo, enfoque mixto y diseño no experimental. La información procede de revisión documental de literatura científica, los resultados reportan que el tratamiento más utilizado son las lagunas de estabilización, humedales y lodos activados y que los sistemas biológicos presentan altos niveles de eficiencia en la remoción de carga orgánica, cuando se emplean complementariamente se alcanzan eficiencias porcentuales del 90%, siendo la solución más conveniente para la ciudad.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ingeniería Físicoquímica, Estudiante de Ingeniería Química. Director: Cesar Augusto Guevara Lastic, Ingeniero químico, M.Sc. Ciencias y Tecnologías Ambientales.

Abstract

Title: Conceptual Design of a Wastewater Treatment Plant (WWTP) for the Municipality of Valledupar, Cesar¹

Authors: Carlos Andrés Montaña Arzuaga and Jesús Andrés Nieves Barros²

Keywords: Wastewater, Treatment Plant, Conceptual Design, Efficiency.

Description:

Wastewater Treatment Plants (WWTPs) are an alternative for the control of contamination in surface and groundwater, since discharges are often carried out directly, both in bodies of water and in the soil. In developing countries such as Colombia, there are low percentages of treated water compared to the total generated, the causes being: lack of economic resources, poor environmental institutional control and lack of knowledge of the technologies that can be used in wastewater treatment.

In this order of ideas, the present work project aims to propose a Conceptual Design for a Wastewater Treatment Plant (WWTP) adapted to the Municipality of Valledupar, Cesar, with which a solution is proposed to the problem that only 30% of the wastewater generated is treated in the Wastewater Treatment System (STAR) "Salguero", given that its technical and technological capacity for treatment is insufficient due to accelerated urban development. At the methodological level, the study is descriptive, mixed approach and non-experimental design. The information comes from a documentary review of scientific literature, the results report that the most used treatment are stabilization lagoons, wetlands and activated sludge and that biological systems present high levels of efficiency in the removal of organic load, when they are used complementarily, percentage efficiencies of 90% are achieved, being the most convenient solution for the city.

¹ Degree Project

² Faculty of Physical and Chemical Engineering, Student of Chemical Engineering. Director: Cesar Augusto Guevara Lastic, Chemical Engineer, M.Sc. Environmental Sciences and Technologies.

Tabla de Contenido

1. Generalidades del Proyecto.....	12
1.1 Planteamiento del Problema	12
1.2 Justificación	14
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo General.....	15
1.3.2 Objetivos Específicos.....	15
1.4 Alcance	16
1.5 Metodología del Proyecto.....	16
2. Marco de Referencia.....	18
2.1. Estado del Arte.....	18
2.2. Marco Teórico-Conceptual	20
2.2.1 Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).....	22
2.3. Marco Legal.....	27
3. Resultados.....	29
3.1 Revisión Bibliográfica sobre Diseños de PTAR utilizados en el Tratamiento de Aguas Residuales	29
3.1.1 Síntesis de la Revisión de Literatura Científica.....	31
3.2 Diseño del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales apropiado considerando Condiciones Técnicas y Ambientales del Entorno	35
3.2.1 Evaluación de Alternativas para la PTAR de Valledupar.....	37
3.2.2 Diseño del Reactor UASB	42

3.3 Estudio socioeconómico para la PTAR diseñada para el Municipio de Valledupar, Cesar ...	44
Conclusiones	49
Recomendaciones	51
Referencias Bibliográficas	52

Lista de Tablas

Tabla 1. Criterios de calidad del agua del Río Cesar (sitio “El Salguero”), según Decreto 2594 de 1984.....	13
Tabla 2. Normatividad relacionada con el Tratamiento de Aguas Residuales	27
Tabla 3. Criterios e Indicadores usados para la selección de Tecnología de Tratamiento en PTAR	38
Tabla 4. Tecnología de Tratamiento, Calificación según Criterios Ambientales y Económicos	39
Tabla 5 Costos de inversión, operación y mantenimiento de PTAR según Tecnologías de Tratamiento.....	40
Tabla 6 Comparativo tecnologías tradicionales vs. Tecnologías alternativas propuestas para PTAR	41
Tabla 7. Intervalos para diseñar reactores UASB.....	44
Tabla 8. Costos de inversión del sistema de tratamiento PTAR, según tipo de proceso	45

Lista de Figuras

Figura 1. Corte transversal de una laguna anaeróbica	24
Figura 2. Corte transversal de la laguna facultativa.....	25
Figura 3. Corte transversal de una laguna de maduración	26
Figura 4. Diagrama de flujo del modelo PRISMA aplicado a la revisión de literatura científica.....	31
Figura 5. Costos directos de inversión para sistemas de tratamiento de aguas residuales.....	47
Figura 6. Costos de operación y mantenimiento para sistemas de tratamiento de aguas residuales.....	48

Introducción

Las aguas del Río Cesar tienen usos múltiples en su recorrido desde su nacimiento en la Sierra Nevada de Santa Marta, hasta su desembocadura en el Río Magdalena. Recibe los vertimientos de aguas residuales de unos diez (10) Municipios, incluyendo Valledupar. Además del impacto negativo de las actividades agrarias, ganaderas, pesqueras, extracción de madera y material de arrastre [1]. Todo esto genera baja calidad del recurso hídrico, que afecta directamente a las poblaciones que utilizan sus aguas para el consumo doméstico.

En Valledupar el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) se localiza en el sitio denominado “El Salguero”, ubicado a unos 9 km de la cabecera municipal, a una altura de 116 msnm, se encuentra constituido actualmente por una zona de cribado y desarenado, lagunas anaerobias, lagunas facultativas y de maduración. Este sistema se proyectó hacia el año 2015, para atender unos 360 mil habitantes, pero con el tiempo su capacidad fue insuficiente para atender una demanda de más de 500 mil habitantes [2]. Esto genera que muchas de las aguas residuales no tengan tratamiento y sean vertidas directamente al Río Cesar. El aumento demográfico, los procesos industriales y la falta de controles ha llevado a que la Corporación Autónoma del Cesar (CORPOCESAR) en el año 2015, haya declarado la emergencia ambiental, siendo una de las soluciones la adecuación de la PTAR “Salguero” y “Tarullal”, de modo que tengan más capacidades y eficiencia para tratar el total de aguas residuales.

En este orden de ideas, el presente proyecto tiene como objetivo elaborar una Propuesta de Diseño Conceptual para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) adaptada al Municipio de Valledupar, Cesar. Son objetivos específicos: realizar una revisión documental de literatura científica sobre diseños de PTAR; diseñar el sistema de tratamientos de agua más

apropiado, considerando las condiciones técnicas y ambientales del entorno y realizar un estudio económico para la PTAR diseñada (relación costo-beneficio) y tiempo de vida útil. A nivel metodológico se realizó una revisión bibliográfica de literatura científica en bases de datos y repositorios, se documentaron experiencias y lecciones aprendidas para proponer el diseño más conveniente para la PTAR.

El presente documento se estructura en cuatro (4) capítulos, el primer capítulo comprende los Aspectos Generales (problema, justificación, objetivos); el segundo capítulo corresponde al Marco de Referencia; el tercer capítulo desarrolla los Objetivos Específicos; el cuarto capítulo presenta las Conclusiones y Recomendaciones pertinentes.

1. Generalidades del Proyecto

1.1 Planteamiento del Problema

El Río Cesar nace en la Sierra Nevada de Santa Marta y atraviesa en su recorrido los Departamentos de La Guajira y el Cesar, alimenta la Ciénaga de Zapatosa y luego desemboca en el Río Magdalena. Pasa por los municipios de Agustín Codazzi; Becerril; Bosconia, Chimichagua, Chiriguaná, Curumaní, Copey, La Jagua de Ibirico, San Diego y Valledupar. Sus aguas son utilizadas para el consumo doméstico, para la pesca y la ganadería [1]. Una problemática que afecta al Río Cesar es que los vertimientos de aguas residuales se depositan en su cauce, produciendo un impacto ambiental negativo [2].

Específicamente en el Municipio de Valledupar, las aguas residuales son vertidas directamente al Río Cesar. En el año 1985 se construyó un sistema de lagunas facultativas para el tratamiento de aguas, denominado “Tarullal”, en ese entonces recibía la totalidad de las aguas residuales. Posteriormente se construyó el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STARS). “El Salguero” en 1995, constituido por zonas de cribado y desarenado, lagunas anaerobias, lagunas facultativas y de maduración. Con el tiempo esta planta quedó pequeña, por lo cual parte de las aguas residuales del municipio son vertidas directamente al río, sin tratamiento alguno [3]. En el año 2015 la Corporación Autónoma del Cesar (CORPOCESAR), declaró la emergencia ambiental, sanitaria y ecológica [4], puesto que las acciones administrativas resultaban ineficaces, para recuperar al río [5]. Según el Director de CORPOCESAR de ese entonces “La planta de aireación quedó insuficiente para tratar las aguas residuales de Valledupar” (p.12).

Mediciones realizadas en el año 2024. En el tramo 4 puente de “Salguero”, reportó los

siguientes datos de calidad el agua según el Decreto 2594 de 1984.

Tabla 1.

