

Diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales para la planta de beneficio animal en el municipio de Piendamó, Cauca.

Santiago Aranda Otero
Jhohan Fernando Pechene Quintana



Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Escuela de Ingeniería y Sostenibilidad
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Popayán, Cauca
2026

Diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales para la planta de beneficio animal en el municipio de Piendamó, Cauca.

Santiago Aranda Otero
Jhohan Fernando Pechene Quintana

Trabajo de grado modalidad investigación para optar al título de Ingeniero Ambiental y Sanitario

Director:

PhD. César Fernández Morantes

Codirector:

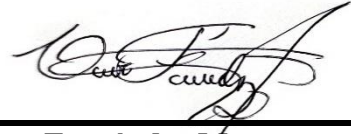
MSc. Ing. Edwin Fernando Sierra Gaviria



Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Escuela de Ingeniería y Sostenibilidad
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Popayán, Cauca
2026

Nota de aceptación

Hacemos constar que el presente trabajo de grado titulado “*Diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales para la planta de beneficio animal en el municipio de Piendamó, Cauca.*” ha sido evaluado y aprobado por la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, como requisito para optar por el título de Ingeniera Ambiental y Sanitario.



César Fernández Morantes
Director



Edwin Fernando Sierra Gaviria
Codirector

Isabella
Jurado



Juan Pablo Prado Medina
Jurado

Julio del 2026

Dedicatoria

Primero que todo darle gracias a mi Dios por haberme puesto en este camino de estudio y darme esa virtud de salir adelante y nunca rendirme, así mismo le quiero dedicar este trabajo a mis padres especialmente a ellos los cuales han sido un modelo de compromiso, fortaleza y constancia donde me han demostrado que los sueños se cumplen con dedicación y amor hacia lo que haces, incluso cuando sientes que todo no va por buen camino, con superación y constancia puedes salir adelante y superar cualquier obstáculo que se presente, les agradezco a todos dos por absolutamente todo los amo con todo mi corazón, esta tesis es por ustedes por agradecimiento de que aquí tienen a su Ingeniero ambiental y Sanitario en su casa.

Darles gracias a los profesores también los cuales fueron apoyo en este modelo de trabajo donde son los que nos inspiran hacer mejores en lo que hacemos y así mismo poder ser mejores personas en un futuro donde trabajemos y nos especialicemos.

JHOHAN PECHENE QUINTANA

Primero que todo darles gracias a mis padres por estar siempre pendientes de mí y de todo, pero también quiero darle gracias a mi abuela la cual ha sido un apoyo incondicional donde quiero agradecerle por brindarme su cariño, amor y por estar siempre conmigo, a pesar de los problemas siempre me ayudabas a buscar una solución. Este trabajo de grado es por ti abuela la cual soñabas con verme graduado y aquí estoy luchando por darte ese sueño, gracias por todo a toda mi familia los amo.

SANTIAGO ARANDA OTERO.

Agradecimientos

Primero que todo darle gracias a nuestro Dios rey celestial por guiarnos por darnos fortaleza en aquellos momentos difíciles que se nos presentaban, gracias.

En segundo lugar, Los autores expresan su reconocimiento al Gerente de la PBA del Municipio de Piendamó por su apoyo y colaboración durante nuestras visitas a la Planta y por su confianza al darnos la oportunidad de llevar a cabo este proyecto.

Gracias también por ese apoyo constante a nuestros tutores Edwin Fernando Sierra y César Fernández Morantes los cuales son un modelo que seguir donde ellos nos impulsaban a dar lo mejor de cada uno para ser mejores en lo que hacemos y por tener esa paciencia, dedicación y criterio de aliento siempre cuando parecía que no podíamos, gracias profes por poder contar con su apoyo y guía.

A nuestros padres por su amor incondicional su esfuerzo constante gracias a ellos por hacernos creer a nosotros mismos que si podemos salir adelante con sus palabras de motivación y así mismo poder valorar cada esfuerzo que ellos hacen Asia nosotros.

Este trabajo de grado es un reflejo de constancia, dedicación y amor hacia lo que hacemos, espero vean este orgullo y sientan el mismo amor que sentimos por ver este trabajo terminado y todo lo que logramos hasta aquí. Les dedicamos este logro con admiración y el cariño que se merecen a toda la Universidad gracias por acogernos y darnos sus enseñanzas en este proceso educativo Amen.

Tabla de contenido

Resumen.....	14
Abstract.....	15
Introducción	16
Capítulo I. Problema	17
1.1. Planteamiento del problema	17
1.2. Justificación.....	18
1.3. Objetivos	19
1.3.1. Objetivo General.....	19
1.3.2. Objetivos específicos	19
Capítulo II: Marco Referencial	20
2.1. Antecedentes	20
2.1.1. Antecedentes Internacionales	20
2.2. Marco conceptual	22
2.2.1. Especificaciones técnicas para una PBA	22
2.2.2. Volumen de agua residual.	24
2.2.3. Niveles de Tratamiento.....	24
2.3. Marco Legal	26
2.4. Marco Contextual	26
2.5. Clasificación de las Plantas de Beneficio Animal.....	28
Capítulo III: Metodología	31
3.1. Fase 1: Realizar un diagnóstico de las condiciones actuales de la PBA	31
3.1.1. Actividad 1. Caracterización de procesos dentro de la PBA	31
3.1.2. Actividad 2. Caracterización de las variables fisicoquímicas en el punto de vertimiento de aguas residuales provenientes de la planta de beneficio animal	32
3.1.3. Actividad 3. Análisis de parámetros fisicoquímicos	32
3.2. Fase 2: Identificación de alternativas para el tratamiento de las aguas residuales de la PBA.....	33
3.2.1. Actividad 1. Revisión documental.....	33
3.2.2. Actividad 2. Selección de tren de tratamiento	33
3.2.3. Actividad 3. Criterios e Indicadores usados para la selección de Tecnología de Tratamiento en PTAR.....	34
3.3. Fase 3: Diseño de un sistema de tratamiento de agua residuales para la remoción de carga orgánica en la PBA.....	34
3.3.1. Actividad 1. Dimensionamiento de la planta.....	34
3.3.2. Actividad 2. Viabilidad económica	34
Capítulo IV. Resultados y Discusión	36
4.1. Fase 1: Realizar un diagnóstico de las condiciones actuales de la PBA	36
4.1.1. Actividad 1. Caracterización de procesos dentro de la PBA	36
4.1.2. Actividad 2. Resultados del monitoreo del efluente	37

4.1.3. Actividad 3. Análisis de resultados	43
4.2. Fase 2: Identificación de alternativas para el tratamiento de las aguas residuales de la PBA.....	46
4.2.1. Actividad 1. Resultados de la revisión documental.....	46
4.2.2. Actividad 2. Selección del tren de tratamiento.....	58
4.3. Fase 3: Diseño del sistema de tratamiento de agua residuales alternativa Nro. 3 para la remoción de carga orgánica en la planta de beneficio animal de la PBA del municipio de Piendamó Cauca.....	59
4.3.1. Actividad 1. Dimensionamiento de la planta.....	59
4.3.2. Actividad 2. Diseño Sistema Preliminar Rejillas y Desarenador PBA Piendamó	60
4.3.3. Actividad 3. Trampa Grasas	66
4.3.4. Actividad 4. Tanque Séptico.....	70
4.3.5. Actividad 5. Diseño Sedimentador Primario PBA Piendamó	73
4.3.6. Actividad 6. FAFA	75
4.3.7. Actividad 7. Reactor Biológico PBA Piendamó	78
4.3.8. Actividad 8. Tratamiento Terciario Filtro Fito Pedológico	79
4.3.9. Actividad 9. Viabilidad económica	81
4.3.10. Actividad 10. Cálculo De Tasa Retributiva.....	84
4.3.11. Discusión	85
Capitulo V. Conclusiones y Recomendaciones	88
5.1. Conclusiones	88
5.2. Recomendaciones.....	89
Referencias.....	90

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa de ubicación del Municipio de Piendamó CAUCA	27
Figura 2. Diagrama del Tipo de PBA del Municipio Piendamó.....	30
Figura 3. Caudal Promedio del aforo de la caracterización.	39
Figura 4. Diagrama PRISMA	48
Figura 5. Porcentaje Remoción de los Tratamientos	49
Figura 6. Desarenador.....	62
Figura 7. Sistema de tratamiento diseñado para darle solución a la PBA del Municipio de Piendamó Cauca.....	87

Listade Tablas

Tabla 1. Caracterización típica de los desechos de una Planta de Beneficio Animal.....	23
Tabla 2. Volumen de desechos producidos en el beneficio de ganado bovino.....	24
Tabla 3. Volumen de agua residual.....	24
Tabla 4. Marco normativo vigente en Colombia	26
Tabla 5. Coordenadas geodésicas	27
Tabla 6. Áreas que debe tener una PBA municipal	29
Tabla 7. Criterios e Indicadores usados para la selección de Tecnología de Tratamiento en PTAR.....	34
Tabla 8. Variables in-situ del monitoreo.....	37
Tabla 9. Capacidad de la PBA de Piendamó-Cauca y sus Caudales	40
Tabla 10. Parámetros que deben medirse para cada nivel de complejidad del sistema de muestras compuestas RAS 2000	40
Tabla 11. Parámetros mínimos que deben medirse según la complejidad RAS 2000.....	41
Tabla 12. Resultados de análisis de laboratorio del agua residual de la PBA Piendamó	42
Tabla 13. Resultados de Coliformes Totales SENA	43
Tabla 14. Resultados de laboratorio y caudal medio	44
Tabla 15. Cargas contaminantes	44
Tabla 16. Clasificación de la Contaminación del Agua mediante los ICOs.....	46
Tabla 17. Categorización de los índices de contaminación ICOs.....	46
Tabla 18. Tecnología de Tratamiento, Calificación según Criterios Ambientales y Económicos.....	53
Tabla 19. Alternativa de Tratamiento N° 1.....	54
Tabla 20. Alternativa de Tratamiento N° 2.....	55
Tabla 21. Alternativa de Tratamiento N° 3.....	56
Tabla 22. Eficiencias de Alternativa Seleccionada.....	59
Tabla 23. Geometría Recomendada para desarenadores de diferente tipo.	60
Tabla 24. Criterios Desarenadores Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS.....	61
Tabla 25. Datos Generarles Diseño desarenador.	63
Tabla 26. Fórmulas para Canaleta Parshall.....	65

Tabla 27. Dimensiones de la Canaleta Parshall	65
Tabla 28. Capacidades de Retención de Grasas.....	67
Tabla 29. Caudales y Tiempos de Retención Hidráulica Típicos que se deben usar para trampa de grasas según el RAS 2000.....	67
Tabla 30. Volumen de la trampa Grasas.....	68
Tabla 31. Dimensiones características de tanques sépticos	70
Tabla 32. Requerimientos Técnicos Sistemas Sépticos.....	71
Tabla 33. Volumen Útil Sistema Séptico PBA PIENDAMÓ.....	72
Tabla 34. Dimensionamiento Sistema Séptico PBA PIENDAMÓ.....	72
Tabla 35. Concentraciones vertimientos PBA PIENDAMÓ	73
Tabla 36. Diseño Sedimentador Primario.....	74
Tabla 37. Valores recomendados para diseño de FAFA.....	75
Tabla 38. Especificaciones FAFA	76
Tabla 39. Dimensionamiento FAFA PBA PIENDAMÓ	76
Tabla 40. Diseño FAFA PBA PIENDAMÓ	77
Tabla 41. Concentraciones vertimientos PBA PIENDAMÓ	78
Tabla 42. Concentraciones típicas de unidades terciarias.....	80
Tabla 43. Criterios de diseño Filtro Fito pedológico	81
Tabla 44. Presupuesto de Construcción de la PTAR para la PBA del Municipio de Piendamó Cauca.....	82

Lista de anexos

Anexo 1. Área de estudio.....	94
Anexo 2. Caja de inspección	94
Anexo 3. Toma de muestras	94
Anexo 4. Punto de vertimiento para toma de muestras	94
Anexo 5. Toma de muestra.....	95
Anexo 6. Captación de la muestra	95
Anexo 7. Muestras en el laboratorio.....	95
Anexo 8. Análisis de muestras.....	95
Anexo 9. Análisis de Sólidos.....	96
Anexo 10. Muestras	96
Anexo 11. Encuesta	96
Anexo 12. Respuesta de la encuesta	100
Anexo 13. Ficha de observación.....	102
Anexo 14. Ficha de observación diligenciada	103
Anexo 15. Resultados de laboratorio SENA	105
Anexo 16. Dibujos AUTOCAD	105

Resumen

Esta investigación, buscó proponer una alternativa para el manejo de aguas residuales (AR) provenientes de la Planta de Beneficio Animal (PBA) ubicada en el municipio de Piendamó, Cauca. Inicialmente, se hizo un diagnóstico sobre el funcionamiento de la PBA como punto de partida. Ahí se pudo comprender las fallas que tiene y los requerimientos que necesita. Con base en eso, se revisaron diferentes posibilidades para el manejo de las AR de la planta de beneficio animal. Ante esta realidad, se diseñó una infraestructura de tratamiento hídrico para la depuración de carga orgánica en la PBA.

En cuanto a la ruta metodológica, esta se desarrolló a partir del enfoque cuantitativo y diseño descriptivo, estructurado en tres fases. De forma que, al revisar los hallazgos obtenidos, se concluyó que, se permitió evidenciar que la planta de beneficio animal presenta deficiencias críticas en infraestructura, manejo de residuos, protocolos ambientales y mantenimiento de equipos, lo cual afecta la operación, el bienestar animal y el cumplimiento normativo; frente a ello, se identificó la necesidad de un diagnóstico como punto de partida para proponer mejoras. Finalmente, se plantearon alternativas que derivaron en el diseño de una infraestructura integral de tratamiento de AR, orientado a la depuración de carga orgánica bajo criterios técnicos y normativos, con inclusión de tecnologías modernas, aprendizaje de experiencias exitosas y participación de los actores involucrados, garantizando mayor eficiencia operativa, sostenibilidad ambiental y aprovechamiento de subproductos como lodos y biogás.

Palabras clave: Plantas de beneficio animal, Infraestructura, Aguas residuales, Carga orgánica y Remoción.

Abstract

This study sought to propose an alternative for managing wastewater from the Animal Processing Plant (APP) located in the municipality of Piendamó, Cauca. Initially, an assessment of the APP's operations was conducted as a starting point. This analysis revealed the plant's shortcomings and its specific requirements. Based on this, various options for managing the plant's wastewater were reviewed. Given these findings, a water treatment infrastructure was designed to remove organic load at the animal processing plant.

The methodological approach was quantitative and descriptive in nature, structured in three phases. Thus, upon reviewing the findings, it was concluded that the animal processing plant exhibits critical deficiencies in infrastructure, waste management, environmental protocols, and equipment maintenance, which affect operations, animal welfare, and regulatory compliance; in light of this, the need for a diagnostic assessment was identified as a starting point for proposing improvements. Finally, alternatives were proposed that led to the design of a comprehensive wastewater treatment infrastructure aimed at treating organic load in accordance with technical and regulatory criteria, incorporating modern technologies, drawing on successful experiences, and involving all stakeholders, thereby ensuring greater operational efficiency, environmental sustainability, and the utilization of byproducts such as sludge and biogas.

Keywords: Animal Waste Treatment Plants, Infrastructure, Wastewater, Organic Load, and Removal.

Introducción

Las Plantas de Beneficio Animal (PBA), también llamadas mataderos, son lugares donde se procesan especies animales las cuales han sido certificados y registradas como aptas para el consumo humano [1]. Se estima que a nivel mundial para el año 2023 en los países como Argentina, Brasil, China, Colombia, Estados Unidos y Unión Europea, el consumo de carnes superó los 40 millones de toneladas, lo cual supone una elevada generación de aguas residuales producto del faenado, principalmente, bovino [2]. De manera que, otra de las problemáticas articuladas a nivel ambiental son los altos volúmenes de aguas sin tratamiento, puesto que los PBA vierten altas cargas de contaminantes al agua [3].

En ese sentido, considerando la situación, este trabajo se propuso como objetivo principal formular una alternativa para el manejo de efluentes residuales provenientes de la PBA de Piendamó, Cauca. Así, a continuación, se presenta la investigación organizada por capítulos. En el primer capítulo se explica la problemática desde lo general hasta lo más puntual, y además se incluye la justificación junto con los objetivos.

Por otro lado, el capítulo dos se aborda el marco teórico del estudio, en especial en las bases teórico-conceptuales y legales que sustentan el tema de estudio y la problemática. Esto también aporta aspectos a considerar en el cumplimiento de los objetivos específicos. Después, en el tercer capítulo se detalla cada uno de los elementos de la metodología que sirvió como ruta significativa para el estudio. Luego, en el capítulo cuarto se muestran todos los resultados, que iniciaron con la evaluación del estado actual de la PBA, seguido por la búsqueda de opciones para el manejo de las AR de la planta de beneficio animal. Por último, se propone un diseño de una infraestructura de tratamiento hídrico para reducir la materia orgánica en la planta de beneficio animal.

Finalmente, al concluir con los resultados, se presenta el apartado de las conclusiones por cada fase y las recomendaciones que la planta podría implementar a largo plazo.

Capítulo I. Problema

1.1. Planteamiento del problema

En el contexto nacional, el panorama de la problemática de la contaminación hídrica en las PBA es similar, pues en Colombia los PBA en su mayoría tienen una operación clandestina e irregular incumpliendo así las normativas vigentes comerciales, sanitarias y de salud, colocando en peligro la salud pública y ambiental [4]. De manera que, existen otras causas que promueven el problema, como por ejemplo la falta de regulación y controles, así mismo la falta de estrategias y acciones que permitan tratar las aguas residuales producto de esta actividad. A esto se suma que, la falta de actualización tecnológica en los procesos de depuración del agua, que van a la par con los avances e innovaciones actuales, impide optimizar la eliminación de contaminantes. De implementarse dichas mejoras, se lograría una mayor remoción de impurezas y una optimización de la matriz acuática. [4].

Por otro lado, de forma similar a lo que sucede a escala mundial y nacional, el problema también se evidencia en Piendamó, Cauca, debido al mal manejo de las aguas residuales ha generado impactos negativos de contaminación en la PBA. Adicionalmente, a nivel local existe una preocupación adicional en la conexión directa del PBA con la PTAR, lo que aumenta los impactos ambientales por su funcionamiento ineficiente y deterioro [5]. Por esta razón, además de afectar al ambiente, también provoca el no cumplimiento del Decreto 1500 de 2007 que regula, supervisa y fiscaliza los productos cárnicos y sus derivados [6].

Cabe mencionar también que, dentro de esta actividad que se realiza en PBA, se estima que los residuos orgánicos y líquidos representan entre el 30% al 35% del peso total del animal sacrificado [7]. En la alta cantidad de residuos se incluye materia orgánica, sólidos totales, diferentes virus, bacterias, hongos y otros patógenos. Por esta razón, se produce una considerable contaminación del agua, así como serias afectaciones a la salud de la población y el entorno del municipio de Piendamó.