Criterios de calidad del agua del Río Cesar (sitio “El Salguero”), según Decreto 2594 de 1984

Parámetro	Unidad	Medida	Norma colombiana	Cambio proyectado
pH	Unidades de pH	7,37	5,0 a 9,0	Sin cambio
Temperatura	°C	27,4	<40°C	Sin cambio
Conductividad	ms/cm	259	50	Pecuario
Oxígeno disuelto	mg/L	3,3	>40	Aumentar
DBQ5	mg/L	32,55	10	Preservación
SST	mg/L	49,62	15	Preservación
Grasas y aceites	mg/L	7,56		Ausente
Turbidez	UNT	55,25	10	Preservación
Olores desagradables		Presente	Ausente	Preservación
Nitrógeno total	mg/L	0,579	<0,1	
Fósforo total	ms/L	0,352	<0,1	
Coli totales	NMP/100 ml	26,600		Preservación
Coli fecales	NMP/100 ml	9,800		Preservación

Fuente: EMDUPAR, mediciones calidad del agua PTAR. Salguero, 2024.

En la estación “Salguero”, el río cesar recibe el mayor caudal de vertimientos, que deterioran la calidad del agua. Es el sitio que mayor atención requiere, y en la actualidad presenta múltiples usos, incluyendo el ser considerado sitio turístico. Se observa en el caudal cúmulos de espumas (detergentes) y fuertes olores. El único uso que debería tener es el de sitio de vertimiento de aguas residuales. Aguas debajo de este punto, las poblaciones se quejan de la problemática

ambiental del vertimiento, de los olores desagradables, de los daños al sistema acuático y de la disminución de la pesca [1]. El objetivo general de calidad es eliminar los vertimientos directos al río cesar, en ese tramo, sin olores fuertes, espumas, ni sustancias que puedan ocasionar algún daño a la flora y fauna [4].

La problemática existente es que la capacidad de la PTAR de la planta de “Salguero” quedó insuficiente y esto hace que gran cantidad de las aguas residuales sean vertidas directamente al río; por lo cual parte de la solución es ampliar la capacidad de la planta y en este propósito un diseño conceptual de una planta adicional hace parte de las posibles soluciones.

A nivel metodológico se propone un estudio de tipo descriptivo, con enfoque mixto que combina información de tipo cuantitativo (datos) con información cualitativa, propia de las variables de estudio y sus dimensiones. La recopilación de información procede de fuentes secundarias, de literatura científica sobre el tema en bases de datos y repositorios, e información institucional de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Valledupar (EMDUPAR).

1.2 Justificación

El tratamiento de aguas residuales deber ser una prioridad en el propósito de tener un desarrollo sostenible, preservar los recursos naturales y reducir al máximo las fuentes de deterioro ambiental que amenazan los ecosistemas. Esta cuestión es una problemática que urge rápidas soluciones, en especial en Colombia, país cuyo recurso hídrico ha sido afectado de manera continua, deteriorando los ecosistemas, lo que genera problemas de salud pública e incrementa la carencia de un recurso hídrico de calidad [9], porque en la mayoría de los municipios del país, las aguas residuales son vertidas directamente a los ríos, sin tratamiento de descontaminación alguna

[8].

Desde esta perspectiva es importante desarrollar investigaciones que propongan el mejoramiento y la eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), especialmente en Municipios como Valledupar, en donde las plantas de tratamiento “El Salguero” y “Tarulla”, son insuficientes debido al crecimiento demográfico de la población y no haber previsto planes de contingencia. Se evidencia así déficit en la eficiencia y funcionalidad de las PTAR, siendo las causas: las restricciones económicas del país, el poco control ambiental y el desconocimiento y desaprovechamiento de tecnologías ambientales que pueden ser útiles, tanto en la remoción de la carga orgánica contaminante, como en la relación costo-beneficio en su tiempo de vida útil. Teniendo en cuenta las condiciones naturales, ambientales, técnicas, económicas y sociales de la PTAR, el estado de conocimiento reportado en la literatura científica y desde los aportes que puede hacer la Ingeniería Química.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Elaborar una Propuesta de Diseño Conceptual para una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Adaptada al Municipio de Valledupar, Cesar.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar una Revisión Bibliográfica sobre Diseños de PTAR, utilizadas para el Tratamiento de Aguas Residuales.
- Diseñar el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales apropiado, considerando Condiciones,

Técnicas y Ambientales del Entorno.

- Realizar un Estudio Económico para la PTAR Diseñada para el Municipio de Valledupar, Cesar.

1.4 Alcance

El alcance de este proyecto de investigación es diseñar de manera conceptual una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) para el Municipio de Valledupar, Cesar, que sea funcional y eficiente de acuerdo con parámetros medioambientales y del contexto, que tengan un tiempo de vida útil adecuado y una relación equilibrada del costo-beneficio.

1.5 Metodología del Proyecto

Proyecto de investigación de tipo descriptivo respecto del diseñar conceptualmente una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para el Municipio de Valledupar, Cesar. El enfoque de investigación es mixto, es decir, combina información de tipo cuantitativo (datos) con el análisis cualitativo de las variables del proceso de tratamiento de aguas residuales. Las fases de investigación fueron las siguientes:

Fase 1. Documentar distintas tecnologías utilizadas en el tratamiento de aguas residuales, en este propósito se realizó.

- Consulta de literatura científica en repositorios y bases de datos, como Google Académico, Web of Science, Scielo, Redalyc, Elsevier, Scopus, entre otros.
- Revisión de contenidos documentales sobre tecnologías alternativas para el tratamiento de PTAR, análisis de contenido y síntesis.

- Comparación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, ventajas, desventajas, costo-beneficio.

Fase 2. Diseño del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales más adecuado para el Municipio de Valledupar, Cesar.

- Definición de variables y parámetros
- Diseño operacional
- Evaluación del modelo

Fase 3. Estimación de costo de inversión y operación de la PTAR

- Evaluación de escenarios de costos
- Análisis de costo-beneficio
- Retroalimentación

2. Marco de Referencia

2.1. Estado del Arte

A nivel internacional se encuentra el estudio “Diseño de Planta Estándar de Bajo Volumen para Tratamiento de Aguas Servidas de Quito [6]. El objetivo del estudio es proponer el diseño de una planta de tratamiento estándar de aguas residuales con capacidad para atender núcleos poblacionales de 500 a 1.000 habitantes. En este propósito a nivel metodológico se realizó una evaluación de plantas de tratamiento pequeñas que depuran aguas servidas en barrios populares, se consideraron factores como: superficie de la planta, población atendida, unidades de tratamiento disponible, posteriormente se realizó la toma de muestras para determinar parámetros fisicoquímicos en el laboratorio, medición de concentraciones de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅) y sólidos totales, se reportó que no cumplen con los valores mínimos permisibles para descarga en cuerpos de agua dulce, según la Normatividad Ecuatoriana, como resultado se definieron los elementos constitutivos de la PTAR estándar, se realizó el dimensionamiento teórico de las distintas unidades en los proceso de pretratamiento, tratamientos primarios, secundarios y terciarios.

Un antecedente investigativo nacional se denomina “propuesta para el mejoramiento de la planta de tratamiento de aguas residuales del Municipio de Tibú, Norte de Santander [7]. El objetivo del estudio es diseñar posibles alternativas para el mejoramiento de la PTAR, en donde se consideran factores técnicos, económicos y ambientales para cada propuesta. De esta manera se busca dar solución a la problemática de que la planta de tratamiento está cumpliendo su tiempo de vida útil y carece de un tratamiento preliminar, lo cual afecta la eficiencia de la misma. La

cual está conformada por un sistema de laguna facultativa que recibe un caudal de 24.06 litros por segundo, que hoy resulta insuficiente.

A nivel metodológico el proceso se inició con un diagnóstico técnico, operativo y administrativo del estado actual de la PTAR; se realizaron caracterizaciones fisicoquímicas de la calidad del agua, de acuerdo a los parámetros de PH, temperatura, Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), conductividad, sólidos suspendidos, sólidos totales, metales pesados, nitrógeno, amoníaco y fósforo. Los resultados reportan que la alternativa para la optimización de la planta cumple con los requerimientos de la Resolución 0631 de 2015, consta de un tratamiento preliminar de cribado y canaleta parshall y la mejora de las lagunas existentes, mejorando así la eficiencia de la remoción.

Un antecedente a nivel regional del Departamento del Cesar se denomina “Selección de tecnologías no convencional para el tratamiento de aguas residuales mediante metodologías de decisión multicriterio para la planta el “Salguero” de la cabecera municipal de Valledupar”, trabajo desarrollado por Gutiérrez; Mejía [8]. En este propósito se identifican las opciones tecnológicas con mejor potencial para tratar aguas residuales; se eligió una metodología de tratamiento de remoción biológica que degrada la materia orgánica. A nivel metodológico el estudio tiene un enfoque mixto, diseño no experimental. Los resultados reportan que los sistemas de tratamiento de aguas residuales más utilizados en zonas suburbanas, en desarrollo y descentralizadas se centran en niveles de tratamiento secundario y terciario, ello permite el desarrollo de las comunidades; reduce la presión sobre el medio ambiente y mejoran la calidad de los cuerpos de agua receptoras al hacer un uso eficiente de los recursos y adoptar técnicas de reúso de aguas residuales tratadas.

2.2. Marco Teórico-Conceptual

- **Aguas residuales domésticas (ARD):** son las procedentes de los hogares y de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, de comercio y servicios [10].
- **Aguas residuales no domésticas (ARND):** son aguas procedentes de actividades industriales, comerciales y de servicios, distintas de las aguas residuales domésticas [10].
- **Caracterización de las Aguas Residuales:** determinación de la cantidad y características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales [17].
- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** cantidad de oxígeno usado para estabilizar la materia orgánica por acción de microorganismos en condiciones dadas de tiempo y de temperatura (20° C), generalmente 5 días [16].
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** es la cantidad química de oxígeno para producir la oxidación química de la materia orgánica presente en el agua residual, usando sales inorgánicas a alta temperatura [16].
- **Desinfección:** el propósito de la desinfección en las aguas residuales es reducir el número de organismos vivos en el agua, que se descargará luego en un afluente, se utilizan los rayos ultravioletas y la cloración [12].
- **Laguna anaeróbica:** laguna con alta carga orgánica en la cual se efectúa un tratamiento en ausencia de oxígeno disuelto [11].
- **Laguna de maduración:** laguna de estabilización que contiene aguas tratadas, tiene una profundidad de 1-5 m para que el sol penetre hasta el fondo. Originalmente fue concebida para reducir la población bacteriana [11].