1.2. Justificación

En Colombia, el mal manejo de las AR se ha vuelto un problema crítico que tiene repercusiones ambientales significativas, como el daño a la biodiversidad, la polución ambiental y afectaciones en la salud poblacional, de manera que juntas impactan el bienestar de las personas, como en el medio ambiente [8]. En ese contexto, este estudio propone desarrollar una opción para el manejo de aguas residuales que busca minimizar las consecuencias negativas mencionadas.

La formulación de una propuesta para tratar las aguas residuales en una PBA podría generar un impacto positivo en múltiples áreas clave, como la protección ambiental, la salud de las personas, cumplimiento normativo y la sostenibilidad económica [9]. Por eso, antes de llevarse a cabo la implementación, la formulación debe mostrar de forma panorámica las realidades y el alcance. Es fundamental contar con un tratamiento eficiente para las AR, pues estas contienen contaminantes orgánicos, metales, patógenos, que empeoran la calidad del recurso hídrico. En consecuencia, un sistema de depuración puede mejorar la calidad hídrica, reducir la propagación de enfermedades y favorecer el desarrollo del territorio [10], [11]. Con base en lo anterior, este estudio presenta una mejor alternativa para el manejo de las aguas residuales contribuyendo a mejorar el estilo de vida de las personas del municipio, que según el último censo del DANE alcanza los 46 mil habitantes. Por consiguiente, el alcance de la iniciativa mejoraría el ambiente, sino que también promueve la sostenibilidad, la responsabilidad social y el acatamiento de la normatividad.

De igual forma, esta investigación tiene una un enfoque social al buscar mejorar la salud de las personas a través del sistema de manejo de AR, al mismo tiempo generar equidad al tener entornos que no impacten la salud del municipio. Adicionalmente, este estudio busca contribuir a beneficios sostenibles a nivel económico, puesto que permitiría a largo plazo minimizar los costos en la plata de tratamiento. Frente al impacto ambiental, se contribuye a la conservación del agua, la reducción de impactos ambientales y el impulso de prácticas sostenibles.

Finalmente, la formulación no solo abordará el problema específico en Piendamó, sino que también puede servir como referencia para otras regiones con desafíos similares, promoviendo prácticas de tratamiento de aguas residuales más efectivas y sostenibles en la industria de beneficio animal.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Diseñar la planta de tratamiento de aguas residuales para la Planta de beneficio Animal del Municipio de Piendamó, Cauca.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico de las condiciones actuales de la PBA
- Identificar de alternativas para el tratamiento de las aguas PBA
- Diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales para la remoción de carga orgánica de la PBA

Capítulo II: Marco Referencial

2.1. Antecedentes

2.1.1. *Antecedentes Internacionales*

A continuación, se presentan los principales antecedentes relacionados con el tema de estudio, los cuales aportan elementos teóricos, metodológicos y prácticos que contribuyen al cumplimiento de los objetivos planteados.

De acuerdo con lo expuesto, el primer referente tomado en consideración fue un estudio realizado en Perú que evaluó el impacto en las aguas residuales y determinó las principales estrategias para reducir los efectos sobre la salud y bienestar de las personas [12]. Dicha investigación también planteó mejorar el sistema de depuración de AR, debido a que presentaba fallas y deterioro. Según los resultados, se propusieron alternativas para minimizar la contaminación, fortalecer los procesos y gestionar las aguas residuales, con beneficios económicos, de sostenibilidad y seguridad en la salud humana, aspectos que son relevantes en la presente investigación.

Como segundo referente se tomó otro estudio peruano que permite conocer a profundidad la problemática que generan las AR provenientes de las PBA [3]. Por lo tanto, se tienen contribuciones teóricas para la presente investigación que servirían en la propuesta de mejoramiento de la planta del municipio. Aquí mismo se reconoce que, para encontrar oportunidades de mejora, se requiere iniciar con un diagnóstico que muestre las realidades. De ahí se categorizan los elementos de mayor importancia para se pueda desarrollar la alternativa de mejora. Se determinó desde los resultados que se requieren reactores anaerobios para el tratamiento de las aguas residuales, además de ajustes innovadores de gestión de residuos y nuevas prácticas en las plantas de beneficio ambiental.

Dicho estudio reporta, por ejemplo, que en determinadas regiones los efluentes de estas plantas superan en más del 60 % los límites permisibles de DBO y DQO, lo que evidencia un riesgo ambiental significativo para cuerpos de agua receptores. Estos hallazgos ofrecen contribuciones teóricas y prácticas relevantes para la presente investigación, ya que permiten identificar tecnologías y prácticas de tratamiento que podrían aplicarse en la planta del municipio de Piendamó. El estudio enfatiza que, para encontrar oportunidades de mejora, es indispensable

iniciar con un diagnóstico exhaustivo que revele las condiciones reales; a partir de ello, se categorizan los elementos más críticos para desarrollar la alternativa de optimización. Entre las soluciones propuestas destacan el uso de reactores anaerobios para el manejo de aguas residuales, la implementación de ajustes innovadores en la gestión de residuos y la adopción de nuevas prácticas operativas en las PBA, elementos que resultan clave para la propuesta de mejora local.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

El tercer referente asocia un estudio nacional relacionado con el tema de la investigación que resalta la importancia de gestionar y administrar las PTAR, especialmente en ambientes donde se desarrollan las actividades ganaderas, puesto que afecta al ambiente la salud humana, y podría incurrir en incumplimientos de normativas que buscan generar equilibrio y sostenibilidad en esta práctica comercial [13]. Dentro de los principales hallazgos se determina que, con un buen funcionamiento de las plantas, se mejoran las condiciones de agua, se aprovechan los residuos y se cumplen los sistemas de seguridad y de normatividad. En consecuencia, la investigación genera aportes relevantes que servirán a nivel práctico y metodológico para el diseño de sistema de depuración de agua residuales para la remoción de carga orgánica en la planta de beneficio animal. En otras palabras, se obtienen aportes teóricos y específicos para la implementación de un nuevo sistema que optimice las condiciones generales de la comunidad.

2.1.3. Antecedentes Locales

Finalmente, como referente local, se tomó el estudio que reconoce los problemas territoriales presentes en la operación de la planta de aguas residuales de la Vereda Florida, así como en el Centro de Sacrificio de Piendamó. En estos lugares, se demuestran diferentes impactos ambientales y de salud, junto con otros aspectos que muestran la necesidad de realizar cambios en el manejo de las aguas residuales. La investigación, además, tiene aportes que van desde la comprensión del problema, aportes teóricos, ajustes metodológicos y otras acciones para consolidar una mejor gestión de las aguas residuales según las necesidades y realidades contemporáneas del municipio[14].

Este referente local reviste especial importancia para el presente estudio, ya que aporta evidencias directas del contexto donde se desarrollará la propuesta de mejora, permitiendo vincular los hallazgos teóricos y técnicos con la realidad operativa de Piendamó. Asimismo, facilita la

identificación de brechas tecnológicas y de gestión que, al ser abordadas, podrían generar un efecto favorable tanto en la calidad ambiental como en la salud pública de la población.

2.2. Marco conceptual

Una PTAR es un conjunto que integra varias unidades hidráulicas conforme a estándares definidos, cuya finalidad es devolver al entorno una masa de agua residual depurada que no afecte las fuentes hídricas receptoras.

2.2.1. Especificaciones técnicas para una PBA

La PBA debe estar ubicada a una distancia mínima de 500 m del límite urbano. Debe contar con el suministro de agua óptima para consumo, abastecimiento de energía eléctrica, un sistema para la evacuación de los residuos y vías de acceso adecuadas.

Es importante destacar los permisos previos para la construcción de una planta de depuración para tratar las aguas residuales proveniente de una PBA, los cuales son de vital importancia. Entre ellos se encuentra la autorización de construcción emitida por el Servicio Seccional de Salud [1].

Los rangos de volumen de agua disponible deberán ser de:

- 500 - 1200 litros por cada bovino que se sacrifique.
- 250 - 500 litros por cada porcino que se sacrifique.
- 200 - 300 litros por cada ovino o caprino que se sacrifique.
- Distribuidas de la siguiente manera:
- Consumo pre-mortem: 15%.
- Consumo desuello, lavado carne en canal, paredes y pisos: 25%
- Consumo lavado estómagos, barrido contenido ruminal, lavados cueros: 15%
- Consumo lavado tripas y vísceras, sancochado de mondongo: 20%
- Lavados con sales: 5%
- Lavado de instrumentos y utensilios: 5%
- Perdida de agua: 15%

Para determinar la carga contaminante de las AR de una planta de beneficio, se puede emplear el concepto de la población equivalente, el cual vincula dicha carga con la cantidad de personas que se requieran para aportar desechos de subproductos y el contenido de mucosa intestinal típicos generados son:

Tabla 1

Caracterización típica de los desechos de una Planta de Beneficio Animal

Fuente de información	Tipo de instalación	DBO₅ mg/L	Sólidos suspendidos mg/L
Ramseir	Plantas de Sacrificio en Gral.	2530	1040
Nemerow	Plantas de Sacrificio en Gral.	996-1200	820
Derpich	Plantas de Sacrificio en Gral.	1005	-
Martínez	Planta de Sacrificio en Gral.	2300-3200	500-7000
D A M A	Planta de sacrificio en Gral.	3500-5500	930-3000

Nota. Elaboración propia

Las características del afluente de la PBA de Piendamó presentan particularidades poco inusuales según la información de la tabla anterior. En la variable Sólidos suspendidos se registró una concentración de 11762 mg/l durante la caracterización, este valor es muy superior a los típicos reportados por Quiroga Tapias en su caracterización típica de los desechos de una PBA. Esto obedece a que los pisos de las diferentes áreas no cumplen con lo exigido según la Resolución 2674 de 2013: “impermeables, no absorbentes, lavables y antideslizantes”. Esta situación ocasiona que durante los procesos de limpieza se arrastre material como arenas, gravas y tierra.

Tabla 2*Volumen de desechos producidos en el beneficio de ganado bovino*

Descripción	DBO₅ Kg /l	DQO Kg. /l
Sangre	1.7	2.3
Rumen	5.0	7.2
Desechos en corrales	2.0	2.6
Contenido de mucosa	1.7	2.1
TOTAL	10.4	14.7

Nota. Elaboración propia en base a la planta de sacrificio de ganado Guillermo Quiroga T. [15]

2.2.2. Volumen de agua residual.

Los caudales específicos de agua residual por cada unidad de ganado sacrificado presentan variaciones significativas, varían considerablemente, las cuales dependen de las condiciones operativas de cada matadero, así como de los procesos utilizados y del volumen que se emplean en el sacrificio. Para establecer los valores de referencia de una planta de sacrificio modelo es muy importante considerar el agua residual generada durante limpieza general. Los datos presentados en la Tabla 3 valores ofrecen una aproximación de las cantidades correspondientes.

Tabla 3*Volumen de agua residual*

Descripción	m³ /res
Sacrificio de una unidad de ganado mayor	0.5-1 2
Beneficio de una unidad de ganado menor	1.0-1.5
Separación de mucosidad intestinal de una unidad de ganado	002-005

Nota. Elaboración propia en base al Departamento Nacional de Planeación

2.2.3. Niveles de Tratamiento.

Corresponden al conjunto de procesos y operaciones que se integran y complementan para alcanzar distintos niveles de tratamiento del recurso hídrico. Es decir, permiten definir el nivel de

depuración requerido antes de reutilizar o verter las AR al ambiente. Con base en estos aspectos fundamentales, es viable clasificar las distintas operaciones y procesos necesarios para lograr el nivel de depuración en las siguientes fases:

2.2.3.1. Tratamiento Preliminar.

Se entiende como la etapa de remoción de sólidos gruesos presentes las AR, los cuales pueden generar inconvenientes en el mantenimiento y operación de los equipos y unidades de tratamiento. Como ejemplos de pretratamiento se pueden nombrar: el desbaste para retirar sólidos de gran tamaño, la flotación para separar de grasas y aceites, y el desarenado para extraer arenas, entre otros [9].

2.2.3.2. Tratamiento Primario.

En esta fase del tratamiento primario de AR se retira una fracción de los sólidos suspendidos y de la materia orgánica. Dicha remoción normalmente se realiza mediante operaciones físicas como el tamizado y la sedimentación. La función principal del tratamiento primario es servir como paso previo al tratamiento secundario [9].

2.2.3.3. Tratamiento Secundario.

Esta fase está orientada en remover los sólidos suspendidos y de los compuestos orgánicos biodegradables. Comprende procesos biológicos como los lodos activados, la digestión anaerobia, los sistemas de lagunaje y la sedimentación. En ocasiones se incluye la desinfección dentro del tratamiento secundario [4].

2.2.3.4. Tratamiento Terciario.

Finalmente, esta fase corresponde al nivel de depuración requerido para tratar parámetros específicos de las aguas residuales que requieren atención prioritaria, tales como nutrientes, compuestos tóxicos y los excesos de materia orgánica, o de sólidos en suspensión. Su propósito es recuperar el agua residual y habilitarla para otros usos [7].

2.3. Marco Legal

La presente investigación se sustenta a través de diferentes normativas que son de base para la ejecución de cada una de las actividades y las fases propuestas en el estudio.

Tabla 4

Marco normativo vigente en Colombia

Ley/decreto/ resolución	Contenido	
Resolución 0330 del 2017	Define los requisitos técnicos obligatorios para la planeación, diseño, construcción, operación, mantenimiento y rehabilitación para la infraestructura de acueducto, alcantarillado y aseo.	[16]
Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)	Establece las exigencias obligatorias para la formulación, diseño, construcción y operación de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo en Colombia	[17]
Resolución 0631 del 2015	Fija los parámetros y los valores máximos permisibles para el vertimiento de aguas residuales para las PBA de forma puntual a cuerpos de agua superficiales y los sistemas de alcantarillado público.	[18]

Nota. Elaboración propia.

2.4. Marco Contextual

El proyecto de Diseño - investigación se llevó a cabo en el Municipio de Piendamó, Departamento de Cauca, tal como se ilustra en la Figura 1.

Figura 1

Mapa de ubicación del Municipio de Piendamó CAUCA



Nota. Extraída de Google

El municipio de Piendamó está localizado en la subregión central del Departamento del Cauca, a 2°38" latitud Norte y 76°30" longitud Oeste. Se ubica en la zona media de la región montañosa perteneciente a la subcuenca del río Piendamó, sobre la vertiente occidental de la cordillera Central.

Tabla 5

Coordenadas geodésicas

Coordenadas geodésicas	
Longitud Oeste	76° 31' 48" O
Latitud Norte	2° 38' 27" N

Nota: Elaboración propia

LIMITES:

Piendamó limita al norte con Caldon, al sur de Cajibío, al oriente con el municipio de Silvia, y al occidente con de Morales. La extensión total del municipio de Piendamó es de 197 km², de los cuales 30 km² corresponden al área urbana y 147 km² al área rural representa.

Datos importantes del municipio de Piendamó Cauca

- Temperatura media de 18° C.
- Distancia de referencia a Popayán de 25 km y a Cali de 100 k
- Altitud: 1685 m.s.n.m

2.5. Clasificación de las Plantas de beneficio Animal

El Decreto 1036 de 1991 define la clasificación de las plantas de beneficio animal de acuerdo con su administración:

- PBA públicos: Corresponden a plantas de carácter oficial o municipal.
- PBA parcelares: Son de propiedad y gestión privada o arrendatarios particulares.
- PBA regionales: Son mataderos de propiedad y administración municipal a los que se les asigna una zona geográfica específica. Su funcionamiento busca evitar la proliferación de pequeños mataderos se planifican a partir de un esquema de regionalización sustentado en estudios técnicos económicos. También pueden clasificarse según la especie: ovinos, porcinos, bovinos, cárnicos, equino, de conejos y animales producto de caza.

Según la anterior descripción la PBA del municipio de Piendamó, se clasifica en una PBA pública, de carácter oficial o municipal, y debe contar con las siguientes áreas como se presenta en la Tabla 6:

Tabla 6*Áreas que debe tener una PBA municipal*

Categoría IV	
Los mataderos clasificados en la Categoría IV deben contar con una capacidad instalada para el sacrificio de 40 bovinos y 40 porcinos en turno de 8 horas. Adicionalmente, deberán contar de las siguientes áreas:	Áreas
	Área de protección sanitaria
	Vías de acceso, zona de cargue y descargue
	Corrales de sacrificio
	Sala de sacrificio separada según especie
	Red aérea para el sacrificio y faenado de los animales
	Área para proceso de vísceras blancas
	Área para cabezas y patas
	Área para almacenamiento de pieles
	Estercolero
	Sistema de tratamiento de aguas residuales
	Tanques para reserva de agua potable

Nota. Elaboración propia

A continuación, en el siguiente Figura se describe el diagrama del tipo de PBA del municipio de Piendamó.

Figura 2

Diagrama del Tipo de PBA del Municipio Piendamó.



Nota. Elaboración propia

Capítulo III: Metodología

A continuación, se describe la ruta metodológica de la investigación asociada con los objetivos. Sin embargo, es significativo mencionar que, la metodología planteada se asocia con un enfoque cuantitativo ya que no se profundiza en la interpretación de resultados de una problemática social o los hace participativos, por el contrario, se plasma una visión de medición; dicho esto, el diseño se estableció descriptivo, dando respuesta y análisis a los datos encontrados y con propuesta de mejoras que beneficien al territorio en general.

3.1. Fase 1: Realizar un diagnóstico de las condiciones actuales de la PBA

3.1.1. Actividad 1. Caracterización de procesos dentro de la PBA

Para la recopilación de datos se aplicaron instrumentos dirigidos al personal operativo y administrativo, con el fin de identificar los recursos utilizados, la duración de las operaciones y el número de trabajadores requerida para cada actividad. Para ello, se aplicó una encuesta diseñada y adaptada a las variables definidas previamente (ver Anexo 11), la cual buscaba recolectar información directa sobre la administración y desarrollo de los procesos. De manera complementaria, se empleó una ficha de observación (ver Anexo 13) para registrar de forma sistemática las condiciones reales de trabajo, contrastando los datos obtenidos en la encuesta con la evidencia observada en campo.

En primer lugar, para tener un análisis y comprensión de las realidades de los empleados se realizó una encuesta (Ver anexo 11) y la ficha de observación (Ver anexo 13). Esto permitió comprender el panorama general del estado actual de la PBA y definir un punto de partida para el cumplimiento de los objetivos específicos planteados.

De acuerdo con lo expuesto, es importante subrayar que, para ejecutar las actividades principales de la planta siendo el sacrificio de bovinos, los principales recursos utilizados son la energía, el agua y productos de aseo y desinfección; cabe mencionar que, de acuerdo con el análisis de las realidades de la planta, esta realiza menos de 10 sacrificios a la semana, que requieren más de 10 trabajadores para el proceso que dura entre 3 a 5 horas.

3.1.2. Actividad 2. Caracterización de las variables fisicoquímicas en el punto de vertimiento de aguas residuales provenientes de la planta de beneficio animal

- **Primera parte (Determinación del caudal)**

La toma de la muestra se consideró representativa, ya que su recolección *in-situ* se realizó de forma compuesta según el RAS 2000 (E.2.3.1.2). Asimismo, el aforo de las muestras consistió en la evaluación *in situ* de las variables pH, temperatura, conductividad y caudal, además de la toma de muestras compuestas durante ocho (8) horas con alícuotas cada veinte (20) minutos, según el RAS 2000 (E.2.3.2.4). También se calcularon el caudal Máximo Diario y caudal Medio.