- **Laguna facultativa:** son rectangulares, con paredes inclinadas y una altura de 9 m, el objetivo es remover la carga orgánica de aguas pretratadas y sedimentas, la coloración es verdosa y el contenido de oxígeno varía según la hora del día [11].
- **Lagunas de estabilización:** son cuerpos de agua creados artificialmente, construidos en tierra, de poca profundidad (1 a 4 metros) y períodos de retención largos (promedio 40 días). Se realizan en ella, procesos físicos, químicos, biológicos para la autorregulación y estabilización natural [11].
- **Lodo:** suspensión de materiales en un líquido, el cual proviene del tratamiento de aguas residuales, del tratamiento de un efluente líquido o de otra actividad que lo genera [11].
- **Lodos activados:** son generados en un procedimiento biológico de aguas residuales en un ambiente químico aerobio, en donde las aguas son aireadas en un tanque con alta concentración de microorganismos degradadores [11].
- **Oxígeno disuelto:** concentración de oxígeno medido en el agua, por debajo de la saturación, se expresa en mg/L [13].
- **Pretratamiento:** proceso inicial en donde se eliminan materiales grandes que pueden generar problema para el mantenimiento y funcionamiento de la PTAR [9], se utilizan rejillas y desarenadores.
- **Proceso biológico:** proceso en el cual las bacterias y otros microorganismos asimilan la materia orgánica del desecho, para estabilizarlo e incrementar la población de microorganismos [14].
- **Sedimentación:** proceso en el cual los sólidos suspendidos en el agua se decantan por acción de la gravedad previa adición de sustancias coagulantes [15].
- **Tipos de aguas:** Según la Resolución 631 de 2015 las aguas residuales son aquellas que

se descargan después de haber sido utilizadas en un proceso o producidas por este, y que no tienen ningún valor inmediato para dicho proceso [10].

- **Tratamiento de Aguas residuales:** procesos a través de los cuales se establecen las condiciones fisicoquímicas del recurso hídrico [9].
- **Tratamiento primario:** es aquel que remueve productos orgánicos e inorgánicos mediante procesos fisicoquímicos. Se realiza una sedimentación primaria, se utilizan lagunas de oxidación, lagunas anaerobias, lagunas aerobias, lagunas facultativas y lagunas de maduración [11].
- **Tratamiento secundario:** es aquel en donde se elimina materia orgánica, disuelta, utilizando procesos biológicos. En este propósito se desarrollan reacciones aerobias, filtros anaerobios, lodos activados y filtros percoladores [11].
- **Tratamiento terciario:** es aquel que remueve materia inorgánica y material recalcitrante [11].

2.2.1 Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)

Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) son una alternativa para disminuir la contaminación del recurso hídrico. Según la Norma Colombiana debe cumplir con lo dispuesto en la Resolución 631 de 2015, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [20]. Esta resolución establece los parámetros y los valores máximos permisibles que deben cumplir quienes realizan vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales o a la red de alcantarillado público.

Los procesos de tratamiento pueden ser físicos, químicos o biológicos [21] en los procesos físicos se utiliza la separación de las partículas, que tienen diferentes densidades en el agua, empleando principios de separación como la sedimentación o la flotación [22]. En los procesos

químicos se utilizan productos que generan partículas coloidales más grandes y con mayor densidad que luego son separadas del agua. Por su parte, los procesos biológicos, son los más utilizados en Latinoamérica, se emplean los microorganismos presentes en el agua, los cuales consumen la materia orgánica, con el propósito de estabilizar, coagular y remover los sólidos coloidales, que no sedimentan de forma natural.

En Colombia existe diversidad en la selección del tratamiento para las aguas residuales, en este orden de ideas pueden encontrarse sistemas aerobios, anaerobios, facultativos o la combinación de estos. Por lo general, los PTAR cuentan con un conjunto de lagunas que, si están bien constituidas, reciben una operación adecuada y un mantenimiento regular, permitirán alcanzar una buena reducción de la carga orgánica y de las bacterias [23]. Como características se tiene que necesitan el suficiente terreno. De otra parte, no son idóneas para la remoción de elementos como amonio, nitrógeno y fósforo, también la eficiencia de operación está determinada por factores climáticos. En tiempos fríos, la eficiencia disminuye, y en tiempos calurosos, mejora la eficiencia, pero se producen más algas, siendo estas un obstáculo para la salida de las aguas residuales tratadas (afluentes).

Las lagunas de estabilización son lagunas diseñadas para tratar las aguas residuales por medio de la interacción de la biomasa (bacterias y algas), estabilizando la materia orgánica y removiendo los patógenos mediante la descomposición biológica natural [24]. Dentro de esta clasificación se incluyen lagunas anaeróbicas, facultativas y de maduración. En este tipo de lagunas se han alcanzado tasas de remoción del 80% de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBQ5) y una superior al 80% en sólidos suspendidos totales (SST) [25].

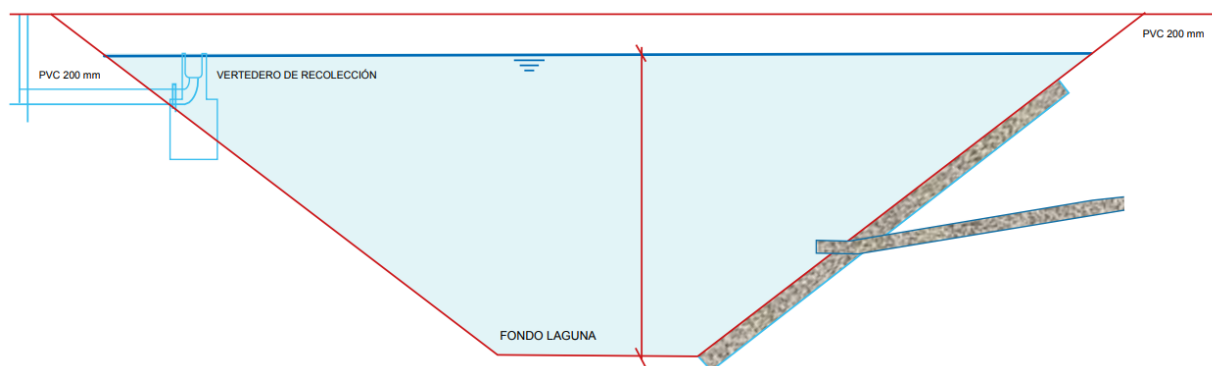
Los sistemas de tratamiento de aguas residuales que emplean lagunas anaerobias, estos se utilizan como primera fase en el tratamiento de aguas residuales, tienen generalmente cuatro (4)

metros de profundidad, forma cuadrada y lados de 46 metros, cubriendo un área de 0,22 hectáreas. El proceso anaeróbico consiste en la estabilización de la materia orgánica es licuada, gasificada, mineralizada y transformada [26]. Según Giraldo [27] la laguna anaerobia presenta remociones de DBO cercanas a un 60%, mientras que en las lagunas facultativas se obtienen porcentajes de remoción entre el 50% y el 70%. En un sistema interconectado por varios tipos de lagunas se obtienen remociones cercanas al 90%.

La laguna anaerobia en un PTAR, debe ser la primera del sistema, debido a que la materia orgánica gruesa del agua residual se deposita en el fondo. Ocurren aquí procesos de putrefacción en donde la materia orgánica se descompone anaeróbicamente, reduciéndose hasta en un 60%, es decir, del DBO inicial. En estos procesos la putrefacción causa mal olor debido a los gases volátiles, formados en el proceso de descomposición. Un esquema de este tipo de laguna se presenta en la figura 1.

Figura 1.

Corte transversal de una laguna anaeróbica



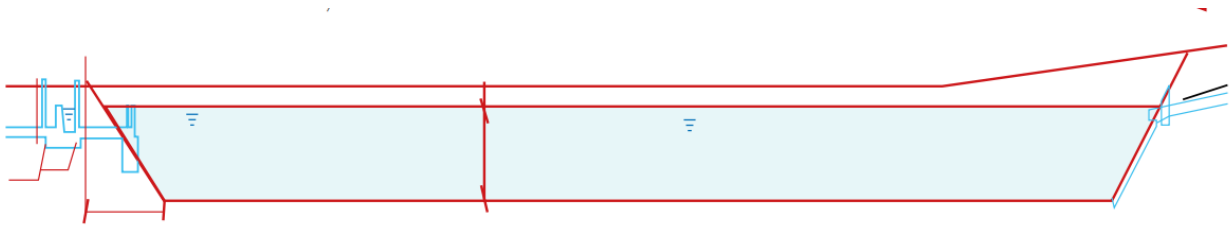
Nota: Imagen tomada de Senasba, Bolivia (2015). Guía de operación y mantenimiento de lagunas de oxidación en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Otro tratamiento son las lagunas facultativas (ver figura 2), las cuales pueden ser primarias

cuando reciben el agua residual una vez ha sido pretratada, y las secundarias, cuando ingresan aguas sedimentadas. Son de color verde porque contienen algas que proporcionan oxígeno para la reducción de la carga orgánica, este proviene del aire y la actividad fotosintética de las algas, la presencia de estas plantas es benéfica para la sobrevivencia de las bacterias que causan la metabolización de los contaminantes del agua residual [26].

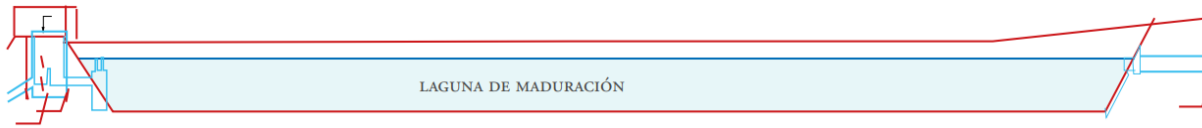
Figura 2.

Corte transversal de la laguna facultativa



Nota: Imagen tomada de Senasba, Bolivia (2015). Guía de operación y mantenimiento de lagunas de oxidación en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Otro procedimiento para el tratamiento de aguas residuales es el uso de las lagunas de maduración (ver figura 3), que siempre es la última que se utiliza. Aquí se logra maximizar la purificación de la carga orgánica, removiendo los coliformes, por lo general tienen una profundidad de entre 1 metro a 1.5 metros, para que el sol, como la radiación ultravioleta penetren hasta el fondo, la remoción de gérmenes es más efectiva cuando el agua permanece varios días en este tipo de laguna [27].

Figura 3.*Corte transversal de una laguna de maduración*

Nota: Imagen tomada de Senasba, Bolivia (2015). Guía de operación y mantenimiento de lagunas de oxidación en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Otro tipo de tratamiento de aguas residuales lo constituyen los sistemas de lagunas algales, las investigaciones sobre la pertinencia de esta tecnología no convencional en climas tropicales en Colombia, reportan que se pueden obtener beneficios económicos al tratar los afluentes contaminados al mismo tiempo que se aprovecha la biomasa de las algas, sin embargo, hay que tener en cuenta la estacionalidad climática que incide en la variabilidad de los resultados [8]. Es necesario considerar que el tratamiento de aguas residuales requiere del consumo de grandes cantidades de energía, siendo con frecuencia el principal costo de la operación. Al respecto se calculan que estos alcanzan un 30% del coste económico total de una PTAR [9].

Otros sistemas de tratamiento de aguas residuales, en Colombia, son los lodos activados [27], los cuales ayudan en la remoción de la materia orgánica. En algunos casos se han ejecutado procesos de clasificación primaria para capturar partículas en suspensión. Un estudio realizado por Mañunga et al. [28], mostró que los lodos activados alcanzaron tasas de remoción del 76% y 80% en la ciudad de Cali. Cuando esta se acompaña de procesos biológicos, la remoción supera el 80%. Otro aspecto para considerar es que los biosólidos que se producen son gasificados, lo cual es energéticamente sostenible, también pueden ser utilizados como fertilizantes.

Otro aspecto a mencionar es que en Colombia al evaluar la remoción de contaminantes se tiene solo en cuenta parámetros como DBO5, DQO y SST, sin embargo, evaluar porcentajes de

fósforos totales (PT) y nitrógeno total (NT) es importante para controlar vertimientos a fuentes superficiales con riesgo de eutrofización y baja concentración de oxígeno disuelto. Investigaciones realizadas por Delgadillo et al. [29], reportan altos niveles de remoción cuando se combinan procesos físicos, químicos y biológicos en una laguna algal, siendo una alternativa de tratamiento interesante para ser utilizada en Colombia. En síntesis, las investigaciones reportan que la implementación de sistemas biológicos genera bajo costos de inversión, facilidad de operación y control y capacidad para amortiguar grandes volúmenes de carga orgánica y cuando se presentan fluctuaciones estacionales [8].

2.3. Marco Legal

Tabla 2.

Normatividad relacionada con el Tratamiento de Aguas Residuales

Normas Generales	Objetivo	Aplicación
Constitución Política de Colombia 1991	Establecer normas y disposiciones sobre derechos ambientales y saneamiento básico.	Obligatorio cumplimiento en todo el territorio nacional.
Ley 2811 de 1974	Establecer el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección del Medio Ambiente.	Obligatorio cumplimiento en toda actividad desarrollada en el territorio nacional.
Ley 9 de 1979	Establecer el Código Nacional Sanitario	Obligatorio cumplimiento para preservar la salud pública.
Ley 99 de 1993	Crear el Ministerio del Medio Ambiente.	Obligatorio cumplimiento en toda actividad desarrollada en el territorio nacional.
Ley 1575 de 2007	Establecer características, instrumentos y frecuencia para el sistema de control y vigilancia de la calidad del agua.	Obligatorio cumplimiento en todo el territorio nacional.
Resolución 2115 de 2007	Establecer los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua.	Obligatorio cumplimiento en todo el territorio nacional.

Resolución 0811 de 2008	Establecer lugares y puntos de toma de muestras para el control y vigilancia de la calidad del agua.	Obligatorio cumplimiento en todo el territorio nacional.
Resolución 082 de 2009	Establecer fórmulas para la práctica de inspección sanitaria de agua.	Obligatorio cumplimiento en todo el territorio nacional.
Decreto 3930 de 2010	Reglamentar el uso del agua y la destinación de residuos líquidos.	Obligatorio cumplimiento en todo el territorio nacional.
Decreto 2667 de 2012	Reglamentar la tasa retributiva por la utilización directa o indirecta como receptor de vertimientos.	Obligatorio cumplimiento en todo el territorio nacional.
Resolución 1207 de 2014	Adoptar disposiciones respecto al uso de Aguas Residuales Tratadas	Cumplimiento obligatorio en todo el territorio nacional.
Resolución 631 de 2015	Establecer parámetros y valores máximos permisibles en vertimientos en cuerpos de aguas superficiales.	Obligatorio cumplimiento en todo el territorio nacional
Resolución 1256 de 2021	Reglamenta el uso de aguas residuales en actividades económicas, a excepción de su uso como fertilizante.	Obligatorio cumplimiento en todo el territorio nacional

Fuente: Autores del proyecto.

3. Resultados

En el presente capítulo se desarrollan los objetivos específicos del proyecto, los cuales permiten dar cumplimiento al objetivo general. De acuerdo a lo anterior, se realizó una revisión de literatura científica sobre diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR); se propuso un diseño conceptual de PTAR para el municipio de Valledupar considerando aspectos técnicos y ambientales, y posteriormente se realizó un estudio económico sobre la planta alternativa propuesta.

3.1 Revisión Bibliográfica sobre Diseños de PTAR utilizados en el Tratamiento de Aguas Residuales

Para dar cumplimiento a este objetivo específico 1, se realizó una revisión bibliográfica de literatura científica [18,19] en bases de datos como Google Académico, Science Direct, Web of Science, Scopus, Scielo y Redalyc, utilizando la declaración PRISMA [42].

La Declaración PRISMA 2020 se basa en un diagrama de flujo que integra cuatro (4) fases: Identificación (número de registros, documentos), mediante búsqueda en bases de datos; cribado (número de registros que no cumplen criterios y filtros); idoneidad (número de registros elegibles) e inclusión (número de estudios seleccionados para la revisión de literatura científica).

Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión:

- Artículos científicos publicados en las bases de datos: Google Académico, Science Direct, Web of Science, Scopus, Scielo, Redalyc.

- Artículos publicados en los años 2014 a 2024.
- Artículos publicados en idioma español e inglés.

Criterios de exclusión:

- Artículos que no planten diseños alternativos de PTAR.
- Artículos de diseño tradicional de PTAR.

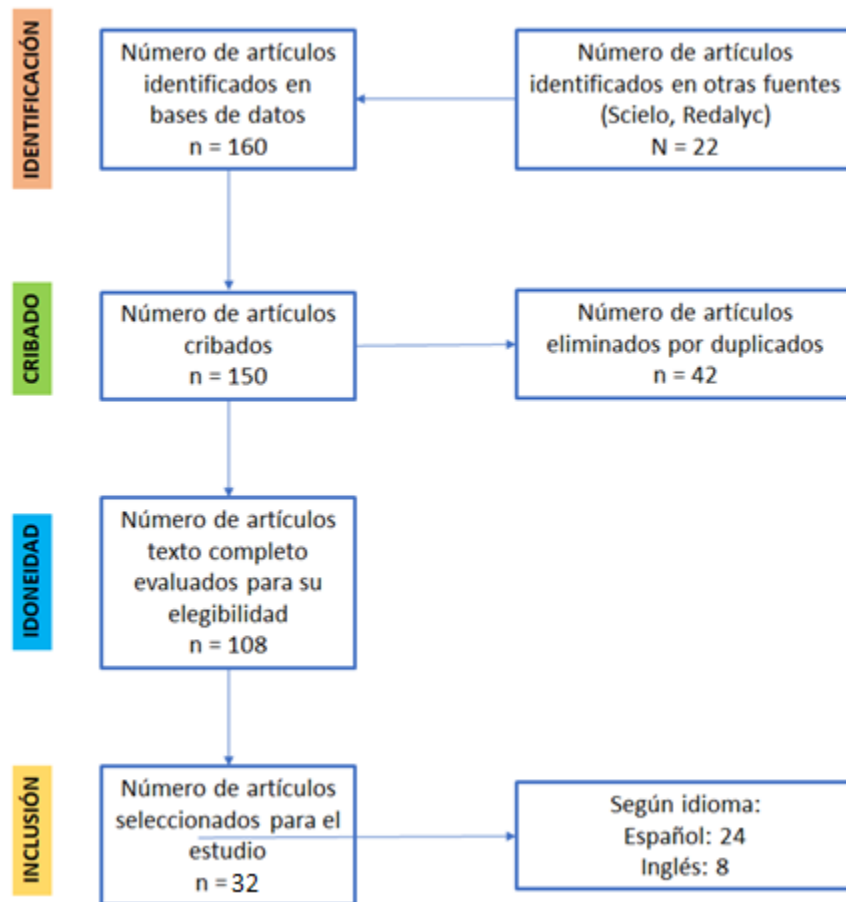
Procedimiento

La búsqueda en bases de datos se realizó a partir de las siguientes palabras clave “Aguas residuales”, “planta de tratamiento”, “diseño de planta de tratamiento”, en las bases de datos mencionadas. Las ecuaciones de búsqueda utilizando el operador booleano AND fueron: {sewage} AND {treatment plant} AND {waste wáter treatment plant design}; correspondientes en español a {aguas residuales} y {planta de tratamiento} y {diseño de planta de tratamiento}.