- **Segunda parte (Muestreo)**

En esta etapa se realizó el muestreo tomando puntos de referencia ubicados en el tanque séptico y en la caja de inspección final de la PBA. Es importante mencionar que el procedimiento se desarrolló atendiendo los lineamientos descritos en la Guía para la Toma de Muestras de Aguas Residuales del IDEAM [19], con el objetivo de obtener muestras representativas y de calidad para el análisis posterior.

- **Tercera parte (Análisis de Laboratorio)**

Los parámetros de análisis se definieron en base al artículo 9 de la Resolución 0631 de 2015 [18], con el propósito de evaluar la calidad del vertimiento de aguas residuales de la PBA. Se determinaron: pH con pH-metro de mesa modelo S220; la turbidez se midió con el turbidímetro portátil modelo 2100Q; conductividad eléctrica con conductímetro portátil; DBO₅ mediante método SM 5210 B [20]; DQO con digestión cerrada y lectura colorimétrica según SM 5220 D [20]; SST y SDT mediante métodos gravimétricos SM 2540 B y SM 2540 C, respectivamente; sólidos sedimentables según SM 2540 F [20].; y coliformes totales por el método del Número Más Probable (NMP) según SM 9221 B [20]. Todos los análisis se efectuaron en la sede de laboratorio de Ciencias Ambientales de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca bajo condiciones controladas, siguiendo los protocolos de APHA (2017) y asegurando la trazabilidad de los resultados.

3.1.3. Actividad 3. Análisis de parámetros fisicoquímicos

Los resultados obtenidos en el laboratorio fueron comparados con los valores máximos permitidos y establecidos en la Resolución 0631 de 2015 para cada uno de los ensayos realizados.

El propósito fue evaluar e identificar el grado de cumplimiento de la normatividad ambiental aplicable a este vertimiento [18]. De igual forma, se calcularon los índices de la calidad del recurso hídrico ICOMO (Índice de Contaminación por Materia Orgánica) e ICOSUS (Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos), siguiendo las fórmulas reportadas por Ríos y Cano [19], respectivamente. Estos indicadores fueron seleccionados por su capacidad de sintetizar en un solo valor el estado de contaminación orgánica y de sólidos, lo cual permite simplificar la interpretación de resultados y definir prioridades en las medidas correctivas.

3.2. Fase 2: Identificación de alternativas para el tratamiento de las aguas residuales de la PBA

Para cumplir con el objetivo específico de diseño se implementó una metodología secuencial. Ejecutándose de la siguiente manera:

3.2.1. Actividad 1. Revisión documental

Partiendo de la ruta metodológica se partió de una revisión documental tomando como base los principales sistemas de tratamiento de agua residual proveniente de PBA en Colombia y el exterior en donde se tuvo en cuenta los años de publicación no superiores a cinco años, adicionalmente se consideraron en cuenta revistas, trabajos de grado e investigaciones publicadas en plataformas de búsqueda como Scielo, Scopus y Science Direct. Para ello se consideran parámetros como porcentajes de remoción de carga contaminante, disponibilidad tecnológica [10], búsqueda de los métodos más eficientes en cada uno de los tratamientos (pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario.) para dar cumplimiento al objetivo específico de identificar alternativas para el tratamiento de los efluentes residuales de la PBA.

3.2.2. Actividad 2. Selección de tren de tratamiento

Según la revisión documental, descrita en la actividad anterior, se seleccionan aquellas opciones que cumplan con las condiciones de viabilidad de implementación en la PBA del municipio de Piendamó, donde se tendrán condiciones como porcentajes de remoción, disponibilidad tecnológica e inversión necesaria [11].

3.2.3. *Actividad 3. Criterios e Indicadores usados para la selección de Tecnología de Tratamiento en PTAR.*

De acuerdo con la siguiente tabla, se consideran cuatro (4) criterios pertinentes a considerar en el diseño de la PTAR de la PBA del Municipio de Piendamó, teniendo en cuenta las tres alternativas que se plantearan se seleccionar la más viable en que cumplan con los (4) criterios.

Tabla 7

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 en la planta Costo de operación y mantenimiento.
Técnico	Eficiencia en la remoción de materia orgánica (DBO5). Eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos (SST)
Social	Alteración de condiciones de vida. Concertación con comunidad aledaña.

Nota. Elaboración propia

3.3. **Fase 3: Diseño de un sistema de tratamiento de agua residuales para la remoción de carga orgánica en la PBA**

3.3.1. *Actividad 1. Dimensionamiento de la planta*

Se diseñó un sistema siguiendo la metodología estipulada por las normas que rigen en Colombia como la Resolución 0630 de 2019, de igual manera se consideran los parámetros de operación normal y anormales de la PBA de Piendamó, y lo temas técnicos que se encuentren en campo. Una vez obtenido el diseño se procedió a generar los planos y memorias de cálculo en el aplicativo AutoCAD con detalles constructivos de la tecnología sugerida para implementar en la PBA del municipio de Piendamó.

3.3.2. *Actividad 2. Viabilidad económica*

Se realizó la proyección de los costos estimados para la planta de tratamiento propuesta. Se consideró tanto la inversión inicial en obras civiles y equipos, como los gastos operativos y de

mantenimiento anuales. Para este análisis se empleó la metodología de costos de ciclo de vida (LCC), la cual permitió estimar el gasto total durante el periodo de funcionamiento de la planta. Este cálculo integró componentes tales como adquisición de tecnología, consumo energético, insumos químicos y mano de obra especializada (ISO 15686-5, 2017) [21]. Paralelamente, se efectuó el cálculo estimado del pago anual por tasa retributiva, conforme a la metodología establecida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el Decreto 1076 de 2015, Título 9) [22]. Para ello se tomaron las cargas contaminantes medidas en el muestreo y analizadas en laboratorio para DBO₅ y SST.

Capítulo IV. Resultados y Discusión

4.1. Fase 1: Realizar un diagnóstico de las condiciones actuales de la PBA

4.1.1. Actividad 1. Caracterización de procesos dentro de la PBA

Dentro de las condiciones de la planta, se logró evidenciar que actualmente no se cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales, sino que se adelantan procesos para su instalación, en especial para poder dar cumplimiento a las normativas vigentes, al tratamiento de los alimentos como a los desperdicios y todo esto desde la ética y la responsabilidad con el medio ambiente. Por tanto, se identifica que los principales residuos a manejar suelen ser orgánicos, líquidos y sólidos; ante esto, autores como Triana-Barrera afirman que, en las plantas de sacrificio se requiere de procesos que velen por mantener las mejores condiciones ambientales, ya que en el trabajo operativo se presentan más residuos asociados con restos biológicos, estiércol, sangre, entre otros que asumen contaminantes al ambiente como a la calidad de vida de los seres humanos [23].

Por otra parte, se logró identificar que, los residuos en la actualidad se entregan a una empresa externa, por lo que no se maneja internamente por falta de protocolos, experiencia y cumplimiento de las normas, de manera que, en la planta ocasionalmente se presentan capacitaciones de manejo de los residuos y de las aguas en todos los actores dentro del proceso de sacrificio, como personal operativo y administrativo. Otro elemento que se reconoció dentro de la aplicación de la encuesta es que se consideran las condiciones de higiene y seguridad como buenas; sin embargo, desde las percepciones del cumplimiento de las normas ambientales, se tiene una concepción de poco cumplidas.

Es importante subrayar además que, en este primer instrumento de recolección de datos se muestra que los aspectos que se deben mejorar en la planta suelen ser de infraestructura, el manejo de los residuos, la capacitación al personal y el cumplimiento normativo. Entonces, para complementar las realidades, percepciones y concepciones encontradas en el personal de la planta, dentro de la ficha de observación se identificó que a nivel de la estructura existe un deterioro significativo en los pisos, los corrales, las zonas de deposición de los residuos y otras circunstancias que generan daños al bienestar animal; además, de contar con equipos con deficiencias en los estados de mantenimiento que limitan la calidad del proceso.

Complementando lo expuesto, se identificó un deterioro en los tanques desde figuras y

filtraciones, hasta estabilidad estructural que aumenta la contaminación del proceso como a nivel ambiental, por lo que potencializa otros problemas como la de los olores y otros asociados a la calidad de vida del ser humano como de los ecosistemas.

4.1.2. Actividad 2. Resultados del monitoreo del efluente

Toma de la muestra.

La recolección de la muestra fue clasificada como representativa, puesto que su realizó *in-situ* mediante un muestreo compuesto, según el RAS 2000 (E.2.3.1.2).

Aforo de la muestra.

El Aforo comprendió la medición *in-situ* de las variables pH, temperatura, conductividad, caudal, toma de muestras compuestas por ocho (8) horas con alícuotas cada veinte (20) minutos, según el RAS 2000 (E.2.3.2.4).

La caracterización y el análisis de la muestra se realizaron tomando como referencia parámetros consignados en la Tabla 8. A continuación, se muestran los caudales arrojados en el aforo de la caracterización de vertimientos.

Tabla 8

Variables in-situ del monitoreo

Hora	Temperatura ° C	pH	Conductividad μS/cm	Caudal
7:00	25.2	6.3	190	0,31
7:20	25.9	6.5	180	0,28
7:40	25.3	6.6	180	0,29
8:00	25.3	6.8	182	0,41
8:20	25.1	6.7	190	0,33
8:40	25.3	6.8	190	0,28
9:00	24.3	6.9	190	0,37
9:20	24.2	6.8	180	0,31
9:40	24.9	6.9	190	0,34
10:00	25.2	6.9	230	0,36
10:20	25.7	7.0	230	0,34
10:40	25.5	7.1	220	0,29

11:00	25.6	7.1	230	0,29
11:20	25.5	6.9	240	0,31
11:40	25.3	6.9	250	0,34
12:00	25.4	6.9	220	0,31
12:20	25.1	7.0	270	0,33
12:40	25.6	7.1	230	0,32
13:00	25.6	7.0	290	0,29
13:20	25,6	7,1	280	0,35
13:40	25,1	7,1	210	0,29
14:00	25.6	7.0	290	0,3
CAUDAL PROMEDIO				0,32

Nota. Elaboración propia basándose en el reporte de la CRC

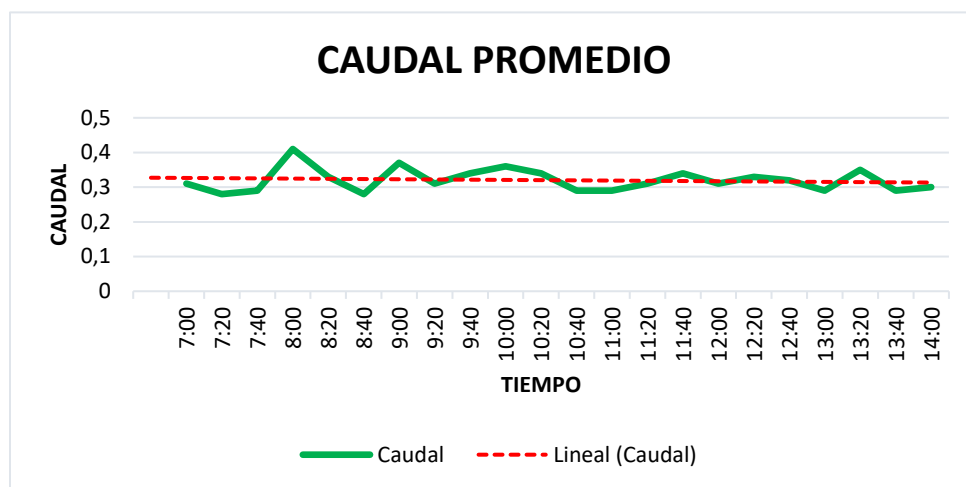
Basado en lo expuesto, el muestreo fue compuesto por tiempos según las funciones operativas de la metodología como del PBA, por eso, se tomaron muestras con intervalos regulares en variaciones horarias del vertimiento y se depositaron las mismas en recipientes acondicionados para su conservación refrigerada en cumplimiento de la normativa y así evitar alteraciones de sus características fisicoquímicas antes del análisis.

Para complementar lo expuesto, el procedimiento aseguró la obtención de muestras representativas de los requisitos reales de funcionamiento de la PBA, brindando registros confiables para el análisis fisicoquímico y la posterior selección de opciones de tratamiento, datos que se organizaron y analizaron en respuesta de los objetivos previamente planteados. Posteriormente, y con el fin de alcanzar el análisis propuesto se realizó un análisis de laboratorio acorde a lo estipulado en la Resolución 0631 de 2015, particularmente en su artículo 9. En este procedimiento se evaluaron variables como pH, DBO, DQO, SST, SDT y coliformes totales, estos últimos determinados por el método del Número Más Probable (NMP).

A continuación, se grafica los 21 caudales arrojados en el monitoreo de la caracterización, y a su vez se grafica la tendencia que es igual al caudal promedio arrojada en la Tabla 8.

Figura 3

Caudal Promedio del aforo de la caracterización.



Nota. Elaboración propia

Con respecto a la Figura 3, la información más notable que se puede extraer es que la PBA de Piendamó en el horario de 8:00 a 8:30 tiene un incremento de caudal. Se pudo evidenciar en las visitas técnicas que esta situación, obedece al inicio de labores del personal, el cual incluye el lavado de diferentes áreas, incrementándose el consumo de agua.

CAUDAL MÁXIMO DIARIO DE AGUA RESIDUAL

- VAR= Volumen de Agua Residual = $1.2 \text{ m}^3 / \text{bovino}$
- T= Tiempo de Sacrificio animal = 2.5 horas / bovino

$$Q_{max} = \frac{1.2 \text{ m}^3 * 1000 \text{ l} * 36 \text{ bovinos}}{2.5 \text{ h} * 60 \text{ min} * 60 \text{ s}} = 4.8 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

$$Q_{max} = 4.8 \text{ l/s} * 3600 \text{ s} * 24 = 41.4 \text{ m}^3 \text{ dia}$$

CAUDAL MEDIO DIARIO

$$Q_{max} = 3 * Q_{medio} = \frac{41.4}{3} = 13.8 \text{ m}^3$$

$$Q_{medio} = 13.8 \text{ m}^3$$

Tabla 9*Capacidad de la PBA de Piendamó-Cauca y sus Caudales*

PBA	CAPACIDAD DE SACRIFICIO	CAUDAL MÁXIMO DIARIO DE AGUA RESIDUAL	CAUDAL MEDIO DIARIO DE AGUA RESIDUAL
UNIDADES	BOVINOS	m3/día	m3/día
PIENDAMÓ	36	41.4	13.8

Nota. Elaboración propia

- **Transporte de la muestra.**

Se realizó según las recomendaciones de preservación, transporte al laboratorio y análisis respectivos a través del Laboratorio Ambiental de la Corporación Autónoma Regional del Cauca.

Tabla 10

Parámetros que deben medirse para cada nivel de complejidad del sistema de muestras compuestas RAS 2000

Nivel	Parámetro
Bajo	DBO ₅ total y soluble, sólidos suspendidos, disueltos y sedimentables, DQO soluble y total, nitrógeno total Kjeldahl, fósforo (soluble y particulado)
Medio	DBO ₅ total y soluble, sólidos suspendidos, disueltos y sedimentables, DQO soluble y total, nitrógeno total Kjeldahl, fósforo (soluble y particulado)
Medio alto	DBO ₅ total y soluble, sólidos suspendidos, disueltos y sedimentables, DQO soluble y total, fósforo (soluble y particulado), aceites, detergentes, grasas y nitrógeno total Kjeldahl
Alto	DBO ₅ total y soluble, sólidos suspendidos, disueltos y sedimentables, DQO soluble y total, nitrógeno total Kjeldahl, fósforo (soluble y particulado), aceites y grasas, fósforo, metales pesados: Cd, Pb, Cr, Ni, Zn, Hg, Cu, Ag y sustancias orgánicas volátiles, cloruros, detergentes

Nota. Tomada del RAS Tabla (E.2.3.)

La caracterización de vertimientos se basó en los parámetros mínimos que deben medirse para cada nivel de complejidad según el RAS 2000

Tabla 11

Parámetros mínimos que deben medirse según la complejidad RAS 2000

Parámetro	Bajo	Medio	Medio alto	Alto
Oxígeno disuelto	X	X	X	X
DBO ₅				
Soluble	X	X	X	X
Total	X	X	X	X
SS				
SST	X	X	X	X
SSV	X	X	X	X
DQO				
Soluble	X	X	X	X
Total	X	X	X	X
NITRÓGENO				
Total	X	X		
Orgánico				X
Soluble				X
Particulado				
Amoniacal				X
Soluble				X
Particulada				X
Nitritos				X
Nitratos				
FOSFORO TOTAL				
Soluble	X	X	X	X
Particulado	X	X	X	X
CLORUROS			X	X
ALCALINIDAD				X
ACEITES Y GRASAS			X	X
COLIFORMES				
Fecales			X	X
Totales			X	X
PH	X	X	X	X
ACIDEZ	X	X	X	X
DETERGENTES			X	X

Nota. Tomada del RAS Tabla (E.2.5.)

Los resultados obtenidos en la caracterización de vertimientos, realizada en el laboratorio de Ciencias Ambientales de la Corporación Autónoma Regional del Cauca fueron los siguientes:

Tabla 12*Resultados de análisis de laboratorio del agua residual de la PBA Piendamó*

<i>Variable</i>	<i>Método</i>	<i>Resultados</i>	<i>Unidades</i>
Detergentes	Kit comercial	2.8	mg/L
Grasas y Aceites	SM5520D	8.6	mg/L
Cloruros	Kit comercial	0.39	mg/L de CL
Dureza total	SM 2340C	2.8	mg/L de CA CO ₃
Nitrógeno Total	Kit comercial	<5	mg/L
Nitrógeno Amoniacal	Kit comercial	1.4	mg/L
Calcio	SM 2340B	6.99	mg Ca/L
pH a 18 °C	Kit comercial	5.7	UND
Alcalinidad	SM 2320B	124	mg/l de Ca CO ₃ /L
Turbiedad	SM 2130 B	18.99	UNT
Conductividad	Kit comercial	0.44	mS
Aluminio	Kit comercial	0.533	mg/L
Cobre	Kit comercial	0	mg/L
Zinc	Kit comercial	3	mg/L
Hierro	SM 3112 B	10.34	mg/L
Magnesio	Kit comercial	115.22	mg/L
DBO	SM5210B/SM4500-OG	1419	mg/L
DQO	SM5220D	2671	mg/L
SST	SM2540D	11762	mg/L

Nota. Tomada del reporte de la CRC

Los parámetros obtenidos en el laboratorio fueron del afluente, ya que la PBA de Piendamó no cuenta con un Sistema de tratamiento para tratar los vertimientos de las actividades diarias, estos son descargados al alcantarillado domestico sin previo tratamiento.

4.1.3. Actividad 3. Análisis de resultados

En la Tabla 13 se relacionan los resultados de laboratorio para coliformes totales reportados por SENA.

Tabla 13

Resultados de Coliformes Totales SENA

Parámetro	Resultado (UFC/100mL)	± U
Coliformes Totales (Cuantitativo)	2.2E+06	N.R.
<i>Escherichia Coli</i> (Cuantitativo)	1.6E+06	N.R.

Nota. Elaboración propia. Abreviaturas: (NA) No Aplica (N.R) No Reporta (<) Reporte menor al límite de cuantificación del método (± U) Incertidumbre.

La tabla 13 muestra los resultados reportados en el Laboratorio de Análisis Ambientales Centro de Teleinformática y Producción Industrial del SENA. Fuente: SENA número de registro COT-030625-10-001 (2025).

4.1.3.1. Cargas contaminantes. La carga contaminante diaria (Cc) definida por el Decreto 2667 de 2012, corresponde al producto entre el caudal promedio y la concentración de una sustancia, elemento o parámetro contaminante. Este valor se multiplica por un factor de conversión de unidades y por el tiempo diario de vertimiento del usuario, expresando en horas por día, es decir:

$$Cc = Q * C * 0.0036 * t \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

Cc = Carga Contaminante, en kilogramos por día (Kg/día)

Q = Caudal promedio de aguas residuales, en litros por segundo (L/s)

C = Concentración del elemento, sustancia o compuesto contaminante, en miligramos por litro (mg/l)

0.0036 = Factor de conversión de unidades (de mg/s a kg/h)

t = Tiempo de vertimiento del usuario, en horas por día (h)

Según los resultados de laboratorio y el caudal medido en campo, se calculó la carga contaminante en Kg/día de los vertimientos según las variables DBO, SST DQO y GyA.

Tabla 14

Resultados de laboratorio y caudal medio

Sitio de Muestreo	Caudal medio (L/s)	Concentración			
		DBO5	SST	DQO	GyA
Vertimiento PBA	0.32	1419	11762	2671	8.6

Nota. Elaboración propia.

Tabla 15

Cargas contaminantes

Sitio de Muestreo	Variable: Carga contaminante (Kg/día)			
	DBO5	SST	DQO	GyA
Vertimiento PBA	39.2	325.1	73.8	0.23

Nota. Elaboración propia.

Según los resultados, se evidencia una elevada carga bacteriológica al encontrar un total de coliformes de 2,2E+06 UFC/100mL y de *Escherichia Coli*: 1,6E+06 UFC/100mL; por lo que, las muestras muestran riesgos críticos para la salud ambiental y para los seres humanos. Los resultados entonces demuestran un incumplimiento en la norma vigente de la resolución 0631 de 2015 al superar los límites de coliformes establecidos, paralelamente demuestra que no se tiene un tratamiento de AR adecuados, lo que demuestra una necesidad urgente en establecerlo.

Por tanto, se ratifica la importancia de diseñar e implementar un sistema de manejo de AR eficiente, que logre remover reducir la carga orgánica y microbiológica previo a su vertimiento. Este diagnóstico inicial constituye insumo técnico fundamental para la selección de las tecnologías adecuadas en la siguiente fase del proyecto.

Además, como parte de la evaluación integral, se realizaron los cálculos de los indicadores ICOMO e ICOSUS, que permitieron valorar la calidad del agua y su capacidad de autodepuración, así como el impacto potencial en cuerpos receptores, reforzando el criterio técnico para el diseño del tratamiento.

4.1.3.2. Cálculo indicadores calidad del agua. Adicionalmente, se calcularon los indicadores de calidad del agua ICOMO e ICOSUS, siguiendo las fórmulas reportadas por Ríos et al. (2018) y Cano et al. (2016) [19], respectivamente. Estos indicadores fueron seleccionados por su capacidad de sintetizar en un solo valor el estado de contaminación orgánica y de sólidos, permitiendo la interpretación de resultados y la priorización de medidas correctivas.

4.1.3.2.1. Índice de contaminación por materia orgánica ICOMO. El ICOMO se determina considerando las variables fisicoquímicas: Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), Coliformes Totales y porcentaje de saturación de oxígeno. La DBO₅ permite estimar la cantidad de materia orgánica degradada por microorganismos presentes en una muestra líquida. El porcentaje de saturación de oxígeno mide la cantidad de oxígeno disuelto en el agua en relación con la cantidad máxima posible a una misma temperatura y presión. Los coliformes totales corresponden a los grupos bacterianos que se identifican mediante pruebas en condiciones de aislamiento. El cálculo del ICOMO se realiza mediante las siguientes expresiones:

$$ICOMO = 1 / 3 (IDBO5 + I Colif. Total + I Oxígeno) \quad \text{Ec. 2}$$

$$I Colif. Total = -1,44 + 0,56 * \log_{10} (Colif Total)$$

$$I Colif. Total = 2.11$$

Nota: En los anexos se logra evidenciar los cálculos obtenidos para los resultados de coliformes totales

$$ICOMO = 1 / 3 (IDBO5 + I Colif. Total + I Oxígeno)$$

$$ICOMO = 1.7712$$

4.1.3.2.2. Índice de contaminación por sólidos Suspendidos ICOSUS. Para determinar este índice se requirieron los valores de concentración de sólidos suspendidos, los cuales se asocian con compuestos inorgánicos y material particulado visible. Una de las principales causas de la presencia de este parámetro son las actividades de tipo extractivo. El cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$ICOSUS = -0,02 + 0,003 * Sólidos Suspendidos \quad \text{Ec. 3}$$

Nota: En los anexos se logra evidenciar los cálculos obtenidos para los resultados de ICOMO-ICOSUS

$$ICOSUS = 35.266$$

La clasificación de la calidad del recurso hídrico generada por los procedimientos de la PBA de Piendamó según los valores obtenidos se representa en la Tabla 16 [30].

Tabla 16

Clasificación de la Contaminación del Agua mediante los ICOs.

Valor de ICO	Clasificación de la contaminación
0 – 0.2	Muy Baja
0.2 – 0.4	Baja
0.4 – 0.6	Media
0.6 – 0.8	Alta
0.8 – 1.0	Muy Alta

Nota. Elaboración propia guiada por CETESB 2002.

Tabla 17

Categorización de los índices de contaminación ICOs

Índice de contaminación	Sigla	Valor arrojado	Clasificación de la contaminación
Sustancias orgánicas	ICOMO	1.7712	Muy Alta
Sólidos suspendidos	ICOSUS	35.266	Muy Alta

Nota. Elaboración propia.

4.1.3.2.3. Conclusiones de los resultados obtenidos de los Índices de contaminación.

A partir de los resultados de cada uno de los índices de contaminación, los cuales se resumen en la Tabla 13, se puede establecer que la masa de agua de la PBA de Piendamó presenta un nivel de contaminación muy alto. Esta condición evidencia la necesidad de diseñar un tren de tratamiento robusto que asegure el cumplimiento de la norma vigente, establecida en la Resolución 0631 del 2015.

4.2. Fase 2: Identificación de alternativas para el tratamiento de las aguas residuales de la PBA

4.2.1. Actividad 1. Resultados de la revisión documental

Con base en la ruta metodológica definida, se llevó a cabo una revisión documental. Esta

se enfocó en los principales sistemas de manejo de agua residual proveniente de PBA en Colombia y en el contexto internacional. Se consideraron únicamente publicaciones con una antigüedad máxima de cinco años. Además, se revisaron artículos de revistas científicas, trabajos de grado e investigaciones disponibles en bases de datos como Scielo, Scopus y Science Direct. Para la evaluación se tuvieron en cuenta parámetros como el porcentaje de remoción de carga contaminante y la viabilidad tecnológica [11]. También se buscó identificar los métodos más eficientes por cada etapa del tratamiento: pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario. Lo anterior con el fin de dar cumplimiento al objetivo específico de identificar alternativas para el manejo de las aguas residuales de la PBA.

Para ello se realizó una revisión bibliográfica de literatura científica, utilizando un diagrama PRISMA. Esto se fundamenta en un diagrama de flujo estructurado en cuatro (4) fases:

1. **Identificación:** número de registros y documentos obtenidos mediante búsqueda en bases de datos.
2. **Cribado:** número de registros excluidos por no cumplir con los criterios y filtros establecidos.
3. **Idoneidad:** número de registros elegibles que cumplen los criterios y son aptos para evaluación.
4. **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 2020 a 2025.
- Artículos publicados en idioma español e inglés.

- **Criterios de exclusión:**

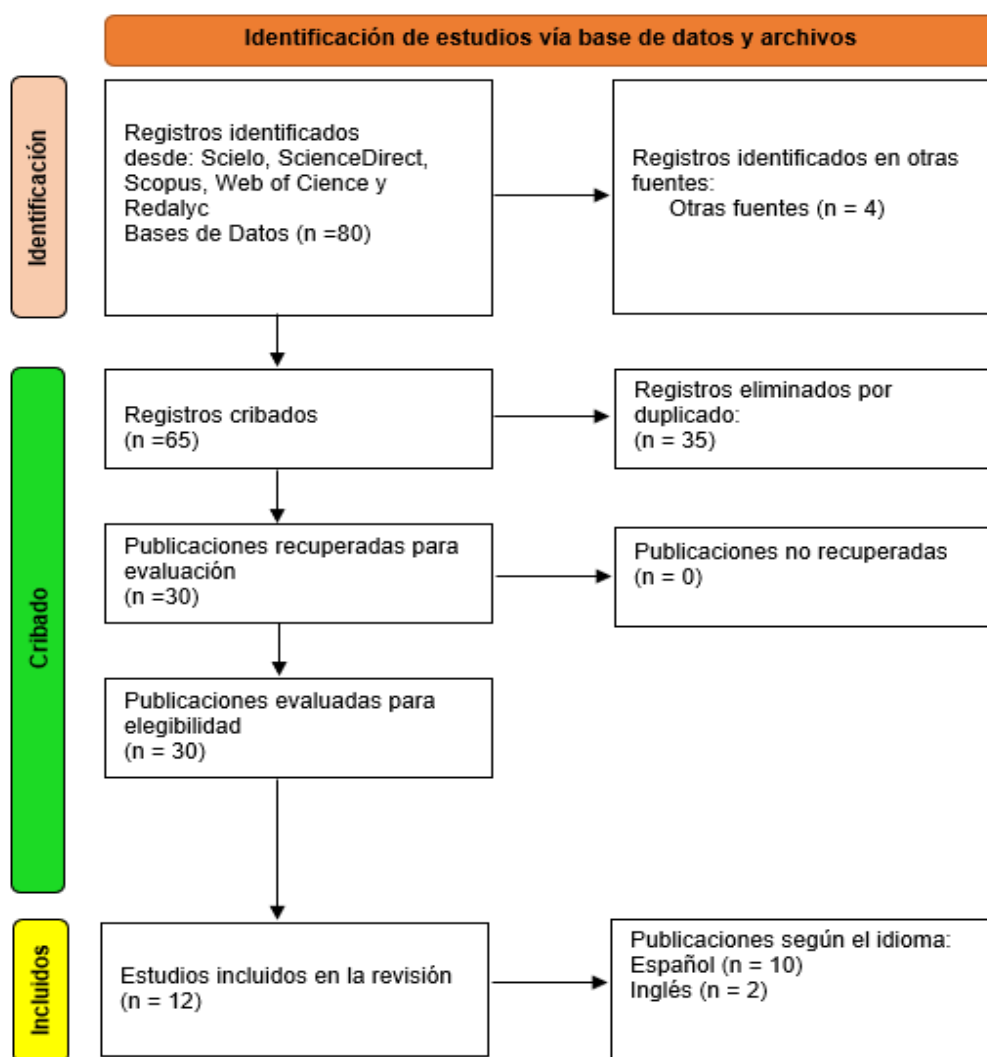
- Artículos que no planten diseños alternativos de PTAR.

La búsqueda en las bases de datos se realizó utilizando las siguientes palabras clave “Aguas residuales”, “planta de tratamiento”, “diseño de planta de tratamiento”, “plantas de beneficio animal”. Adicionalmente, se emplearon ecuaciones de búsqueda con operadores booleanos para optimizar los resultados.

A continuación, en la Figura 4 se observa el diagrama de flujo que resume los procedimientos realizados durante la revisión documental.

Figura 4

Diagrama PRISMA



Nota. Elaboración propia.

Antes de realizar la síntesis de la revisión literaria se describe una breve categorización de los tratamientos encontrados, en los diferentes artículos. En los 12 artículos anteriores todos los tratamientos fueron diseñados con un sistema preliminar, rejillas y desarenador, estas unidades se hacen imprescindibles para la eliminación de solidos de gran tamaño y arenas, la cual al no eliminarse afectaría los equipos y tratamientos posteriores.

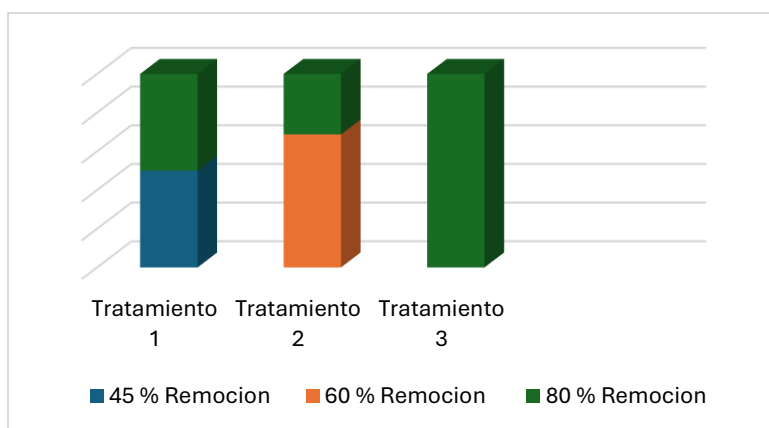
Tratamientos primarios: Se evidencio que un artículo plantea un sistema séptico como tratamiento de AR y posteriormente al vertimiento se infiltraba al suelo, este tratamiento se puede llevar a cabo para concentraciones mínimas de DBO_5 y SST, como viviendas rurales.

Tratamientos secundarios: Se evidenció que 8 artículos de 12 los mencionados, entre ellos se destacan los FAFAS, los reactores UASB, los REACTORES BIOLÓGICOS, PERCOLADORES, la eficiencia de estos tratamientos va estrechamente relacionada varios criterios de diseño, como el tiempo de retención hidráulica y concentraciones iniciales.

Tratamientos terciarios: De los 12 artículos 3 están estrechamente relacionados con lagunas de maduración, filtros Fito pedológicos, entre otros, los cuales están relacionados con la polución de la masa de agua al eliminar variables de interés sanitario que mejoran de calidad de las fuentes hídricas receptoras.

Figura 5

Porcentaje Remoción de los Tratamientos



Nota. Elaboración propia.

Según la revisión documental, descrita en la actividad anterior, se seleccionaron aquellas opciones que cumplan con las condiciones de viabilidad de implementación en la PBA del municipio de Piendamó, donde se tendrán condiciones como porcentajes de remoción, disponibilidad tecnológica e inversión necesaria [11]. Posteriormente, se describen los principales tipos de diseño de PTAR, así como las diferentes tecnologías de manejo de AR.

El sistema de lodos activados es uno de los diseños de PTAR más utilizados a nivel mundial. Este proceso de tratamiento biológico se lleva a cabo en una unidad hidráulica

denominada reactor biológico. En este reactor se produce agitación por medio de un equipo de aireación en la mezcla de la masa de agua residual y lodo, en donde los microorganismos presentes tanto en la masa de agua como en el lodo. Los microorganismos presentes tanto en el agua como en el lodo oxidan la materia orgánica, transformándola en compuestos más estables y con menor potencial contaminante.

Este tratamiento requiere etapas previas de pretratamiento que incluyen rejillas de cribado, trampas de grasa y desarenadores. Asimismo, necesita sedimentadores primarios y secundarios para garantizar su adecuado funcionamiento. Los porcentajes de remoción pueden alcanzar un 95% de DBQ y entre 85% y 95% de sólidos suspendidos totales. Una de las ventajas más importantes se destaca su amplia utilidad en Colombia, lo que ha permitido acumular experiencia operativa. Además, presenta alta eliminación de contaminantes y puede combinarse con otro tipo de sistemas, lo que mejora su eficiencia desempeño en general. Dentro de las desventajas se encuentran: la dependencia de la temperatura del efluente, la alta generación de lodos y los elevados costos operacionales asociados a la aireación [24].

En cuanto a los sistemas naturales considerados en el diseño de PTAR, se destacan los humedales o filtros Fito pedológicos. Estos sistemas utilizan plantas acuáticas, conocidas comúnmente como macrófitas, que pueden desarrollarse en el suelo o en el agua. La depuración se logra mediante procesos combinados de tipo microbiológico, biológico, físico y químico.

También se incluyen las lagunas de estabilización, conformadas por estanques de tierra donde el tratamiento se realiza mediante procesos naturales que involucran algas y bacterias. Se reconocen tres (3) clases de lagunas: lagunas anaerobias, utilizadas para tratamiento primario; las lagunas facultativas, para tratamiento secundario; y las lagunas de maduración, empleadas para tratamiento terciario con el fin de eliminar patógenos [24].

Otra tecnología utilizada en el diseño de PTAR corresponde a los reactores UASB, utilizados para el manejo de AR [25]. Los reactores UASB se utilizan en tratamientos biológicos, que de acuerdo con el tipo de bacterias pueden ser facultativas, aerobias o sea en presencia de oxígeno, o anaerobias con ausencia de este [25]. Si el proceso es aerobio se produce biomasa (lodo). Cuando el proceso es anaerobio se produce un biogás, principalmente metano. Una combinación de proceso aerobio y anaerobio garantiza la degradación de la carga orgánica, al tiempo que disminuye la generación de lodos y el consumo de energía.

Los sistemas de descontaminación que utilizan reactores UASB 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. Este último aspecto depende de la cantidad de metano [26]. El desempeño del reactor UASB está condicionado por parámetros físicos y de procesos biológicos. Estos factores determinan la eficiencia de la eliminación y la transformación de los compuestos orgánicos. Dicha eficiencia se fundamenta en establecer un lecho denso de lodos en el fondo, formado por la auto inmovilización de las bacterias. Entre las principales desventajas se encuentran: la eliminación parcial de patógenos, la sensibilidad a las variaciones temperatura del agua y el pH generando así olores, lo que indica que es necesario implementar tratamientos posteriores para cumplir la eficiencia esperada. [26].

El diseño de una PTAR que incorpora sistemas bioelectroquímicos (BES) constituye una alternativa innovadora. Este sistema integra procesos electroquímicos con procesos biológicos.

Los BES se emplean en el tratamiento secundario de las AR. En estos sistemas, los microorganismos tienen la capacidad de degradar una amplia gama de contaminantes, dependiendo de la biodisponibilidad y del metabolismo de las cepas bacterianas [27]. La digestión celular se aprovecha para conseguir energía a partir de la degradación de la materia contaminante. Aproximadamente el 90% de la energía generada se transforma en gas metano. El porcentaje restante se destina al crecimiento celular. Estos sistemas operan de manera similar a una pila electrolítica. El ánodo recibe los electrones generados por la oxidación de bacterias exoelectrogénicas, mientras que el cátodo recibe los electrones que posteriormente reducen el compuesto [28].