El total de documentos encontrados fueron 182, distribuidos de la siguiente forma: Google Académico (116); Science Direct (16); Web of Science (14); Scopus (14); Scielo (12); Redalyc (10). Realizada la lectura del título y el resumen se consideraron adecuados 150 estudios, de los cuales se eliminaron 42 por tratarse de duplicados. Aplicando los criterios de inclusión y exclusión dando prioridad al diseño de PTAR y el de proponer tecnológicas alternativas de tratamiento, se seleccionaron 32 artículos. El diagrama de flujo se presenta en la figura 4.

Figura 4.

Diagrama de flujo del modelo PRISMA aplicado a la revisión de literatura científica



Fuente: Elaboración autores del proyecto.

3.1.1 Síntesis de la Revisión de Literatura Científica

A continuación, se describen distintos tipos de diseño de PTAR, buscando ejemplificación de los tipos de tratamiento de aguas residuales.

El diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) utilizando sistemas bioelectroquímicos (BES), ha sido investigado mediante una metodología que describe: la capacidad y cobertura de los sistemas de tratamiento en distintas regiones de Colombia; el fundamento teórico de los microorganismos exoelectrogénicos, que interactúan en los sistemas

bioelectroquímicos, y el uso y perspectivas de esta tecnología en la descontaminación de aguas [32], siendo la finalidad del tratamiento remover la carga eutrófica de la materia orgánica, materia mineral, sólidos suspendidos y sedimentables, microorganismos patógenos presentes en el agua [33].

Los BES se utilizan en el tratamiento secundario de las aguas residuales, los microorganismos tienen la capacidad para degradar una amplia variedad de contaminantes de acuerdo a la biodisponibilidad y el metabolismo de las cepas [32]. La digestión celular se utiliza para obtener energía a partir de la degradación de la materia contaminante. Un 90% de la energía producida se convierte en gas metano, el restante se destina al crecimiento celular, funcionan como una pila electrolítica, el ánodo recibe los electrones generados por la oxidación de las bacterias exoelectrogénicas y el cátodo recibe los electrones que posteriormente reducen el compuesto [33]. Un factor de éxito para implementar los BES, es la energía liberada a partir de la carga orgánica, esto depende del estado de oxidación del sustrato metabolizado por la biomasa.

La implementación en el tratamiento de agua residual requiere de condiciones controladas que garanticen la estabilidad de los microorganismos. Igualmente, del control de factores como temperatura, pH y composición química de la carga orgánica. Los sistemas bioelectroquímicos (BES) más utilizados son: Sistema Bioelectrico (BES) con bacterias eléctricamente activas (AEB), se utiliza en la inoculación de lodo anaerobio y en la celda de electrolisis microbiana (MEC); reactor de electrolisis biocatalizado (ARB-BES), utilizado en lodo anaerobio y sistema de flujo ascendente integrado. Celdas de combustible microbiano (MFC); reactor Batch SBR integrado; celdas de combustible integrado a celdas de electrolisis (MFC-MEC); celdas de combustible microbiano (MFC) [34]. Esta tecnología es eficiente para la descontaminación de aguas residuales, pero necesitan un control de variables como temperatura, pH, carga contaminante que afectan la

eficiencia, además es relativamente costosa.

Otra tecnología utilizada en el diseño de PTAR son los reactores UASB, para el tratamiento de contaminantes en aguas residuales y lixiviadas [36]. Los reactores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), se utilizan en tratamientos biológicos, que de acuerdo al tipo de bacterias pueden ser aerobias o sea en presencia de oxígeno, o anaerobias con ausencia de este [37]. Si el proceso es aerobio se produce biomasa (lodo); si es anaerobio se genera metano. Una combinación de proceso aerobio y anaerobio garantiza la degradación de la carga orgánica, reduciendo la producción de lodo y el consumo energético.

Un proceso de descontaminación con un reactor UASB que funciona de manera anaerobia tiene ventajas sobre el tratamiento aerobio convencional, entre ellas: mayor eficiencia de remoción, reducción en la producción de lodos, bajo consumo de energía, espacio reducido; bajo contenido de nutrientes y generación de un gas con alto contenido calórico, lo cual depende de la cantidad de metano [38]. El funcionamiento del reactor UASB depende de parámetros físicos y de procesos biológicos, estos determinan la eficiencia de la remoción y la conversión de los compuestos orgánicos. La eficiencia se basa en establecer un lecho denso de lodos en el fondo, formado por la autoinmovilización de las bacterias.

Así los reactores UASB son una alternativa viable en diseños de PTAR que utiliza tratamiento biológico por su bajo costo de operación y eficiencia de remoción. Entre las ventajas se tiene: alta eficiencia con altas cargas y baja temperatura, el lodo producido es estable, no requiere energía eléctrica; el biogás producido es una buena fuente energética, no requiere gran espacio. Desventajas: eliminación parcial de patógenos, sensible a la temperatura del agua y al pH, genera olores [39].

En el diseño de PTAR los tratamientos aerobios proporcionan un alto contenido de oxígeno

para que los microorganismos puedan degradar la materia orgánica presente en el agua residual, produciendo dióxido de carbono y agua, son sistemas anaerobios: reactores UASB, filtros anaerobios, lagunas anaerobias y reactores anaerobios de flujo ascendente de pistón (RAP). Los sistemas aerobios más utilizados son: lodos activados, filtros percolados, biodiscos rotativos y filtro biológico aireado.

El filtro percolador es un reactor de crecimiento asistido, en donde los microorganismos crecen en un medio de soporte dentro del reactor. Está formado por pozo séptico, tanque dosificador, filtro percolador y sedimentador secundario. Las ventajas son: proceso biológico sencillo; adecuado para espacios pequeños; eficiencia de remoción de alta cantidad de materia orgánica; bajo consumo energético. Desventajas: acumulación de biomasa, requiere constante supervisión del operador [40]. Las tasas de remoción son DBO5 (80%), sólidos suspendidos (80%), DQO (70%).

El reactor biológico secuencial (SBR), es una tecnología para sistemas aerobios, funciona como un sistema de llenado y vaciado que se lleva a cabo en un solo reactor, sigue la secuencia: llenado, reacción, reposo, sedimentación y vaciado como tratamiento biológico. La eliminación de materia orgánica se lleva a cabo por acción de los microorganismos, los porcentajes de remoción son: DBO5 (92%); DQO (70%), sólidos suspendidos (47%); ventajas: toleran variaciones de carga orgánica eficiencia en la eliminación de DBO5, nitrógeno, fósforo. Desventaja: riesgo de taponamiento, mayor mantenimiento.

El diseño de PTAR, utilizando la tecnología de los lodos activados convencionales, es la más común en el mundo. Es un tratamiento biológico para aguas residuales, se lleva a cabo en un reactor en donde se produce agitación y aireación en una mezcla de agua residual y un lodo, en donde los microorganismos presentes oxidan la materia orgánica, degradándola a una forma más

estable y menos contaminante, precisa de un pretratamiento con rejillas de cribado, trampas de grasa y desarenador, también necesita un sedimentador primario y secundario. Los porcentajes de remoción son 95% de DBQ y entre 85% y 95% de sólidos suspendidos totales. Ventajas: altamente utilizado en Colombia; eficiencia en la remoción de contaminantes. Desventajas: dependencia de la temperatura del efluente, requiere mantenimiento continuo, alta producción de lodos, altos costos operacionales por aireación [40].

Dentro de los sistemas naturales considerados en el diseño se encuentran los humedales o estanques poco profundos, en donde hay plantas acuáticas, la depuración se realizó a partir de procesos de tipo microbiológico, biológico, físico y químico. Se incluyen acá las lagunas de estabilización, formadas por estanques de tierra en donde las aguas residuales son tratadas con procesos naturales que incluyen algas y bacterias. Se distinguen tres (3) tipos de lagunas: lagunas anaerobias para el tratamiento primario; las lagunas facultativas, para tratamiento secundario y eliminación de materia orgánica y las lagunas de maduración, en donde se eliminan patógenos [40].

3.2 Diseño del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales apropiado considerando Condiciones Técnicas y Ambientales del Entorno

El Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) del Municipio de Valledupar, es de tipo biológico, se utilizan lagunas de oxidación anaerobias. En la actualidad solo se tiene un punto de vertimiento para las aguas residuales, la PTAR “Salguero” se ubica a 9 kilómetros del municipio.