La implementación de esta tecnología en el tratamiento de AR exige condiciones controladas que aseguren la permanencia 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 Bioeléctrico (BES) con bacterias eléctricamente activas (AEB), se utiliza en la inoculación de lodo anaerobio y en la celda de electrolisis microbiana (MEC); [29]. La implementación de esta tecnología en la descontaminación de aguas residuales exige condiciones controladas que aseguren la estabilidad de microorganismos. También es necesario controlar variables como la temperatura, pH, carga contaminante que afectan la eficiencia, además es relativamente costosa.

El filtro percolador es un reactor biológico, en donde los microorganismos crecen en un medio de soporte dentro de la unidad hidráulica llamada 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: generación de olores ofensivos, requiere constante mantenimiento para evitar compactación y degradación del lecho filtrante [30]. Las tasas de remoción son DBO5 (80%), sólidos suspendidos (80%), DQO (70%), requiere de tratamientos posteriores para cumplir objetivos de remoción de contaminantes de interés sanitario como fenoles y metales [30].

De acuerdo con los hallazgos encontrados durante la primera fase se tuvo la oportunidad de plantear opciones para el manejo de las aguas residuales de la PBA. En primer lugar, la obligación de diseñar una infraestructura de tratamiento hídrico en aras de minimizar la carga orgánica, cumplir con las normas y también para mejorar la calidad de vida de las personas del municipio y al tiempo se mejorar las condiciones ambientales.

Además, otras alternativas que se pueden generar suelen vincular la posibilidad de reinvertir en nuevos equipos y tecnologías de tratamiento como por ejemplo aquellas posicionadas en la actualidad sobre un pretratamiento y un tratamiento primario, secundario y terciario. Para lograrlo, se requiere la vinculación de todos los interesados desde el estado, la gestión administrativa de la PBA y los empleados para tener conciencia ambiental.

Por otro lado, otras alternativas suelen vincular casos de éxito en otras plantas al nivel del país o en territorios internacionales, para que el nuevo sistema tenga el cumplimiento de las normativas o resoluciones, pero se requiere contar con personas altamente cualificadas para tomar decisiones con mejor equilibrio económico; entonces se debe evaluar, considerar y ejecutar continuamente planes de mejoramiento. Según la revisión documental, se seleccionaron aquellas opciones que cumplieran con las condiciones de viabilidad de implementación en la PBA del municipio de Piendamó, donde se tuvieron en cuenta condiciones como porcentajes de remoción, disponibilidad tecnológica e inversión necesaria [11].

La PBA del municipio de Piendamó cuenta con unas unidades hidráulicas en avanzado estado de deterioro, las cuales no garantizan cumplir su funcionalidad. Debido a que presentan grietas que facilitan la salida de la masa de agua residual afectando el suelo. Por otro lado, se observa en ellas acumulación de lodos, estas unidades son llamadas por el personal de la PBA

como sedimentadores y no existen unidades hidráulicas complementarias que garanticen una depuración suficiente de la masa de agua residual. Por tal motivo se plantea formular un sistema de depuración que asegure la depuración de la masa de agua cumpliendo con la normatividad nacional de la Resolución 0631 del 2015, y que sea socioeconómica-ambientalmente ejecutable.

El propósito de evaluar estrategias tecnológicas para el tratamiento de AR se consideraron criterios ambientales, económicos, técnicos y sociales.

En la tabla 18, se relaciona la tecnología de tratamiento y la valoración según criterios ambientales y económicos.

Tabla 18

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	25-55	5-7	80-100
Laguna anaerobia	10-35	7-15	40-85
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 o filtro Fito pedológico.	0-10	0	10-20

Nota. Elaboración propia basada en estudio Herrán & Mejía.

De acuerdo con la tabla 18, las tecnologías de tratamiento consideradas son: tanque séptico, filtro anaerobio de flujo ascendente, reactor biológico, y laguna de maduración (Filtro Fito pedológico). La generación de lodos es más elevada en la tecnología de lodos activados y mínima en la laguna de maduración, cuando ya la carga orgánica ha sido depurada, y la ventaja es que tiene la mayor eficiencia en la remoción DBO5 (%), sólidos suspendidos (SS). También los requerimientos de energía son mayores en la tecnología de lodos activados, pero los elevados costos de funcionamiento y de preservación son producidos por los filtros de membrana y reactores

UASB y menores en la laguna de maduración y tanque séptico [29].

En la Tabla 19 se muestran las 3 alternativas de tratamiento con diferentes configuraciones, posteriormente se eligió la más adecuada y con mayor eficiencia para el diseño de la PTAR.

Tabla 19

Alternativa de Tratamiento N° 1

ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO N° 1				
Unidad hidráulica	% de Remoción DBO5	% de Remoción SST	Concentración DBO5	Concentración SST
Rejillas	0*	0*	1419 mg/l	11762 mg/l
Desarenador	0*	0*	1419 mg/l	11762 mg/l
Sedimentador primario	30-40%	50-70%	994 mg/l	5881 mg/l
UASB	80-85%	80%	198 mg/l	1.176 mg/l
Resolución 0631/15 artículo 9 aguas residuales no Domesticas a cuerpos de aguas superficiales de actividades de agroindustrial y ganadería			450 mg/l	400 mg/l
Carga contaminante= $C \cdot Q \cdot f_c \cdot t$ Cc= concentración * Caudal * factor de conversión * tiempo Cc=1419*0.48*0.036*24= 58.84 DBO5 kg/día			Entrada DBO5 = 58.84 kg/día	Entrada SST = 487.79 kg/día
Carga contaminante salida Cc=198*0.48*0.0036*24= 0.04 DBO5kg/día			Salida DBO5 = = 8.21kg/día	Salida SST= 48.77 mg/l
Eficiencia del sistema % remoción= Carga contaminante entrada menos la carga contaminante salida dividida por la Carga contaminante entrada multiplicada por 100.			Eficiencia del sistema DBO5 = 86.93 %	Eficiencia del sistema SST = 90.00%
Decreto 1584 de 1984			80%	80%

Nota. Elaboración propia. La remoción de los tratamientos preliminares para DBO5 y SST son despreciables.

Este primer tren de tratamiento que nos ofrece la bibliografía científica investigada tiene remociones del 86.93% para DBO₅ y 90% para SST dando cumplimiento al Decreto 1594 de 1984, de igual manera se puede apreciar que logra reducir la concentración de DBO5 hasta 198 mg/l dando cumplimiento a la Resolución 0631 del 2015, en cuanto a los SST la disminución del 80%

que nos brinda esta tecnología es bastante alta, pero no lo suficiente para dar cumplimiento a normativa nacional, por lo cual requiere de tratamientos terciarios complejos donde implique procesos químicos, como adición de polímeros y/o coagulantes y floculantes, los cuales económicamente son altamente costosos.

Tabla 20

Alternativa de Tratamiento N° 2

ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO N° 2				
Unidad hidráulica	% de Remoción DBO ₅	% de Remoción SST	Concentración DBO ₅	Concentración SST
Rejillas	0*	0*	1419 mg/l	11762 mg/l
Desarenador	0*	0*	1419 mg/l	11762 mg/l
Sedimentador primario	30-40%	50-70%	994 mg/l	5881 mg/l
Filtro percolador	65- 85%	85-90%	347 mg/l	882 mg/l
Sedimentador secundario	40-45%	60-90%	208 mg/	352mg/l
Resolución 631/15 artículo 9 aguas residuales no Domesticas a cuerpos de aguas superficiales de actividades de agroindustrial y ganadería			450 mg/l	400 mg/l
Carga contaminante= $C*Q*fc*t$ Cc= concentración * Caudal * factor de conversión * tiempo Cc=1419*0.48*0.036*24= 58.84 DBO ₅ kg/día			Entrada DBO ₅ = 58.84 kg/día	Entrada SST = 487.79 kg/día
Carga contaminante salida Cc=208*0.48*0.0036*24= 0.04 DBO ₅ kg/día			Salida DBO ₅ = 8.62kg/día	Salida SST= 14.59 mg/l
Eficiencia del sistema % remoción= Carga contaminante entrada menos la carga contaminante salida dividida por la Carga contaminante entrada multiplicada por 100.			Eficiencia del sistema DBO ₅ = 85.35 %	Eficiencia del sistema SST = 97.0%
Decreto 1584 de 1984			80%	80%

Nota. Elaboración propia. La remoción de los tratamientos preliminares para DBO₅ y SST son despreciables.

El segundo tren de tratamiento que nos ofrece la bibliografía científica investigada no arroja la utilización de un filtro percoladora, con un sedimentador secundario el cual tiene remociones del 85.35 % para DBO₅ y 97.0% para SST, dando cumplimiento al Decreto 1594 de 1984, de igual manera se puede observar que logra reducir la cantidad de DBO₅ hasta 208 mg/l y de SST hasta 352 mg/ estando por debajo de los valores permisibles de cumplimiento a la

Resolución 631 del 2015. No obstante la eliminación de los SST se encuentra muy cernada al límite permisible 400 mg/l de la res 631 del 2015, lo que hace cualquier eventualidad o desajuste en la operación, estas concentraciones puedan variar dejando la PTAR en incumplimiento o por fuera del límite permisible, lo cual requiere igual que la alternativa de tratamiento #1 sistemas de tratamientos terciarios complejos donde implique procesos químicos, como adición de polímeros y/o coagulantes y floculantes, los cuales económicamente son altamente costosos, es por ello que se requiere replantear una tercera alternativa que cumpla principalmente la normatividad ambiental vigente y que sea económicamente viable, a continuación se realizara una evaluación de viabilidad para elegir la tercera alternativa de tratamiento.

Tabla 21

Alternativa de Tratamiento N° 3

ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO N° 3				
Unidad hidráulica	% de Remoción DBO5	% de Remoción SST	Concentración DBO5	Concentración SST
Rejillas	0*	0*	1419 mg/l	11762 mg/l
Desarenador	0*	0*	1419 mg/l	11762 mg/l
Trampa de grasas	5%	10%	994 mg/l	5881 mg/l
Sedimentador primario	40 %	50 %	994 mg/l	5881 mg/l
Sistema Séptico	50%	60%	696 mg/l	3529 mg/l
FAFA	60 - 70%	70%	279 mg/l	1764 mg/l
Reactor Biológico	80-85%	80%	56 mg/l	353 mg/l
Filtro Fito pedológico	99%	60%	1 mg/l	142 mg/l
Resolución 0631 del 2015 articulo 9 aguas residuales no Domesticas a cuerpos de aguas superficiales de actividades de agroindustrial y ganadería			450 mg/l	400 mg/l
Carga contaminante= $C \cdot Q \cdot f_c \cdot t$ Cc= concentración * Caudal * factor de conversión * tiempo $Cc=1419 \cdot 0.48 \cdot 0.036 \cdot 24= 58.84$ DBO5 kg/día			Entrada DBO5 = 58.84 kg/día	Entrada SST = 487.79 kg/día
Carga contaminante salida $Cc=1 \cdot 0.48 \cdot 0.0036 \cdot 24= 0.04$ DBO5kg/día			Salida DBO5 = 0.04 kg/día	Salida SST= 5.8 mg/l

$\text{Eficiencia del sistema \% remoción} = \frac{\text{Carga contaminante entrada} - \text{Carga contaminante salida}}{\text{Carga contaminante entrada}} \times 100.$	Eficiencia del sistema DBO ₅ = 99.93 %	Eficiencia del sistema SST = 98.81%
Decreto 1584 de 1984	80%	80%

Nota. Elaboración propia. La remoción de los tratamientos preliminares para DBO₅ y SST son despreciables.

Se logra identificar en el anterior balance de masas que la DBO₅ se logra depurar en la unidad hidráulica de tratamiento secundario FAFA, logrando reducir a 279 mg/l, casi en un 30% por debajo del valor de referencia establecido por la Resolución 0631 del 2015, no obstante para los sólidos suspendidos totales la unidad hidráulica FAFA, no logra depurar la cantidad suficiente de concentración de SST, para cumplir el límite permisible de la Resolución 0631/15, que se encuentra en 400 mg/l, por lo cual fue necesario el diseño del reactor biológico, el cual tiene la capacidad de depurar hasta el 80% de la concentración de SST que ingresa a la unidad, logrando reducir hasta 353 mg/l la concentración.

Al tener en cuenta que siempre después de un reactor biológico, es necesario un sedimentador secundario, y al tener la concentración de SST tan cercana al límite permisible, se diseñó un filtro Fito pedológico, que sirve de igual manera como sedimentador secundario y hace a su vez de tratamiento terciario o de punición ya que las plantas macrófitas logran eliminar en gran medida nutrientes, patógenos, garantizando con esta medida depurar la nada de agua hasta cumplir los valores máximos de la Resolución 0631 del 2015, de igual manera se realizaron los cálculos respectivos de cargas contaminantes para evaluar si la PTAR cumple con la anterior norma de vertimiento Decreto 1594 de 1984. En cuanto a porcentajes de remoción, evidenciando que el tren de tratamiento planteado logra depurar 99.93 % para la variable de DBO₅ y 98.81% para la variable SST, logrando de esta manera cumplir todos los criterios de viabilidad.

El criterio ambiental es uno de los más importantes, dado que en la actualidad existe afectación del medio ambiente, por descargas al suelo por vertimientos, la generación de lodos tendría igualmente un impacto negativo, por acumulación excesivo. También el uso energético produce emisiones de Gases de Efecto Invernadero. El criterio económico tiene incidencia debido a las restricciones de recursos financieros. El criterio técnico más importante es la eficiencia en la eliminación de materia orgánica y DQO. Los criterios sociales son considerados teniendo en cuenta la comunidad aledaña, la cual por los constante olores ofensivos que se presentan han

solicitado a la PBA considerar tratar los vertimientos para que disminuya el impacto ambiental negativo de olores ofensivos.

4.2.2. Actividad 2. Selección del tren de tratamiento

La alternativa de tratamiento N.º 3 se plantea como la opción más adecuada para la Planta de Beneficio Animal (PBA), considerando la relación costo/beneficio tanto en la construcción y el mantenimiento, como en la operación a cargo de la administración municipal. Esta alternativa integra procesos que garantizan un equilibrio entre los aspectos ambiental, económico y social. En el ámbito ambiental, esta línea de tratamiento alcanza altas eficiencias de remoción de DBO₅ y SST. Esto se debe a la combinación de sedimentación, sistemas sépticos, FAFA y reactor biológico. Con ello se reduce de manera significativa la carga contaminante previo a la descarga y se minimiza el impacto sobre los cuerpos de agua.

Desde el enfoque económico, la alternativa emplea tecnologías de operación sencilla con costos moderados de construcción y mantenimiento. Por lo tanto, resulta viable para plantas de pequeña y mediana escala sin comprometer la eficiencia del proceso. En el aspecto social, la implementación de este sistema contribuye al cumplimiento normativo. Además, mejora la percepción comunitaria al disminuir olores y riesgos sanitarios, y promueve condiciones más seguras para los trabajadores, favoreciendo la sostenibilidad integral de la PBA. A diferencia de los métodos de tratamiento convencionales, como los procesos químicos o los filtros de escurrimiento utilizados en los países desarrollados, estos requieren grandes consumos de energía. Asimismo, aplican el uso de equipos electromecánicos sofisticados y costosos, además de personal técnico y especializado para su operación y mantenimiento. Dichos métodos no han tenido éxito en países en desarrollo, principalmente por la dificultad para operar y mantener los equipos. También influye la complejidad para mantener un inventario adecuado de repuestos y las limitaciones para acceder a recursos financieros.

Según Mendonca, las principales ventajas de los sistemas combinados de Sedimentación, Sépticos, FAFAS y Reactores Biológicos, son:

- Bajo precio
- No necesitan componentes importados.
- Mínimo consumo de energía.

- Fácil de construir y funcionamiento.
- De confianza y fácil mantenimiento.
- Mejor absorción en aumentos bruscos de cargas hidráulicas u orgánicas.
- Se pueden usar como sistemas que regulan riegos.
- Buena adaptación a variaciones estacionarias.
- Puede manejar distintos vertidos industriales con buena biodegradabilidad (mataderos, lecherías, industrias de frutas, etc.).
- Aumenta estabilización de la materia contaminante.
- Brindan un efluente de buena calidad y una reducción de microorganismos patógenos.

Con base en los datos anteriores y los criterios e indicadores establecidos para la selección de la tecnología de tratamiento de la PTAR, se logra evidenciar que la alternativa Nro. 3 cumple con todos los criterios de viabilidad presentados en la Tabla 22. Adicionalmente, se considera que la Temperatura promedio del sector es de media de 18° C y va de acuerdo con la norma de vertimiento: Decreto 1594/84 [15].

Tabla 22

Eficiencias de Alternativa Seleccionada.

Eficiencia del sistema % remoción= $\frac{\text{Carga contaminante entrada} - \text{Carga contaminante salida}}{\text{Carga contaminante entrada}} \times 100$	Eficiencia del sistema DBO5 = 99.93 %	Eficiencia del sistema SST = 98.81%
Decreto 1584 de 1984	80%	80%

Nota. Elaboración propia.

4.3. Fase 3: Diseño del sistema de tratamiento de agua residuales alternativa Nro. 3 para la remoción de carga orgánica en la planta de beneficio animal de la PBA del municipio de Piendamó Cauca.

4.3.1. Actividad 1. Dimensionamiento de la planta

Dado que la mejor alternativa para abordar la problemática identificada corresponde al

diseño de una infraestructura de manejo de agua residuales orientado a la eliminación de carga orgánica en la PBA, se propone un diseño ajustado a las realidades y que en caso de su desarrollo podría mejorar y minimizar las consecuencias encontradas.

4.3.2. Actividad 2. Diseño Sistema Preliminar Rejillas y Desarenador PBA Piendamó

El cribado es la operación empleada para separar el material grueso que está presente en el agua, mediante el uso de una criba o rejilla de limpieza manual.

Debido al caudal se recomienda una rejilla de limpieza manual, inclinada 60 grados con barras rectangulares separadas 0.5 cm, en material acero inoxidable.

Por razones operativas de mantenimiento, se adopta un canal de acceso 30 cm de ancho, la lámina de agua será inferior a 1 cm y las pérdidas en la rejilla para el caudal máximo serían inferiores a 3 cm.

Por efectos de operación y mantenimiento se adopta un canal de entrada de 40 cm de ancho y una pérdida de 15 cm, previendo algún represamiento en la entrada.

Dimensiones de Rejilla.

Tipo de barras: Rectangulares.

Ancho de barras: 1/8"

Espaciamiento 0.5 cm

La segunda unidad hidráulica de tratamiento constituye un desarenador de flujo horizontal en el cual se van a retener arenas y partículas gruesas como restos de comida contenidas en el agua residual.

Tabla 23

Geometría Recomendada para desarenadores de diferente tipo.

Parámetro	Desarenador de flujo horizontal	Desarenador aireado	Desarenador tipo vórtice
Profundidad (m)	2 - 5	2 - 5	2.5 - 5
Longitud (m)		8 - 20	

Ancho (m)		2.5 – 7	
Relación Largo: Ancho	2.5: 1 – 5: 1	3: 1 – 5: 1	
Relación Ancho: Profundidad	1: 1 – 5: 1	1: 1 – 5: 1	
Diámetro (m)			
Cámara superior			1 – 7
Cámara inferior			1 - 2

Nota. Elaboración propia. En base al Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento básico RAS, (Tabla E. 4. 7)

Tabla 24

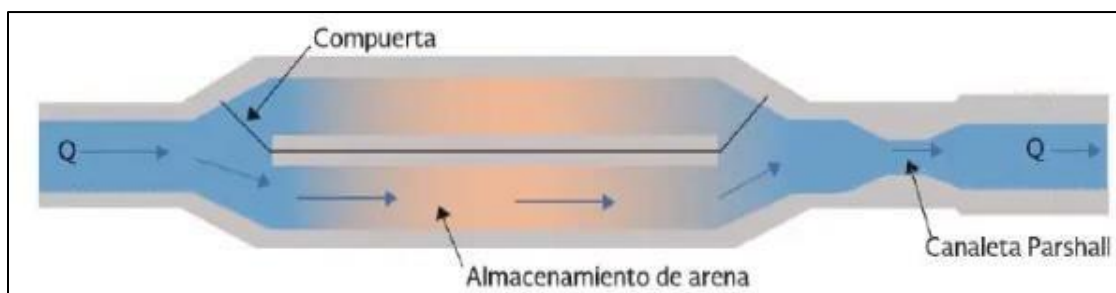
Criterios Desarenadores Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS

Localización	Deben ubicarse después de rejillas y antes de tanques de sedimentación primaria y de las estaciones de bombeo.
Velocidad mínima del agua	La velocidad debe mantenerse controlada entre: 0.2 m/s – 0.4 m/s.
Número	Se recomienda un mínimo de dos unidades para cualquiera de los niveles de complejidad. Cada unidad debe tener la capacidad para operar con el caudal de diseño mientras la otra unidad está en limpieza.
Tasa de desbordamiento superficial	Se sugiere un rango entre 700 y 1600 m ³ /m ² /día. Estos valores pueden expresarse también como velocidad de sedimentación: 30m/h y 65 m/h.
Tiempo de retención hidráulico	Debe definirse con base en el tamaño de las partículas a remover; se recomienda un tiempo entre 20 segundos y 3 minutos.
Estructura de control de caudal	Se recomienda controlar la velocidad en el desarenador mediante vertederos tipo Sutro o proporcional.
Operación y mantenimiento	Caudal <50 L/s limpieza manual Caudales >150 L/s limpieza mecánica Caudal intermedio, justificar la selección

Nota. Elaboración propia. En base al Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento básico RAS.

Criterios adicionales.

Para el diseño de la PBA de Piendamó, se diseñará un desarenador con dos cámaras de flujo horizontal y al final se instalará una canaleta Parshall, teniendo presente el caudal de diseño de 0,48 L/s

Figura 6*Desarenador.**Nota.* Elaboración propia.

En los cuatro niveles de complejidad se deben emplear desarenadores cuando sea necesario cumplir con los siguientes criterios:

- 4 Protección de equipos mecánicos contra la abrasión
- 5 Reducción de la formación de depósitos pesados en tuberías, conductos y canales
- 6 Disminución de la frecuencia de limpieza de la arena acumulada en tanques de sedimentación primaria y digestores de lodos.
- 7 Reducción de pérdida de volumen en tanques de tratamiento biológico.
- 8 Instalación previa a centrífugas, intercambiadores de calor y bombas de diafragma de alta presión.

Velocidad mínima del agua: Los desarenadores deben diseñarse de forma que la velocidad sea controlable. La variación debe mantenerse únicamente en un rango entre 0.2 m/s y 0.4 m/s.

Tasa de desbordamiento superficial: Se recomienda un rango entre 700 y 1600 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}$. Estos valores también pueden expresarse en términos de velocidad de sedimentación, con un rango aproximado entre 30 m/h y 65 m/h.

Tiempo de retención hidráulico: Este debe definirse en función del tamaño de las partículas que se desean separar. Se recomienda un tiempo entre 20 segundos y 3 minutos. Dicho tiempo se obtiene mediante dispositivos que permitan controlar la velocidad del flujo.

Dimensionamiento Desarenador

$$V = \frac{(\rho_s - \rho) \cdot d^2 \cdot g}{18 \cdot \mu} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

V : velocidad de asentamiento m/s

ρ_s : densidad del sedimento kg/m³

ρ : densidad del agua

μ : Viscosidad absoluta del agua Pa. s

g : Aceleración de la gravedad 9,81 m/s²

d : diámetro partícula a remover. 0,002 mm

Tabla 25

Datos Generarles Diseño desarenador.

Datos generales para el diseño del desarenador PBA Piendamó	
Caudal de diseño= Un C.M.H. (Qo)	0,48 l/s = 0,00048 m ³ /s
Temperatura aprox. Del agua	18° c
Tiempo de retención Hidráulica	30 s
Altura útil (H útil)	0,60 m
Diámetro (Ø) partícula a sedimentar	0,020 mm
Volumen útil	Q* Tiempo de retención hidráulica 0,00048 m ³ /s * 30 s = 0,0144 m ³
Área de planta	$A_p = \frac{V_{util}}{H_{util}} = \frac{0,0144 \text{ m}^3}{0,60 \text{ m}} = 0,024 \text{ m}^2$
	4
	L= 4.B
	A _p = 4. B*B
Relación (L/B) =	A _p = 4. B ²
	$B \sqrt{\frac{A_p}{4}} = 0,07 \text{ m se ajusta a } 0,20 \text{ m min}$
	$L = 0,28 \text{ m se ajusta a } 0,50 \text{ m min}$
Dimensiones finales	B = 0,20 m L = 0,50 m

	$H_{util} = 0,60 \text{ m}$
Carga Hidráulica superficial (C.A)	$C.A = \frac{Q}{B \cdot L} = \frac{0,00048 \frac{m^3}{s}}{0,20 \cdot 0,50} = 0,0048 \frac{m^3}{m^2 \cdot s}$ $C.A = 4,147 \frac{m^3}{m^2 \cdot dia}$
Velocidad horizontal	$V_h = \frac{Q}{B \cdot H_{util}} = \frac{0,00048 \frac{m^3}{s}}{0,20 \cdot 0,60} = 0,004 \frac{m}{s}$ $V_h = 0,4 \frac{cm}{s}$
Velocidad de asentamiento vertical	$V = \frac{(p_s - p) \cdot d^2 \cdot g}{18 \mu}$ $p_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ $p = 999,7 \text{ kg/m}^3$ $d = 0,000020 \text{ m}$ $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ $\mu = 1,308 \cdot 10^{-3} \text{ pa.s}$ $V = 0,0003 \frac{m}{s}$ $V = 0,0275 \frac{cm}{s}$
Velocidad de arrastre	$va = 12,5 \sqrt{\left(\frac{p_s}{1000} - \frac{p}{1000}\right)} \cdot \phi$ $\phi = 0,020 \text{ mm}$ $va = 0,0718 \frac{m}{s}$ $va = 7,1814 \frac{cm}{s}$

Nota. Elaboración propia.

Tabla 26*Fórmulas para Canaleta Parshall.*

Ancho de la garganta (W) (cm)		Ecuación*	Capacidad (L/s)
2.5	(1")	$Q = 0.055 H_a^{1.5}$	0.3-5
5	(2")	$Q = 0.110 H_a^{1.5}$	0.6-13
7.6	(3")	$Q = 0.176 H_a^{1.547}$	0.8-55
15.2	(6")	$Q = 0.381 H_a^{1.58}$	1.5-110
22.9	(9")	$Q = 0.535 H_a^{1.59}$	2.5-250
30.5	(12")	$Q = 0.690 H_a^{1.522}$	3.1-455
45.7	(18")	$Q = 1.054 H_a^{1.598}$	4.3-700
61.0	(24")	$Q = 1.426 H_a^{1.57}$	12-950
91.4	(36")	$Q = 2.182 H_a^{1.546}$	17-1 400
121.9	(48")	$Q = 2.935 H_a^{1.578}$	37-1 900
152.4	(60")	$Q = 3.728 H_a^{1.587}$	60-2 400
182.8	(72")	$Q = 4.515 H_a^{1.595}$	70-2 900
213.4	(84")	$Q = 5.306 H_a^{1.601}$	115-3 450
243.8	(96")	$Q = 6.101 H_a^{1.606}$	130-3 950
305.0	(120")	$Q = 7.463 H_a^{1.6}$	250-5 660

*Q en m³/s; H_a en m*Nota.* Elaboración propia.**Tabla 27***Dimensiones de la Canaleta Parshall*

W (cm)	A (cm)	B (cm)	C (cm)	D (cm)	E (cm)	F (cm)	G (cm)	K (cm)	N (cm)	R (cm)	M (cm)	P (cm)	X (cm)	Y (cm)
2.5	36.3	35.6	9.3	16.8	22.9	7.6	20.3	1.9	2.9	-	-	50.0	0.8	1.3

Nota. Elaboración propia.

Para la PBA de Piendamó se definió una canaleta Parshall, tiene las siguientes dimensiones: de ancho de la garganta de (W) 2,5 cm, ancho de entrada en la parte convergente (D) 16,8 cm y longitud de la sección convergente (A) 36,3 cm.

La altura que se usa para calcular el caudal se toma en el punto ubicado a 2/3 de (A)

$$\frac{2}{3}A = \frac{2}{3}(36,3 \text{ cm}) = 24,2$$

Además, es necesario establecer la lámina de agua sobre la canaleta. También se debe definir la sección empleada para los cálculos y el diseño, junto con el tiempo de sedimentación y el largo de la cámara.

La canaleta Parshall de la PBA de Piendamó.

$$Q = 0,055H_a^{1,5}$$

$$Q = \text{Caudal } m^3 / s$$

$$H_a = \text{Altura a } (2/3) A, (m)$$

$$H_a = \left(\frac{Q}{0,055} \right)^{\frac{1}{1,5}} = \left(\frac{0,00048}{0,055} \right)^{\frac{1}{1,5}} = 0,043 m$$

4.3.3. Actividad 3. Trampa Grasas

La función de la trampa Grasa es retener las grasas y los sólidos suspendidos presentes en el agua residual que entra a la primera cámara. Los elementos flotantes, como las grasas, suben al segundo compartimiento de la cámara debido a que su densidad es menos que la del agua. Por otro lado, los sólidos más pesados se depositan en el fondo como lodo. Finalmente, en el tercer compartimiento el agua clarificada sin grasa se descarga como efluente.

El dimensionamiento debe hacerse según las condiciones específicas y el caudal del agua residual a tratar. Se debe considerar que la capacidad mínima de almacenamiento de grasa, expresada en kg, tiene que equivaler al menos a la cuarta parte del caudal de Diseño, es decir, al Caudal Máximo horario, medido en litros por minuto [17].

El tanque requiere 0.25m² de área por cada litro por segundo. La relación: ancho / longitud debe estar entre 1:4 y 1:18, una velocidad ascendente mínima debe ser de 4mm/s. En las tablas 3 y 4 (Tablas E.3.1 y E.3.2 en el documento RAS 2000) se presentan los caudales, capacidades de retención y los TRH recomendados para este tipo de trampas de grasa.

Entradas y salidas: Es necesario instalar dispositivos que regulen el flujo en las entradas, con el fin de evitar sobrecargas o ingresos bruscos. La tubería de entrada debe tener un diámetro mínimo de 50 mm, mientras que la de salida debe ser mínimo 100 mm. El extremo de la tubería de entrada debe quedar sumergido al menos 150 mm. El tubo de salida para la recolección debe ubicarse mínimo a 150mm del fondo del tanque y con una sumergencia no menor 0.9 m.

Tabla 28*Capacidades de Retención de Grasas.*

Tipo Afluente	Caudal (L/minuto)	Capacidad de Retención de Grasa (Kg)	Capacidad máxima Recomendada (L)
Cocina Restaurante	56	14	190
Habitación Sencilla	72	18	190
Habitación Doble	92	23	240
Dos habitaciones Sencillas	92	23	240
Dos habitaciones Dobles.	128	32	330
Lavaplatos para Restaurantes			
Volumen de agua mayor a 115 Litros	56	14	115
Volumen de agua mayor a 190 litros	92	23	240
Volumen entre 190 y 378 Litros	144	36	378

Nota. Elaboración propia.**Tabla 29***Caudales y Tiempos de Retención Hidráulica Típicos que se deben usar para trampa de grasas según el RAS 2000.*

Tiempo de Retención Minutos	Caudal Entrada L/s
3	2 – 9
4	10 – 19
5	20 o más

Nota. Elaboración propia.

Dimensionamiento Trampa Grasas: para garantizar eficiencia en la operación, se sugiere instalar dos trampas de grasas con diseño en paralelo. Esto permite dar continuidad al tratamiento en caso de que una deba entrar a mantenimiento o limpieza.

De acuerdo con la Tabla 29 del RAS 2000, “Caudales y Tiempos de Retención Hidráulica Típicos para trampa de grasas”, el caudal del proyecto está por debajo del mínimo establecido, que

corresponde a 2. Por esta razón se asume este tiempo de retención ya que es el más próximo al criterio de la norma.

DIMENSIONAMIENTO TRAMPA DE GRASAS

Con la siguiente ecuación se determinó el volumen de la trampa de grasas, empleando el caudal de diseño y el TRH:

$$V = Q_{Diseño} \times TRH \quad \text{Ec. 5}$$

$$V = Q_{Diseño} \times TRH$$

$$V = 0,48 \frac{l}{s} \cdot 60 \cdot 3 \text{ min} = 396 l$$

Tabla 30

Volumen de la trampa Grasas.

	L	396
Volumen	m ³	0,396
	m ³	0,50

Nota. Elaboración propia.

El RAS 2000 recomienda que el volumen mínimo en m³ de una trampa de grasas sea igual o mayor a 0.30 m³, se asume un volumen de 0,50 m³ teniendo un factor de seguridad.

El Área superficial de la Trampa de Grasas (A) se obtuvo a partir de la velocidad Ascendente (Va) y del Caudal de diseño (Q diseño):

La Norma RAS 2000 establece una Velocidad Ascendente (Va) de 0,004 m/s.

$$A = \frac{Q}{V_a} \quad \text{Ec. 6}$$

$$A = \frac{0,00048 \frac{m^3}{s}}{0,004 \frac{m}{s}} = 0,12 m^2$$

Teniendo en cuenta que el caudal es bajo, arroja un área superficial muy baja, es por ello que se asume un área superficial de 0,55 m² para evitar que esta unidad tan importante quede por debajo de lo requerimientos básicos de diseño.

Las dimensiones de la Trampa de Grasa se establecen a partir de la relación Ancho: Largo definida por la Norma RAS 2000, la cual es: 1:4

$$A = L \cdot B \quad \text{Ec. 7}$$

$$L = 4B \quad \text{Ec.}$$

$$B = L \cdot 4L = 4 \cdot L^2 \quad \text{Ec. 9}$$

$$B = \sqrt{\frac{A}{4}} = \sqrt{\frac{0,55 \text{ m}^2}{4}} = 0,37$$

$$B = 0,37 \text{ se ajusta a } 0,40$$

Teniendo en cuenta que solo se utilizará un tren de tratamiento, se multiplica por 2.5 para dimensionar acorde el ancho de la unidad, como factor de seguridad.

$$B = 0,40 \cdot 2.5 = 1 \text{ m}$$

$$L = 4 \cdot 0,55 \text{ m} = 2,2 \text{ m}$$

$$H = \frac{V}{A} = \frac{0,50 \text{ m}^3}{0,55 \text{ m}^2} = 1 \text{ m}$$

Siendo:

L= Largo de la trampa de grasas: (2,2)

B= Ancho de la trampa de grasas: (0,40)

H= Altura de la trampa de grasas: (1)

A continuación, se presenta el dimensionamiento del Bafle o Tabique interno de la Trampa de grasas. Su propósito es optimizar la separación por flotación de las grasas y la sedimentación de los sólidos.

Ubicación del Bafle: debe instalarse en la zona superior, al 75% del largo de la Trampa de Grasa, medido desde la entrada. $Ub = 0,75 \cdot 2,2 = 1,65 \text{ m}$

Altura del Bafle: Corresponde al 90% de la Altura de la Trampa de Grasa. $Hb = 0,90 \cdot$

$$1m = 0,9 m$$

Espacio entre Baffle y Fondo: Equivale al 10% de la Altura de la Trampa de Grasa: $Ebf = 0,10 \cdot 1m = 0,1m$

Ubicación de la tubería: Se coloca al 50% del ancho de la Trampa de Grasa:
 $Ut = 0,50 \cdot 1m = 0,50m$

Altura tubería entrada: equivale al 35% de la altura de la Trampa de Grasa:
 $H_{t.e.} = 0,35 \cdot 1m = 0,35m$

Caída de la tubería de entrada e ingreso de la tubería de salida: equivale al 22% de la altura de la Trampa de Grasa:

$$H_{t.s.} = 0,22 \cdot 1m = 0,22m$$

4.3.4. Actividad 4. Tanque Séptico

La verificación del tanque séptico se realiza siguiendo los lineamientos del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, Resolución 0822 de 1998 del Ministerio de Desarrollo, (RAS, 2000). Las dimensiones de diseño recomendadas se resumen en la Tabla 31.

Tabla 31

Dimensiones características de tanques sépticos

VARIABLE		VALORES RECOMENDADOS
Profundidad	Hasta 6 m ³	1.2 - 2.2
	De 6 a 10 m ³	1.5 - 2.5
	Más de 10 m ³	1.8 - 2.8
Relación Largo/Ancho		3:1
Número de cámaras		2
Longitud de la primera cámara		2/3 L

Nota. Elaboración propia en base al RAS 2000.

Para hallar el volumen del tanque séptico se debe implementar la siguiente ecuación:

$$V = 1000 + N_c(CT + kL_f) \quad \text{Ec. 10}$$

Dónde:

N_c: # de contribuyentes (L/hab/día)

TRH: Tiempo de retención Hidráulica (día)

K: Tasa acumulación de lodos digeridos (Limpieza anual, $T \geq 20^\circ\text{C}$)

LF: Lodo Fresco (L/día)

Tabla 32

Requerimientos Técnicos Sistemas Sépticos.

ítem	Descripción	Unidad de medida
V	Volumen del tanque	(L)
Q	Caudal de diseño	(L/s)
N_c	Número de habitantes	(Personas)
K	Valores de tasa de acumulación de lodos digeridos de acuerdo con la temperatura	$^\circ\text{C}$
L_f	Contribución de lodo fresco	(L/persona*día)
TRH: de 0.5 días.		
Temperatura: superior a 20°C = $K = 57$		
L_f: Casinos = $0.2 + \text{factor de seguridad} = 0.3 \text{ L}$		

Nota. Elaboración propia.

Cuando el caudal supera los $9 \text{ m}^3/\text{día}$, el tiempo de retención recomendado es de 0.5 días.

Para un periodo de limpieza de 1 año y Temperaturas $\geq 20^\circ\text{C}$ el valor K recomendado es de 57.