En un principio el STAR de Valledupar contaba con dos plantas de tratamiento “El

Tarullal” que trataba un 30% de las aguas residuales y “El Salguero”, que trataba un 70% de las aguas. Posteriormente en el año 2014, con la puesta en marcha del colector oriental, el 100% de las aguas residuales son tratadas en el “El Salguero”. El sistema cuenta con una extensión de 115 hectáreas. El agua es recibida en cámaras de reparto, ingresan entre 1.700 L/s a 2.000 L/s, ahí se realiza la medición del caudal [30].

Las cámaras de reparto están constituidas por ocho (8) módulos, estas dividen el caudal de agua residual a tratar en proporciones iguales. Existen dos fases de tratamiento cada una compuesta por cuatro (4) módulos (dos lagunas anaerobias, una laguna facultativa y una laguna de maduración), o sea, se cuenta con ocho (8) lagunas de oxidación.

Se cuenta con ocho (8) módulos de desarenado, los cuales incluyen sus respectivas rejillas en la entrada para retener los sólidos flotantes que ingresan al sistema. Aguas abajo de cada uno de los desarenadores se cuenta con dos lagunas anaerobias, para la estabilización de la materia orgánica por acción bacteriana; una laguna facultativa, con el fin de remover la materia orgánica remanente; y una laguna de maduración, para una mejor desinfección de aguas residuales en todo el sistema.

El tratamiento preliminar se realiza en la zona de cribado, allí existe una canaleta con rejillas para retener bolsas y material sólido de mayor tamaño que puede taponar el sistema. Estos materiales se extraen manualmente. El sistema de tratamiento posee un desarenador cuyo mantenimiento se realiza de acuerdo con la época del año, verano o invierno [30].

Los tratamientos biológicos, se realizan en las lagunas anaerobias, allí se degrada de un 50% a un 60% la materia orgánica, sin presencia de oxígeno, mediante el proceso de hidrólisis, formación de ácido y metano, se obtiene como producto el dióxido de carbono. Las dimensiones de las lagunas son de 55 x 55 m (largo y ancho), y 5 metros de profundidad. El tiempo de

degradación es de un día y el proceso es más eficiencia cuando hay buena luz solar, viento y temperatura promedio de 28° C, se precisa retirar las natas ya que si no se hace los procesos químicos y biológicos pierden eficiencia [30].

El agua de la laguna anaerobia se conduce a la laguna facultativa a través de una tubería de 12 pulgadas, a estas tuberías se les debe hacer mantenimiento, las lagunas facultativas tienen 235 m de largo, por 90 m de ancho y 2,5 m de profundidad. La laguna de maduración tiene 230 m de largo, 95 m de ancho y 1,5 m de profundidad, la función es eliminar agentes patógenos. La situación de la planta de “Salguero” reporta olores desagradables producidos por la descomposición de materia orgánica, no metabolizada por microorganismos. Existe sobresaturación, el sistema se diseñó para recibir 800 L/s y recibe 1.700 L/s, debido a que se cerró la PTAR “El Tarullal”. Se observó presencia de natas en las lagunas. El tiempo de degradación de la materia orgánica en las lagunas anaerobias es de un día (proyectado), pero debido a que el caudal que entra es el doble de la capacidad diseñada (800 L/s), el tiempo de retención se reduce a solo unas horas [30].

La PTAR “Salguero” trabaja para un caudal para el cual no fue diseñado y esto disminuye la eficacia del tratamiento. Los olores ofensivos se intensifican a determinadas horas del día (9-10 a.m.). Los tratamientos preliminares de cribado y desarenado son eficientes, los contenidos de materia orgánica que presenta el Río Cesar aguas debajo de la PTAR “El Salguero”, indican que, a pesar del número de lagunas existentes, la carga orgánica es tan alta que el sistema no alcanza a procesarla [30].

3.2.1 Evaluación de Alternativas para la PTAR de Valledupar

En el propósito de evaluar alternativas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales,

se consideran criterios ambientales, económicos, técnicos y sociales. Estos criterios fueron seleccionados en base a la investigación realizada por Herrán & Mejía [31], en la cual se seleccionó una tecnología no convencional para la PTAR “El Salguero” a partir de la metodología de decisión multicriterio en donde se consideraron los criterios mencionados. En la tabla 2 se indica el criterio y su indicador.

Tabla 3.

Criterios e Indicadores usados para la selección de Tecnología de Tratamiento en PTAR

Criterio	Indicador
Ambiental	Impacto, generación de lodos, olores, sedimentos. Requerimientos de energía.
Económico	Costos de inversión. Costo de operación y mantenimiento.
Técnico	Eficiencia en la remoción de materia orgánica (DBO5). Eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos (SS), nitrógeno (N) y coliformes fecales.
Social	Alteración de condiciones de vida. Concertación con comunidad aledaña.

Fuente: Autores del proyecto.

De acuerdo con la tabla 3, se consideran cuatro (4) criterios pertinentes a considerar en el diseño de la PTAR. El criterio ambiental es uno de los más importantes, dado que en la actualidad existe afectación del medio ambiente, la generación de lodos tendría igualmente un impacto negativo, también la utilización de energía de fuente térmica produce emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). El criterio económico tiene incidencia dadas las limitaciones de recursos financieros. El criterio técnico más importante es la eficiencia en la remoción de materia orgánica y en la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Los criterios sociales son considerados teniendo en

cuenta la comunidad circundante.

En la tabla 4, se relaciona la tecnología de tratamiento y la valoración según criterios ambientales y económicos.

Tabla 4.

Tecnología de Tratamiento, Calificación según Criterios Ambientales y Económicos

Tecnología de Tratamiento	Generación de lodos L/Hab./año	Requerimiento de energía KW/Hab./año	Costos de inversión, operación y mantenimiento USD/Hab.
Tanque séptico	15-35	0	12-20
Filtro anaerobio	25-50	0	30-50
Reactor UASB	25-35	5-7	40-50
Laguna anaerobia	10-35	7-15	40-65
Lodos activados	40-105	18-26	35-50
Laguna facultativa	15-30	0	15-30
Filtro de membranas	40-100	18-26	50-75
Laguna de maduración	0-10	0	10-20

Nota: Valores calculados, estudio Herrán & Mejía [31].

De acuerdo con la tabla 4, las tecnologías de tratamiento consideradas son: tanque séptico, filtro anaerobio, reactor UASB, laguna anaerobia, lodos activados, laguna facultativa, filtro de membranas y laguna de maduración. La generación de lodos es más alta en la tecnología de lodos activados y mínima en la laguna de maduración, cuando ya la carga orgánica ha sido depurada. También los requerimientos de energía son mayores en la tecnología de lodos activados. Los mayores costos de operación y de mantenimiento se generan en la tecnología de filtros de membrana y menores en la laguna de maduración y tanque séptico [31].

Considerando las tecnologías tanque séptico, filtro anaerobio, reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB), lodos activados y filtro de membranas, la mayor generación de lodos se presenta en lodos activados. Mayor eficiencia en la remoción DBO5 (%), sólidos suspendidos (SS,

%), remoción de nitrógeno (N, %) y coliformes, fecales en la tecnología de lagunas anaerobios [31].

De acuerdo con los datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), la proyección de Valledupar para el año 2025 es 567.593 habitantes. Con base en este dato, en la tabla 5 se calculan los costos de inversión, operación y mantenimiento, a partir de los datos de la tabla 4.

Tabla 5

Costos de inversión, operación y mantenimiento de PTAR según Tecnologías de Tratamiento

Tipo de tecnologías de tratamiento	Costos de inversión, operación y mantenimiento (US\$)
Tanque séptico	9.081.488
Filtro anaerobio	22.703.720
Reactor UASB	25.541.685
Laguna anaerobia	29.798.632
Lodos activados	24.122.702
Laguna facultativa	12.770.842
Filtro membranas	35.474.562
Laguna de maduración	8.513.895

Fuente: Autores del proyecto

De acuerdo con la tabla 5, los mayores costos de inversión, operación y mantenimiento corresponden a la tecnología de filtro de membranas, seguido de la laguna anaerobia, posteriormente está el reactor UASB. Como sistemas abiertos el filtro de membranas y el reactor UASB presentan mayores eficiencias en la remoción de carga orgánica y generación de lodos y demanda más consumo de energía que los sistemas de lagunas. Costos más bajos se obtienen en los sistemas de lagunas facultativa y de maduración, pero la eficiencia de remoción de carga

orgánica es reducida.

En la tabla 6, se presenta un comparativo entre las tecnologías tradicionales (laguna anaerobia, laguna facultativa y lagunas de maduración) y las tecnologías propuestas como alternativas: tanque séptico, filtro anaerobio, reactor UASB, lodos activados y filtro de membranas, de acuerdo a parámetros como generación de lodos, consumo de energía y costos de inversión, operación y mantenimiento.

Tabla 6

Comparativo tecnologías tradicionales vs. Tecnologías alternativas propuestas para PTAR

Tecnologías tradicionales	Generación de lodos L/Hab./año	Requerimiento de energía KW/Hab./año	Costos totales USD/Hab. Total
Laguna anaerobia	22,5	11	29.798.632
Laguna facultativa	22,5	0	12.770.842
Laguna de maduración	5	0	8.513.895
Tecnologías Alternativas Propuestas			
Tanque séptico	2,5	0	9.081.488
Filtro anaerobio	37,5	0	22.703.720
Reactor UASB	30	6	25.541.685
Lodos activados	72,5	22	24.122.702
Filtro de membranas	70	22	35.474.562

Fuente: Autores del proyecto

Según la tabla 6, los sistemas que utilizan tecnologías tradicionales (lagunas) tienen baja producción de lodos, por lo que la eficiencia de remoción de carga orgánica es regular (40%-50%), tienen la ventaja de requerir bajo consumo de energía, y solo la laguna anaerobia tiene costos altos de inversión, operación y mantenimiento (USD 29.798.632). Por su parte, las tecnologías alternativas propuestas presentan ventajas en la alta capacidad para generar lodos, remoción de

materia orgánica (eficiencia), pero los costos totales son más elevados que los sistemas tradicionales, esto los hace elegibles y convenientes para ser implementados de manera complementario a las lagunas en la PTAR Valledupar.