De acuerdo con el RAS 2000, para usuarios temporales en este tipo de establecimientos se estima una generación de lodo fresco de 0.10 L/día . Considerando un factor de seguridad, se adopta 0.15 L/día .

Tabla 33*Volumen Útil Sistema Séptico PBA PIENDAMÓ*

Volumen útil de Sistema séptico PBA Piendamó	
$V = 1000 + N_c(C * TRH + k * L_f)$	
N_c	15 hab
C	100 L/ hab*día
TRH	2 días
k	57
L_f	0,15 L/día
$V(l)$	41.475 L
$V(m^3)$	41,4 m ³

Nota. Elaboración propia.**Tabla 34***Dimensionamiento Sistema Séptico PBA PIENDAMÓ*

Dimensionamiento sistema séptico PBA Piendamó	
<i>Numero de unidades</i>	2
<i>Volumen (m³)</i>	20,7 m ²
<i>Profundidad Util (Asumida H_u)</i>	2,5 m
Para Vu > 10 m³, 1,8 ≤ hu ≤ 2,8 (RAS 2000, tabla E.3.3)	
<i>Area = Vu/h</i>	8,28 m ²
<i>Ancho/ largo</i>	1 : 2
<i>As = L * 2A</i>	2 * L ²
$A = \sqrt{\frac{As}{2}} = \sqrt{\frac{8,28 m^2}{2}}$	2,03 m
<i>L = 2 · 2.03 m</i>	4,06 m
<i>Borde Libre</i>	0,30 m

Numero de Compartimientos	2
Longitud de primer Compartimiento = $2L/3$	2,7 m
Longitud Segundo Compartimiento = $L/3$	1,35 m
$HT = H_u + \text{borde Libre}$	2,8 m

Nota. Elaboración propia.

Tabla 35

Concentraciones vertimientos PBA PIENDAMÓ

Depuración del efluente esperada	
Eficiencias de remoción	
DBO ₅	70%
Concentraciones ultima caracterización salida trampa grasas	
DBO ₅	1.459 mg/L
Q	0.48 L/s

Nota. Elaboración propia.

4.3.5. Actividad 5. Diseño Sedimentador Primario PBA Piendamó

Cuando un líquido con sólidos en suspensión permanece en estado de reposo, las partículas con densidad mayor a la del agua tienden a depositarse en el fondo, mientras que las de menor densidad flotan hacia la superficie. Estos principios fundamentales se aplican en el análisis y diseño de los tanques de sedimentación empleados en el tratamiento de AR.

El objetivo del proceso de sedimentación es remover los sólidos que decantan con facilidad y el material flotante. De esta manera se logra disminuir la concentración de sólidos en suspensión presentes en el agua mediante unidades hidráulicas de sedimentación.

Tabla 36*Diseño Sedimentador Primario.*

Diseño sedimentador primario	
Carga superficial	$CS\ típica = 50 \frac{m^3}{m^2} \cdot dia$
Área superficial	$As = \frac{Q}{CS} = \frac{41,472\ m^3}{50 \frac{m^3}{m^2} \cdot dia} = 0,82\ m^2$
Largo y ancho de la unidad	$Relacion\ \frac{largo}{ancho} = 4\ a\ 1$
	$4\ L^2 = 0,82\ m^2$
	$L = \sqrt{\frac{0,82}{4}}$
	$L = 0,45\ m$
	$L = se\ ajusta\ a\ 1\ m$
	$A = 0,45 \cdot 4 = 1,8\ m\ se\ ajusta\ a\ 2\ m$
Volumen del sedimentador	$h\ sugerida\ 3\ m$
	$V = 1 \cdot 2 \cdot 3 = 6\ m^3$
	$CS\ ajustada = \frac{Q}{A} = \frac{41,472\ m^3}{3 \cdot 2} = 6,912\ \frac{m^3}{m^2} \cdot dia$
Velocidad de arrastre	Constante Cohesión: $k = 0,05$
	Gravedad específica: $s = 1,25$
	Aceleración de la gravedad: $g = 9,806\ \frac{m}{s}$
	Diámetro de partículas: $d = 100\ \mu m$
	Factor de fricción de Darcy-weisbach: $f = 0,025$
	$VA = \sqrt{\frac{8k(s-1)g \cdot d}{f}}$
	$VA = \sqrt{\frac{8 \cdot 0,05(0,25)(9,806)(100 \cdot 10^{-6})}{0,025}}$

	$VA = 0,0626 \frac{m}{s}$
	$A_x = profundidad \cdot ancho$
	$A_x = 3 \cdot 2 = 6$
Velocidad horizontal	$VH = \frac{Q}{A_x} = \frac{41,472 \frac{m^3}{dia}}{2} = 6,912 \frac{m}{dia}$
	$VH = 0,00008 \frac{m}{s}$
Tiempo de retención Hidráulico	$TRH = \frac{V}{Q} = \frac{6 \frac{m^3}{dia}}{41,472 \frac{m^3}{dia}} = 0,145 \text{ dias} = 3,47 \text{ h}$

Nota. Elaboración propia.

4.3.6. Actividad 6. FAFA

La verificación del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente se realiza bajo los mismos criterios del tanque séptico establecidos en el RAS 2000 (Tabla 37). La única diferencia radica en el medio filtrante, ya que para este diseño se propone el uso de rosetones plásticos en reemplazo de la grava.

Tabla 37

Valores recomendados para diseño de FAFA

Dimensiones	Valores recomendados
Profundidad, H (m)	0.6 – 1.8
Largo (m)	2H
Porosidad de medio	0.46 – 0.66
Área específica del medio (m^2/m^3)	98 – 130
Tiempo de retención (horas)	2.5 – 12
Concentraciones DBO (mg/L)	300 – 20.000
Rango de carga orgánica volumétrica	10 – 20 DBO Kg / m^3 / d
Carga Superficial	6 – 15 m^3/m^2 / día

Nota. Elaboración propia.

Con relación a este punto, el RAS 2000 establece que, para efectos prácticos, la porosidad del medio filtrante se puede asumir como 0.5, sin importar sus características específicas. La ecuación universal para calcular el volumen real del filtro es:

$$V = \frac{TRH * Q}{P} \quad \text{Ec. 11}$$

Tabla 38

Especificaciones FAFA

Especificaciones FAFA	
Tipo de medio filtrante (Grava: 1; Plástico 2)	2
Profundidad medio filtrante (Entre 0.6 y 1.8 m)	1
Porosidad	0.9

Nota. Elaboración propia.

P: representa la porosidad del medio filtrante. En el caso de medios plásticos, diversos autores y proveedores reportan valores de porosidad cercanos al 90% debido a su elevada área superficial. Por tal razón, para la verificación de las dimensiones del sistema se adopta un valor de 0.9.

DIMENSIONAMIENTO FAFA

Tabla 39

Dimensionamiento FAFA PBA PIENDAMÓ

Dimensionamiento PBA Piendamó	
TRH (4 – 12) Horas	12 h
Constante Degradación DBO ₅	1.2

Nota. Elaboración propia.

Volumen total del FAFA PBA PIENDAMÓ

$$V = \frac{TRH * Q}{P} \quad \text{Ec. 12}$$

$$V = 12h \cdot \frac{0,48 \frac{l}{s}}{0,9}$$

$$V = \frac{12 h * 0,03 l/s}{0,9}$$

$$V = \frac{0,5 \text{ dias} \cdot 41,4 \text{ m}^3 \text{ dia}}{0,9} = 23,04 \text{ m}^3$$

Tabla 40*Diseño FAFA PBA PIENDAMÓ*

Diseño fafa PBA Piendamó	
<i>Numero de unidades operando</i>	2
<i>Volumen</i>	11,5 m ³
<i>Altura Total H = hf + Falso fondo + Profundidad S. + Borde Libre</i>	2,6 m
<i>Area Superficial = As = $\frac{V \text{ m}^3}{H \text{ Total}}$</i>	4,42 m ²
<i>Ancho/ largo</i>	1:2
<i>As = L * 2A</i>	2*L ²
<i>$A = \sqrt{\frac{AS}{2}} = \sqrt{\frac{4,42}{2}}$</i>	1,48 m
<i>L · 2 · 1,48 m</i>	2,96 m
<i>Largo total (Incluyendo los 0.80 m de la recamara de la tubería)</i>	3,76 m
<i>Borde Libre</i>	0,50 m
	1.5 m
<i>Altura medio Filtrante</i>	
<i>Profundiad Area Sedimentacion</i>	0,3 m
<i>Falso Fondo</i>	0,3 m
<i>Tiempo de retencion hidraulico total dia</i>	1 día
<i>Tiempo de retencion hidraulico total horas</i>	24 h

Nota. Elaboración propia.

4.3.7. Actividad 7. Reactor Biológico PBA Piendamó

Se diseñará un reactor biológico aerobio, el cual consiste en una unidad hidráulica agitada para que los lodos activos se les facilite eliminar la materia orgánica que no alanzo a depurarse en las unidades anteriores y de esta manera garantizar una alta depuración de la masa de agua.

Las variables a tener en cuenta al diseñar la unidad es el Caudal, DBO y el requerimiento de Oxígeno Disuelto que requiere la masa de agua para que los microorganismos puedan reproducirse.

Tabla 41

Concentraciones vertimientos PBA Piendamó

Criterios de diseño reactor biológico	
Concentraciones última caracterización	
DBO ₅	1.459 mg/l
Q	0.48 l/s
REMOCION FAFA	70 %
DBO ₅ Después FAFA	437,7 mg/l
REMOCION ESPERADA REACTOR BIOLOGICO	80 %
CARGA CONTAMINATE KG/DBO/DIA	$CC = \text{Caudal} * \text{Concentración} * \text{factor de conversión} * \text{Tiempo}$ $CC = 0,48 * 437,7 * 0,0036 * 24$ $CC = 18,15 \text{ KG/DBO5/DIA}$
Q m3/día	41.472 m3/día
Requerimiento O ₂ / DBO ₅ procesos aerobios	1,5-2,0 mg/O ₂ /l
Cantidad de O ₂ / KG/DBO ₅	62,208. KG/O ₂
Cantidad de aporte de oxígeno de un aireador por caballo de fuerza por hora	1,5 KG / O ₂ / HP / h
Equipo requerido Aireador tipo Venturi	5 HP
Tiempo en horas de encendido de equipo Venturi	8.3 h /día

	$v = \frac{Q \cdot (S_0 - S_e)}{1000 \cdot eficiencia}$
Volumen reactor lodos activos	V: Volumen del reactor (m³) Q: Caudal de agua residual a tratar (m³/día) S₀: Concentración inicial de DBO (mg/L) S_e: Concentración final de DBO (mg/L) 1000: Factor de conversión para que las unidades sean consistentes (ya que 1 kg = 1000 g) Eficiencia: Porcentaje de DBO eliminado, expresado como decimal
Volumen reactor PBA Piendamó	$v = \frac{41,472 \frac{m^3}{dia} \left(437,7 \frac{mg}{l} - 43,7 \frac{mg}{l} \right)}{1000 \cdot 0,90} = 18,15 m^3$
Forma del reactor recomendada	cuadrada
Dimensiones	Altura útil 1.8 m
	Altura total 2 m
	Largo 3.4 m
	Ancho 3 m
Tiempo de Retención Hidráulico	$TRH = \frac{V}{Q} = \frac{18,15 m^3}{41,472 m^3 dia} = 0,43 dias$

Nota. Elaboración propia.

4.3.8. Actividad 8. Tratamiento Terciario Filtro Fito Pedológico

El filtro Fito pedológico, también conocido como lecho hidropónico de grava, se construye excavando una zanja en el terreno que funciona como un lecho filtrante. Esta zanja se impermeabiliza en el fondo, las paredes y la parte superior con geomembrana o polietileno de alta densidad, con el fin de impedir tanto la infiltración hacia el suelo como el ingreso del agua externa al sistema. La geomembrana de cobertura debe rasgarse o perforarse para permitir el desarrollo de las raíces de las plantas que serán sembradas sobre el lecho en una capa de tierra vegetal de 10 ó 15 cm de espesor.

El ingreso del AR mediante una caja de distribución. Esta estructura cuenta con un tabique interno que separa el afluente proveniente del tanque, el cual llega a través de una tubería, del flujo que se desplaza de forma horizontal hacia el lecho filtrante a través de un muro de ladrillo farol. En la salida se instala una caja colectora. El muro adyacente al lecho de grava se construye en ladrillo farol o rejilla para facilitar el paso del agua y a la vez retener el material de soporte. Esta caja se divide internamente con un tabique de mampostería que genera un desnivel, formando así un cámara de entrada o de rejilla y otra cámara de salida hacia el campo de infiltración.

Se pretende construir una unidad que sirva como sedimentador secundario y filtro Fito pedológico, lo cual quiere decir que tendrá plantas macrófitas emergentes.

Tabla 42

Concentraciones típicas de unidades terciarias.

Proceso	SST			DQO (mg/L)			DBO (mg/L)		
	E	S	% R	E	S	% R	E	S	% R
Lagunas con lentejas	-	-	-	-	-	-	-	-	90
Humedal artificial	92	19	79	176	38	78	72	36	50
Lodos activados y filtro percolador	-	-	83	-	-	89	-	-	92
Filtración con arena	-	35	-	-	166	-	-	40	-
Coagulación con aluminio	-	-	-	791	287	64	205	23	89
Reactor biológico de contacto	-	-	-	100-430	-	-	150	4	97
Reactor de lecho fluidizado	-	-	-	113-633	-	-	185	4	98
Bioreactor con membrana	-	-	-	493	24	95	-	-	-
Bioreactor con membrana	-	-	-	109	15	86	59	4	93
Humedales construidos	158	3	98	839	157	81	466	0.7	100

E = Entrada
S = Salida
R = Remoción

Nota. Elaboración propia

Consideraciones técnicas

Por consideración técnicas de tiempo de retención se recomienda que esta unidad tenga la misma capacidad del diseño del reactor biológico, es importante resaltar que los humedales o filtros Fito pedológicos alcanzan remociones superiores al 80%.

Tabla 43*Criterios de diseño Filtro Fito pedológico*

Criterios de diseño filtro fitopedológico	
TRH	0,43 días
DQO salida reactor	87,54
REMOCION estimada filtro Fito pedológico	80 %
DQO salida del filtro Fito pedológico	17,50 mg/l
Tipo de juncos	Papiro enano – Cola de gato
Dimensionamiento de la unidad	Altura útil 1.8 m
	Altura total 2 m
	Largo 3.4 m
	Ancho 3 m
Pendiente	5% con válvula de evacuación de lodos

Nota. Elaboración propia.**4.3.9. Actividad 9. Viabilidad económica**

Se realizó un análisis técnico para evaluar la capacidad de cada tecnología para manejar la masa contaminante y su efectividad en la reducción de parámetros críticos, donde los requerimientos de mantenimiento se pueden considerar las necesidades de mantenimiento y operación de cada sistema. Así mismo se inició un análisis económico donde se dan los costos de la implementación y se estimó los gastos iniciales de instalación y equipamiento como los costos de operación y de cuidado [11].

Para la planta de tratamiento propuesta se realizó una proyección de los precios, considerando tanto la inversión inicial en infraestructura y equipos, como los gastos operativos y de mantenimiento anuales. El enfoque utilizado fue el de Costo del Ciclo de Vida (LCC), metodología que facilita la estimación del monto global que se invertirá a lo largo la vida útil de la planta. Dentro de este análisis se contemplan rubros de adquisición de tecnología, consumo energético, insumos químicos y mano de obra especializada ISO 15686-5, 2017. Adicionalmente

se realizó la estimación teórica del cobro de la tasa retributiva anual, atendiendo a lo establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el Decreto 1076 de 2015, Título 9. El cálculo se basó en las cargas de DBO₅ y SST determinadas a partir de las muestras recolectadas y los análisis del laboratorio.

Posteriormente, la información registrada sobre la tasa retributiva se tabuló por medio de la herramienta ofimática como Microsoft Excel. De esta manera se elaboraron proyecciones económicas comparativas que sirvieron para contrastar diversos escenarios de implementación con distintas tecnologías de tratamiento.

Para el desarrollo de la PTAR propuesta en el marco de la PBA del municipio de Piendamó, se realizó una proyección detallada de los costos relacionados a su construcción y puesta en operación. Esta proyección financiera contempla inicialmente los recursos destinados en primera instancia a edificar la infraestructura, adquirir la maquinaria, instalar los procesos de tratamiento y adecuación del terreno. La determinación de estos costos de capital se tomó como referencia las especificaciones técnicas del proyecto, las particularidades del sitio y las normas vigentes establecidas para asegurar la eficiencia y viabilidad del sistema propuesto.

Dentro de los gastos de operación se tiene en cuenta los egresos con relación al consumo de energía eléctrica, reactivos químicos, mano de obra, monitoreo de la calidad del recurso hídrico, reposición de elementos, mantenimiento preventivo de la maquinaria y demás actividades necesarias para garantizar el adecuado desempeño del proceso de depuración. [17]. La estimación de estos costos anuales resulta clave para evaluar la factibilidad financiera del proyecto y asegurar una operación sostenible a largo plazo.

Tabla 44

Presupuesto de Construcción de la PTAR para la PBA del Municipio de Piendamó Cauca.

CIUDAD	PIENDAMO	DEPARTAMENTO			CAUCA
PRESUPUESTO					
PROYECTO: CONSTRUCCIÓN DE LAS OBRAS, SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE EQUIPOS, PUESTA EN MARCHA Y ASISTENCIA OPERATIVA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA PBA DEL MUNICIPIO DE PIENDAMO CAUCA					
Código	Descripción	Und	Cant	Costo Unitario	Costo Total
0	ESTIMACION DE COSTOS PTAR PBA PIENDAMO CAUCA				
1	PRELIMINARES Y ADECUACION DEL PREDIO				

2	ACTIVIDADES PRELIMINARES (DISEÑO)				\$ 9.058.324
	LOCALIZACIÓN Y REPLANTEO	2	462	874	403.788
	ROCERIA Y LIMPIEZA	2	462	1.676	774.312
3	EXCAVACIONES				
	DESCAPOTE Y LIMPIEZA CON MÁQUINA (E=50CM)	2	510	2.182	1.112.820
	EXCAVACIÓN MECANIZADA P/ESTRUCTURAS-MATER COMÚN/CONGLOM 0,0 A 6,0 M,	3	1.386	9.105	12.619.530
4	RELLENOS				
	RELLENO, CONFORMACION Y COMPACTACION A MAQUINA CON MATERIAL PROVENIENTE DE EXCAVACION (INCLUYE CARGUE, DESCARGUE)	3	521	6.636	3.457.356
5	RETIRO Y DISPOSICIÓN DE MATERIALES SOBRANTES				
	RETIRO Y DISPOSICION EN SITIO DE LA OBRA DE MATERIAL SOBRANTE, CARGUE MECANICO (<1KM)	3-KM	¹ 865	3.800	\$ 470,233,979,78
6	SEÑALIZACIÓN				
	SUMINISTRO, TRANSPORTE E INSTALACION SEÑAL VERTICAL GRADO DIAMANTE SR o SP (60cms x 60cms), CON POSTE	N	¹ 1	250.000	\$ 6,108,500,00
7	CERRAMIENTOS PROVISIONALES				
	CERRAMIENTO PROVISIONAL CON GUADUA Y TELA DE CERRAMIENTO H=2 M		1 800	4.800	3.840.000
8	TUBERIAS Y CONDUCCIONES				
	TUBERÍAS ALCANTARILLADO SANITARIO E INSTALACION TUBERIA PVC SANITARIA DE 6"		1 120	30.000	\$ 13,984,089,71
9	CONCRETOS Y MORTEROS				
	SUMINISTRO, TRANSPORTE E INSTALACION PAREDES Y LOZAALCANTARILLA DE	3	220	698.000	\$153.560.000

Este formato funciona como un mecanismo fundamental para la coordinación entre la entidad responsable del vertimiento y la autoridad reguladora. Esto se debe a que posibilita valorar tanto el desempeño ambiental como el avance en el cumplimiento de compromisos pactados.