3.2.2 Diseño del Reactor UASB

Dada la multiplicidad de tecnologías alternativas propuestas para la PTAR se selecciona el diseño del reactor UASB.

El reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) es el primer proceso biológico unitario utilizado en una PTAR. En el reactor se realiza la sedimentación de sólidos suspendidos; transformación parcial de la materia orgánica, la producción de biogás se ubica después del tratamiento preliminar y antes del tratamiento secundario. Tiene eficiencia entre el 65% y 75% para depurar materia orgánica.

El reactor UASB tiene tres (3) partes:

- Biomasa (desde el fondo a la mitad).
- Sedimentador (encima de la biomasa).
- Estructura de campana para retener el biogás.

Los reactores UASB son rectangulares, de concreto, una altura de 5 m, volumen 1.000 m³. Poseen tuberías para el ingreso del agua, válvulas para remover la biomasa y el lodo; canaletas para evacuar el agua y deflectores para retener la materia sólida. Una altura óptima de 5m, es la indicada según la velocidad ascensional, el tiempo de retención (8 a 10 horas) y la altura del reactor. Considerando la población tarde de Valledupar proyectada a 2025, se necesitan 7.094 reactores UASB.

El tratamiento de las aguas residuales es anaerobio, los reactores UASB, son tecnologías

de alta tasa, mejoran la reacción anaerobia con tiempos de retención bajos. La digestión anaerobia tiene tres (3) fases: hidrólisis, acidogénesis y acetogénesis. El tiempo de retención hidráulica es de 8 a 10 horas. La carga orgánica volumétrica es el producto del caudal por la concentración de materia orgánica dividida por el volumen útil del reactor UASB.

La eficiencia de eliminación de materia orgánica se calcula para DQO y para DBO.

Para la DQO:

$$\text{Eficiencia (DQO) (\%)} = 100 (1 - 0,68 * t^{-0,35}).$$

Donde:

Eficiencia = porcentaje (%).

t = tiempo de retención hidráulico

0,68 = constante

Para la DBO5:

$$\text{Eficiencia (DBO5) (\%)} = 100 * (1 - 0,70 * t^{-0,50})$$

Los materiales para construir el reactor, según la Comisión Nacional de Agua (2015), son materiales resistentes a la corrosión: acero, hormigón, productos químicos para evitar fugas, fibra de vidrio, PVC.

En la tabla 7, se indican los intervalos para diseñar los reactores UASB.

Tabla 7.*Intervalos para diseñar reactores UASB*

Reactor UASB	Unidades	Intervalo
Carga orgánica volumétrica	Kg DQO (m ³ .d)	5-20
Tiempo de retención de sólidos	Días	>30
Tiempo de retención de agua	Hora	4-8
Contenido de lodo en biomasa	Kg SSV/m ³	35-40
Velocidad ascensional		
Caudal promedio	m ³ /m ² .d	0,8-1,0
Longitudes		
Altura del reactor	m	5-7
Altura de cámara para biogás	m	1,5-2,0
Área de la capsula para biogás	& del área del reactor	15-20

Nota: Tomado de Guía Diseño conceptual y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales (Londoño, 2022).

Universidad de Antioquia CORNARE.

La operación del reactor UASB, plantea cuatro tareas, la primera es extraer los sólidos flotantes, las grasas y aceites. La segunda es rastrear los lodos para determinar cuándo extraerlos, para ello se emplean válvulas. La tercera es medir las variables fisicoquímicas todos los días, la cuarta es estimar los sólidos sedimentables y a alcalinidad del reactor.

3.3 Estudio socioeconómico para la PTAR diseñada para el Municipio de Valledupar, Cesar

Los Ministerios del Medio Ambiente y Desarrollo Económico fueron fusionados en el año 2004 denominándose ahora Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, después de varios estudios propusieron algunos costos de inversión del sistema de tratamiento de aguas residuales, de acuerdo con el tipo de proceso desarrollado. En la tabla 8 se presentan los costos de inversión mínimos y máximos según el tipo de tratamiento (preliminar, primario, lagunas, filtros

percoladores y Reactor UASB).

Tabla 8.

Costos de inversión del sistema de tratamiento PTAR, según tipo de proceso

Sistema de Tratamiento	Máximo (US\$ / Hab)	Mínimo (US\$ / Hab)	Costo total máximo (US\$)
Preliminar	8	6	4.540.744
Primario	30	20	17.027.874
Lagunas	30	20	17.027.874
Filtros percoladores	60	30	34.055.637
Lodos activados	120	20	68.111.160
UASB	40	20	22.703.720

Nota: Valores calculados, estudio Herrán y Mejía [31].

De acuerdo con proyecciones realizadas en el “Plan Decenal de Aguas Residuales” [41] con los recursos disponibles se podrían financiar aproximadamente un 12% de los requerimientos de inversión. Adicionando los recursos que destinan los Municipios para el tratamiento de aguas residuales (8%), equivalentes a US\$300 millones¹. El porcentaje de financiamiento asciende a un 20%. Los costos del STAR se clasifican en dos categorías: costos de inversión inicial y costos de funcionamiento (Administración, Operación y Mantenimiento)

Costos de Inversión

- Estudios preliminares y estudios de suelo
- Diseño de ingeniería
- Construcción.
- Terreno

¹ Estos recursos provienen de la recaudación del Servicio Municipal de Agua y Alcantarillado

- Interventoría
- Gastos administrativos, legales y financieros
- Reposición

Costos de Funcionamiento

- De operación y mantenimiento
- Reposiciones
- Reparaciones
- Energía
- Insumos químicos
- Monitoreo de procesos
- Mano de obra
- Disposición de lodos

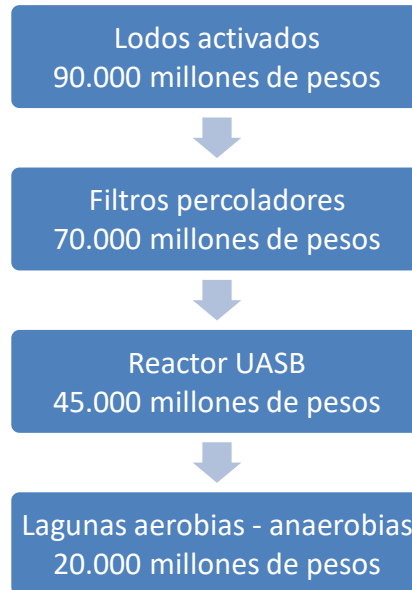
Costos Administrativos

- Mantenimiento de equipos
- Personal administrativo
- Gastos generales

Los sistemas de tratamiento de Aguas Residuales considerados fueron: filtro percolador, lagunas, lodos activados y Reactor UASB. En este orden se presentan los costos de mayor a menor. El sistema más costoso es el de lodos activados, le siguen filtro percolador, Reactor UASB y lagunas anaerobias – aerobias en ese orden (ver figura 5).

Figura 5.

Costos directos de inversión para sistemas de tratamiento de aguas residuales



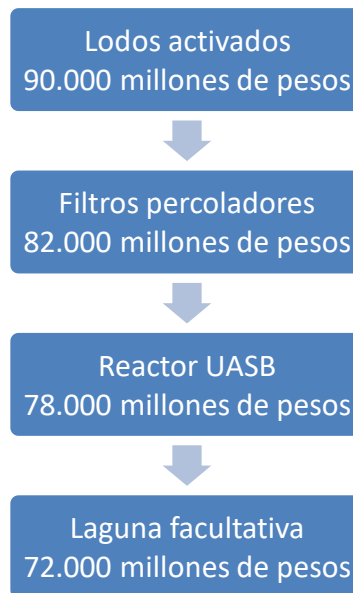
Fuente: Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2022.

De acuerdo con la figura 5, los mayores costos de inversión corresponden a la tecnología de lodos activados, pero esto se compensa con mayor eficiencia de remoción de carga orgánica. Le siguen la tecnología de filtros percoladores, luego reactor UASB y finalmente las lagunas anaerobias-aerobias, que tienen un costo promedio de 20.000 millones de pesos. Aquí el proceso de degradación de materia orgánica y descontaminación es básico, propia de tratamientos primarios y secundarios.

Los costos de operación y mantenimiento de las distintas tecnologías se presentan en la figura 6.

Figura 6.

Costos de operación y mantenimiento para sistemas de tratamiento de aguas residuales



Fuente: Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2022.

De acuerdo con la figura 6, los costos de operación y mantenimiento más elevados, corresponden a la tecnología de lodos activados con 90.000 millones de pesos, esto se compensa con la eficiencia en las tasas de remoción. Respecto a los costos de construcción de los sistemas de tratamiento de agua residual, los mayores costos lo tienen los humedales de flujo subsuperficial (18.000 millones de pesos); le siguen la laguna facultativa (10.000 millones de pesos); lodos activados (6.000 millones de pesos) y filtro percolador (5.000 millones de pesos).

Conclusiones

Una revisión bibliográfica sobre diseños de PTAR utilizados para el Tratamiento de Aguas Residuales reporta que pueden ser utilizados sistemas aerobios, anaerobios, facultativos o la combinación de estos. En la laguna anaerobia se presentan remociones de DBO5 cercanas al 60%; mientras que en las lagunas facultativas se alcanzan porcentajes entre el 50% y 70%; cuando se combinan la eficiencia de remoción alcanza un 90%. Otros sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales son los lodos activados, obteniéndose eficiencias de remoción superiores al 80% en parámetros como DBO5, DQO y SST, una limitación importante es la gran cantidad de energía que se necesita.

Las diferentes alternativas de tratamiento de aguas residuales alcanzan eficiencias de remoción entre el 50% y el 80% y esto va a depender de las fases de tratamiento y la complementariedad. Cuando se combinan técnicas físicas, químicas y biológicas se alcanzan niveles de remoción del 80% a 90%. Se observa una mayor preferencia por los procesos de tipo biológico, así como por los sistemas de tratamiento naturales, considerando un enfoque holístico que integra aspectos: técnicos, sociales, económicos y ambientales. Se debe avanzar en los niveles de tratamiento, iniciando con el nivel primario de tratamiento (tanques sépticos, filtros anaerobios, laguna anaerobia); nivel de tratamiento secundario (biosólidos, lodos activados, humedales); y nivel de tratamiento terciario (filtración con membranas y lagunas de maduración).

El diseño de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales para el Municipio de Valledupar, Cesar, parte del hecho de que la PTAR trabaja con un caudal mucho mayor, para el cual no fue diseñada, básicamente el tratamiento de las aguas residuales se basa en procesos biológicos, se cuenta con ocho (8) módulos, cada uno de los cuales posee dos lagunas anaerobias,

una laguna facultativa y una laguna de maduración. Los tratamientos biológicos se realizan en las lagunas anaerobias, allí se degrada de un 50% a un 60% de materia orgánica, sin presencia de oxígeno, mediante tres (3) procesos: hidrólisis, formación de ácido y metano. Para la escogencia de alternativas se consideraron factores ambientales (impacto, generación de lodos, olores, sedimentos); económicos (costos de inversión); técnicos (eficiencia en la remoción de materia orgánica) y sociales. Se propuso un diseño en el cual se complementan distintas tecnologías: lagunas, lodos activados, reactor UASB y pozo séptico.

El estudio socioeconómico para la PTAR que se propone considera los altos costos de la energía que se requiere, también los costos de los procedimientos biológicos, y de los insumos químicos de tratamiento, también el uso de reactores. De acuerdo con esto, se deben lograr niveles de tratamiento secundario y terciario, que reduzcan la presión sobre el medio ambiente y mejoren la calidad del recurso hídrico, al aumentar la eficiencia de remoción de materia orgánica y contaminante, adoptando igualmente técnicas de reuso de aguas residuales. Los mayores costos directos de inversión se tienen cuando la tecnología aplicada son lodos activados y filtros percoladores, los cuales presentan las mayores eficiencias de remoción. También tienen los mayores costos de operación y mantenimiento, una ventaja adicional es que los costos de construcción no son los más altos y esto genera una buena relación costo-beneficio.

Recomendaciones

Los autores del proyecto se permiten hacer las siguientes recomendaciones:

En el proceso de toma de decisiones sobre las diferentes tecnologías que pueden ser implementadas en la PTAR Valledupar, emplear métodos de análisis de decisión con criterios múltiples (MADCM) que permiten considerar objetivos principales y secundarios del proyecto, seleccionar los criterios de evaluación, la escala de medición, el peso y ponderación de cada factor y así elegir la alternativa más conveniente.

Considerar el mayor número de factores de decisión en la selección de una tecnología alternativa para la PTAR, entre ellos: costos de construcción, operación y mantenimiento; calidad del efluente; problemas potenciales de olores; requerimientos de energía, confiabilidad operacional, impacto social, reducción de gases de efecto invernadero (GEI).

Referencias Bibliográficas

- [1] H. Oñate. Estado del agua del Río Cesar por vertimientos residuales de la ciudad de Valledupar. <https://www.redalyc.org>
- [2] K. Guzmán. El Río Cesar. Banco de la Republica. Documentos de trabajo sobre economía regional.
- [3] EMDUPAR. Manual de Operación y Mantenimiento del Sistema de tratamiento de Aguas residuales, plantas de tratamiento de aguas residuales “El Salguero y el Tarulla” Valledupar, Cesar, 2012.
- [4] CORPOCESAR. Resolución 0170 de 2015 por medio de lo cual se declara la emergencia ambiental en la cuenca media y baja del Rio Cesar, se adoptan medidas de emergencia ambiental y se establecen otras disposiciones.
- [5] Diario el Pilon (septiembre 6 de 2018). Planta de aireación quedó insuficiente para tratar aguas residuales de Valledupar.
- [6] C. Hernández. Diseño de planta estándar de bajo volumen para tratamiento de aguas servidas de Quito. <https://www.repositorio.uisek.edu.ec>
- [7] N. Gutiérrez; M. Mejía. Selección de tecnologías no convencional para el tratamiento de aguas residuales mediante metodologías de decisión multicriterio para la planta El Salguero, Cabecera Municipal.
- [8] C. Vargas et al. Análisis de los Principales Sistemas Biológicos de tratamiento de aguas residuales en Colombia. <https://www.scielo.es>
- [9] JA. Romero. Tratamiento de aguas residuales. Madrid: Editorial Siglo del hombre, 2015.
- [10] Colombia, Resolución 631 DE 2015. Bogotá DC. Ministerio de Ambiente y Desarrollo

Sostenible.

- [11] Colombia. Resolución 1096 de 2000. Ministerio de Desarrollo Económico. Bogotá, D.C.
- [12] Colombia. Decreto 219 de 2000. Ministerio de Desarrollo Económico. Bogotá, D.C.
- [13] Colombia. Resolución 2115 de 2007. Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá, D.C.
- [14] C. López; F. Cussó. Fundamentos físicos de los procesos biológicos. Alicante: Editorial Club Universitario.
- [15] R. Isla. Proyectos de planta de tratamiento de aguas. Madrid: Bellisco Ediciones.
- [16] G. Giraldo. Manual de análisis de aguas. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- [17] INVEMAR. Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos (aguas, sedimentos y organismos). Bogotá, D.C.
- [18] A. Silamani. Utilidad y tipo de revisión de literatura. 2015. <https://www.scielo.isciii.es>
- [19] C. Hart. Doing a literature review. London: Sage Publication.
- [20] J. Romero. Tratamiento de aguas residuales en Colombia, Bogotá DC; 2015
- [21] G. León. Parámetros de calidad para el uso de aguas residuales. Guía de calidad de afluentes para la protección de la salud. OMS.
- [22] Bolivia. Senasba. Guía de operación y mantenimiento de lagunas de oxidación en plantas de tratamiento de aguas residuales. La paz. 2015
- [23] J. Quintero. Manual de operación y mantenimiento del sistema de tratamiento de aguas residuales en la empresa de servicios públicos de Valledupar
- [24] S. Londoño. Guía de diseño conceptual y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales. CORNARE, 2020.
- [25] A. Orozco. Bioingeniería de aguas residuales. Teoría y práctica. ACODAL.
- [26] M. González. Remoción biológica de materia orgánica, nitrógeno y fosforo en un sistema

- anaeróbico. Revista EJA, 10; 45-53
- [27] O. Giraldo. Efectos del tratamiento de biosólidos en la planta de tratamiento El Salitre de Bogotá. Rev. Agronomía Colombiana, 12(2); 348-354.
- [28] T. Mañunga; J. Rodríguez; P. Torres. Tratamiento de agua residual en sistema de lodos activados. Rev. Ingeniería y Desarrollo, 30(2).
- [29] L. Delgadillo. Nitrógeno y fósforo removidos en aguas en microalgas. Journal of Biotechnology Reports, 11; 18-26.
- [30] EMDUPAR. Informe técnico PTAR Salguero. Valledupar, Cesar, 2023.
- [31] N. Herrán; M. Mejía. Selección de tecnología no convencional para el tratamiento de aguas residuales mediante metodología de decisión multicriterio para la planta El Salguero de la cabecera municipal de Valledupar. Bucaramanga: UDES.
- [32] F. Bustos; A. Pulido; H. Rivera. Tratamiento de aguas residuales en Colombia y sistemas bioelectroquímicos: usos y perspectivas. Bogotá: Universidad Distrital.
- [33]. A. Bodalo et al. Sistemas de tratamiento intensivos y extensivos. Murcia, España. 2012.
- [34] A. Romero. Bacterias, fuente de energía para el futuro. Tecnura, 2012, 16(3); 117.
- [35] D. Cui et al. Mutual effect between electrochemical active bacterial, electrochemical systema (BEST). 2020.
- [36] D. Becerra; D. Jaimes; Y. Moreno. Reactores UASB como técnica para el tratamiento de contaminantes de aguas residuales. IngNOVA, 1(2); 215-226.
- [37] J.D. Jojoa et al. Caracterización y modelación del comportamiento hidráulico del reactor. UASB, 2014.
- [38] A. Morán. Evaluación de un sistema anaerobio tipo UASB para el tratamiento de los lixiviados. Cali: Universidad del Valle, 2012.

- [39] J.A. Quiroga. Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala laboratorio. *Journal of Technology*, 7(2); 27-35.
- [40] J. Huartos. Análisis comparativo de tecnologías aerobias para el tratamiento de aguas residuales urbanas. Manizales: Universidad Católica de Manizales.
- [41] Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales en Colombia. Bogotá, 2004.
- [42] M.J. Page. The PRISMA 2020. Statement an update guideline for reporting systematic review. *Syst. Rev.* 2021; 10(1); 89-98.