VER FORMATO EN ANEXOS.

4.3.11. Discusión

Se diseñó un sistema siguiendo la metodología estipulada por las normas que rigen en Colombia como el RAS 2000, de igual manera se consideran los parámetros de operación normal y anormales de la PBA de Piendamó, y los temas técnicos que se encuentren en campo. Una vez obtenido el diseño se procedió a generar los planos en el aplicativo AutoCAD con detalles constructivos de la tecnología sugerida para implementar en la PBA del municipio de Piendamó.

La PBA del municipio de Piendamó, cuenta con unas unidades hidráulicas, en avanzado estado de deterioro, las cuales no garantizan cumplir su funcionalidad, ya que presentan grietas que permite la salida de la masa de agua residual afectando el suelo, también se observa en ellas acumulación de lodos, estas unidades son llamadas por el personal de la PBA como sedimentadores, no existen unidades hidráulicas complementarias que garanticen una depuración suficiente de la masa de agua residual, por tal motivo se plantea formular un sistema de manejo que logre la depuración de la masa de agua cumpliendo la normatividad ambiental vigente “Res 631/15” y que sea socio-económica-ambientalmente ejecutable [18].

Es importante considerar el entorno o área donde se puede llevar a cabo la construcción de las unidades, el cual tiene una pendiente superior al 30%, el cual beneficia al desarrollar proceso de tratamiento donde se utilice la gravedad para el paso de la masa de agua por las diferentes unidades hidráulicas.

La calidad del afluente de la PBA de Piendamó tiene características poco particulares que exigen que la PTAR cuente con un sistema preliminar robusto, ya que los pisos de las áreas de lavado y sacrificio son de concreto, los cuales se evidencian en las diferentes visitas realizadas que en los procesos de limpieza se desprende material como arenas y gravas que podrían dificultar el tratamiento de la masa de agua. Es por ello que el tren de tratamiento debe contar inicialmente con una recámara inicial de toma muestras que garantice la facilidad de recoger muestras de agua para su evaluación periódica, posterior a esta recámara se considera diseñar una recámara de desbaste

o cribado, que retenga sólidos gruesos y un desarenador que retenga partículas inorgánicas pesadas como arenas grava y arcilla, adicional al desarenador y teniendo presente el desprendimiento del materia de los pisos se considera ubicar un sedimentador primario que garantice la retención de todo tipo de sólidos que pueda sedimentarse por la acción de la gravedad.

Posterior a estas unidades hidráulicas y garantizando la retención de todos los sólidos gruesos y finos, se considera diseñar una trampa de grasas que nos permita eliminar estas sustancias que de no eliminarse previamente a las unidades de tratamiento secundario se adhieren fácilmente a las paredes y tuberías generando obstrucciones y afectando la eficiencia del sistema.

Como tercera unidad del tratamiento primario, después del sedimentador y trampa de grasas, se considera técnicamente que el diseño de un sistema séptico es el más apropiado, por la forma del terreno y las ventajas que ofrece al eliminar gran cantidad de materia orgánica por la acción de los microorganismos anaerobios, que consumen grandes cantidades de nutrientes para su ciclo de vida, es importante resaltar que la masa de agua de una PBA tiene altas cargas orgánicas por la sangre y rumen de los animales sacrificados. La primera unidad de tratamiento secundario se plantea diseñar un FAFA, “Filtro de Anaerobio de Flujo Ascendente” [10], esta unidad de tratamiento es complementaria del sistema séptico, ya que mejora su eficiencia, donde los microorganismos que salen con la masa de agua del séptico se adhieren al medio filtrante del FAFA logrando depurar en un 80% la DBO de toda la masa de agua que pasa por este medio filtrante.

Posterior al FAFA, y teniendo en consideración la concentración de DBO 1419 mg/l arrojada en las caracterizaciones realizada en el diagnóstico inicial, se busca completar el tratamiento secundario, con reactor biológico de principio de lodos activos, el cual busca que los microorganismos presentes en la masa de agua en presencia de oxígeno se reproduzcan exponencialmente logrando degradar en una gran mayoría la materia orgánica.

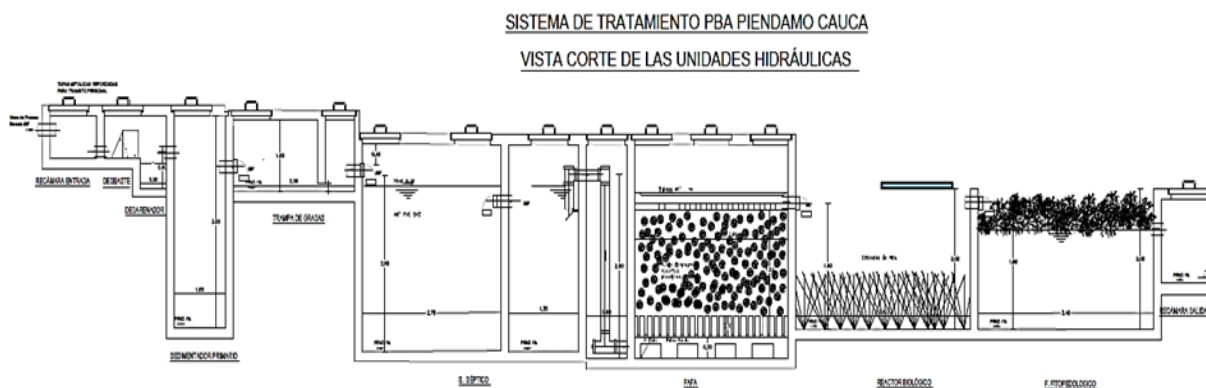
Es importante destacar que siempre después de un reactor biológico de lodos es indispensable diseñar un sedimentador secundario, pero teniendo en cuenta la búsqueda de la bibliografía se destaca que implementar un filtro Fito pedológico después de un reactor biológico no solo serviría como sedimentador secundario si no también como sistema de tratamiento terciario. Ya que se ubicarían plantas macrófitas comúnmente enraizadas en el suelo las cuales al estar emergentes en una unidad hidráulica se alimentará de los nutrientes materia orgánica y patógenos de la masa de agua, logrando un efluente con unas características superiores a las

exigidas por la normatividad ambiental. Como recamara final se diseña una unidad hidráulica de toma muestras, que permita evaluar la calidad de la masa de agua, tanto por los operadores como las autoridades ambientales competentes.

A continuación, en la figura 7 se plasma el tren de tratamiento número 3 elegido que asegura el cumplimiento de la norma nacional como la Resolución 0631 del 2015 [18]. A si mismo se procedió a generar los planos en el aplicativo AutoCAD con detalles constructivos, donde se tienen en cuenta caudales promedio, pico y criterios de diseño que ayudaron a llegar al diseño de la planta.

Figura 7

Sistema de tratamiento diseñado para darle solución a la PBA del Municipio de Piendamó Cauca.



Nota. Elaboración propia. Corte del sistema de tratamiento calculado, ver Anexos.

Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

En primer lugar, al realizar una evaluación del estado actual de la PBA se logró determinar que, la existencia de amplia deficiencia y de una manera significativa, en especial en la infraestructura, el manejo de residuos, protocolos ambientales y mantenimiento de equipos, todo esto con impactos a nivel del proceso operativa, el bienestar animal y el cumplimiento normativo; de ahí la surge la necesidad de implementar mejoras en el manejo de residuos, fortalecer la capacitación del personal y garantizar condiciones óptimas de higiene, seguridad y sostenibilidad ambiental.

Otro de los elementos encontrados dentro del proceso de investigación, se evidencia que para buscar elementos de mejora se debe iniciar con el diagnóstico para poder tener un punto de partida ante cambios y transformaciones que aporten al entorno y la calidad de la alimentación con los tratamientos en el cumplimiento de la norma como en el apoyo de todos los actores involucrados.

Por otro lado, ante los hallazgos encontrados se logra reconocer que se deben plantear alternativas del depuración de las aguas residuales de la PBA pero principalmente el diseño de un sistema integral que reduzca la carga orgánica, que cumpla con la normativa y mejore el bienestar de las personas y las condiciones ambientales, requiriendo la incorporación de nuevas tecnologías, el aprendizaje de experiencias exitosas y la participación conjunta del Estado, la administración y los empleados, acompañada de una gestión continua de mejora y sostenibilidad. Todo esto con mejoras en la calidad de los procesos, procedimientos y la gestión operativa.

Es importante resaltar que en la revisión documental se verifico que en el último siglo se han utilizado tratamientos físico-químicos para el manejo de aguas residuales utilizando los principios básicos de coagulación – floculación, combinándose con procesos de filtración por membranas, intercambio iónico, tratamientos electroquímicos, osmosis inversa y evaporación, sin embargo, estas técnicas no son económicamente favorables, ni ambientalmente sostenibles, por lo que se requiere imprescindible emplear una tecnología integral que busque reducir el costo, minimizar el impacto ambiental y el consumo de energía. Por esta razón, en los últimos 30 años, se ha incrementado la investigación e implementación de nuevos tratamientos biológicos que releguen a los tratamientos químicos.

Aunque el tratamiento químico de AR es el más rápido, las aguas residuales tratadas contienen productos químicos sintéticos que desencadenan diferentes afectaciones sobre el ambiente y los seres vivos. Por lo tanto, el tratamiento biológico de aguas residuales es la opción más amigable y respetuosa con el medio ambiente.

Por consiguiente, ante las realidades encontradas y las alternativas, determinadas, se logró diseñar un sistema de manejo de agua residuales para la eliminación de carga orgánica en la planta de beneficio animal, el diseño tiene la capacidad de asociarse con los procesos de pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario con criterios técnicos y normativos, permitiendo mejorar la eficiencia operativa, reducir los impactos ambientales, garantizar el cumplimiento legal y aportar a la sostenibilidad mediante el aprovechamiento de subproductos como lodos y biogás.

5.2. Recomendaciones

Diagnosticar periódicamente cada proceso y elemento de la planta para tomar decisiones y establecer aspectos de mejora continua de acuerdo con los contextos reales del contexto. Igualmente, presentar una mejora articulada con el presupuesto para poder consolidar mejoras significativas.

De ahí la capacidad de implementar un nuevo sistema de tratamiento diseñado con un plan de puesta en marcha progresiva que contemple fases de pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario, garantizando que cumpla con la Resolución 0631 de 2015 y demás normativas ambientales vigentes.

Gestionar espacios para cualificar a todos los actores involucrados y trabajadores de la planta en el manejo de los residuos y operación de equipos para mejorar eficiencia y responsabilidad ambiental.

Finalmente, se recomienda gestionar un plan de mantenimiento preventivo y correctivo para la infraestructura y equipos de la planta, asegurando su óptimo funcionamiento, minimizando fallas operativas y prolongando la vida útil de los sistemas implementados.

Referencias

- [1] Invima, «Decreto 1975 de 2019: Medidas en salud pública para plantas de beneficio animal y desposte», Invima. Accedido: 10 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.invima.gov.co/biblioteca/decreto-1975-2019-medidas-salud-publica-plantas-beneficio-animal>
- [2] C. A. Castro, «Estimaciones para el consumo de carne de cerdo en 2022 y 2023». Accedido: 11 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.3tres3.com/es-mx/print/14583>
- [3] Y. D. Huarachi Núñez y C. Huanacuni Lupaca, «Sistema de tratamiento de aguas residuales del matadero municipal de Tacna», *Ing. INVESTIGA*, vol. 3, n.º 1, pp. 546-559, jun. 2021, Accedido: 11 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.upt.edu.pe/ojs/index.php/ingenieria/article/view/480>
- [4] A. J. Otero Paba, «Regulación sanitaria y ambiental de las plantas de beneficio animal, distribución de competencias y desafíos de la implementación», Trabajo de grado maestría, Universidad Externado de Colombia, Bogotá, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://bdigital.uexternado.edu.co/handle/001/14458>
- [5] J. V. Zapata, «Minambiente en Colombia reglamenta uso de aguas residuales», Holland & Knight, 2021. Accedido: 11 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.hklaw.com/en/insights/publications/2021/11/minambiente-en-colombia-reglamenta-uso-de-aguas-residuales>
- [6] Gestor normativo, «Decreto 1500 de 2007 - Gestor Normativo». Accedido: 11 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=38923>
- [7] J. A. Arboleda González, «Manual para la evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades», 2005, Accedido: 11 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/download/38236079/MANUAL_EIA_-_1.pdf
- [8] M. A. Cachaya Rodríguez, M. A. Sánchez Mendoza, y K. García Mosquera, «Evaluación de Impacto Ambiental para la Implementación de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en el Conjunto Residencial Quintas de Morelia III, Municipio de Villavicencio», Trabajo de grado pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia, Villavicencio, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12494/53309>

- [9] Ministerio de Ambiente, «En 2022, Colombia aspira a tratar el 54 % de las aguas residuales urbanas». Accedido: 11 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/en-2022-colombia-aspira-a-tratar-el-54-de-las-aguas-residuales-urbanas/>
- [10] «CorAntioquia, “Plantas de beneficio animal,” 2016.» Accedido: 11 de agosto de 2026.
- [11] J. M. Mantilla González, C. A. Duque Daza, y C. H. Galeano Urueña, «Diseño y estudio económico preliminar de una planta productora de biogas utilizando residuos orgánicos de ganado vacuno», *Ing. E Investig.*, vol. 27, n.º 3, pp. 133-142, dic. 2007. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-56092007000300015&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- [12] J. A. Quintero, «Diseño de propuesta de mejora del sistema de tratamiento de aguas residuales para reducir los niveles de contaminantes de un complejo agroindustrial en la ciudad de Ilo, 2022», Trabajo de grado pregrado, Universidad Continental, 2022, Accedido: 11 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/item/ef3d6128-ba64-4f91-8069-01d4fe4050d9>
- [13] J. C. Luque López, «Propuesta de un Sistema de Tratamiento para Aguas Residuales Producto de Actividades Ganaderas», tesis de maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/entities/publication/7568343d-0048-4d2f-a52c-7d3c7fa6c763>
- [14] K. Figueroa Rodríguez, «Diagnóstico de las condiciones de diseño, construcción y operación de las plantas de tratamiento de agua residual de la vereda la Florida y del centro de sacrificio del municipio de Piendamó», trabajo de grado pregrado, Universidad Autónoma de Occidente, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://red.uao.edu.co/entities/publication/b716ac1c-ec26-4058-a7cb-ce5c4e570000>
- [15] G. Tapias Quiroga y V. Peña Ortiz, «Planta de sacrificio de ganado: matadero municipal». Bogotá: SENA, 1992. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/3843>
- [16] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, «Resolución 0330 - 2017». Accedido: 11 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-0330-2017-0>

- [17] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, «Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS». Accedido: 11 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico-reglamento-tecnico-sector-reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable-y-saneamiento-basico-ras>
- [18] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Resolución 631 de 2015». Accedido: 14 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-631-de-2015/>
- [19] IDEAM, «Instructivo TI0187: Toma de Muestras de Aguas Residuales en Colombia», 2007.
- [20] L. L. Bridgewater *et al.*, Eds., *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 23rd edition. Washington, DC: American Public Health Association, 2017.
- [21] V. Y. Piqueras, «Norma ISO 15686-5 sobre los costes del ciclo de vida de edificios y construcciones», El blog de Víctor Yepes. Accedido: 11 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2025/01/15/norma-iso-15686-5-sobre-los-costes-del-ciclo-de-vida-de-edificios-y-construcciones/>
- [22] «Decreto 1076 de 2015». Accedido: 11 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- [23] K. M. Triana Barrera, «Impactos ambientales generados en plantas de beneficio bovino», trabajo de grado pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2017, Accedido: 11 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/26920>
- [24] M. L. Jaramillo-Gallego, R. M. Agudelo-Cadavid, y G. A. Peñuela-Mesa, «Optimización del tratamiento de aguas residuales de cultivos de flores usando humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal», *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, vol. 34, n.º 1, pp. 20-29, abr. 2016, doi: 10.17533/udea.rfnsp.v34n1a03.
- [25] L. Salazar-Larrota *et al.*, «Análisis de la eficiencia de reactores UASB en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales», *DYNA*, vol. 86, n.º 209, pp. 319-326, jun. 2019, doi: 10.15446/dyna.v86n209.70332.
- [26] D. Moreno, D. Jaimes, y Y. Ochoa, «Reactores UASB como técnica para el tratamiento de contaminantes de aguas residuales y lixiviados», *Rev. Ing-Nova*, vol. 1, pp. 215-226, jul. 2022, doi: 10.32997/rin-2022-4006.

- [27] N. Taghiyeva, E. Abdullayev, F. Baroudi, U. Hasanova, y M. Millet, «A comprehensive review of organic pollutants removal techniques: adsorption, degradation, and advanced treatment processes», *Total Environ. Eng.*, vol. 7, p. 100082, jun. 2026, doi: 10.1016/j.teengi.2026.100082.
- [28] V. A. Burboa Charis, M. Orrantia López, y L. H. Álvarez. Valencia, «Materiales conductores de electrones y su impacto durante la producción anaerobia de metano», *Entreciencias Diálogos En Soc. Conoc.*, vol. 11, n.º 25, 2023, Accedido: 11 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.unam.mx/index.php/entreciencias/article/view/85046>
- [29] T. Li, R. Li, y Q. Zhou, «The application and progress of bioelectrochemical systems (BESs) in soil remediation: A review», *Green Energy Environ.*, vol. 6, n.º 1, pp. 50-65, feb. 2021, doi: 10.1016/j.gee.2020.06.026.
- [30] C. Menéndez Gutiérrez y J. Dueñas-Moreno, *Tratamiento de aguas residuales mediante procesos de biopelícula*. 2021. doi: 10.13140/RG.2.2.22161.35682.

Anexos

Anexo 1

Área de estudio



Nota. Elaboración propia.

Anexo 2

Caja de inspección



Nota. Elaboración propia.

Anexo 3

Toma de muestras



Nota. Elaboración propia.

Anexo 4

Punto de vertimiento para toma de muestras



Nota. Elaboración propia.

Anexo 5*Toma de muestra*

Nota. Elaboración propia.

Anexo 6*Captación de la muestra*

Nota. Elaboración propia.

Anexo 7*Muestras en el laboratorio*

Nota. Elaboración propia.

Anexo 8*Análisis de muestras*

Nota. Elaboración propia.

Anexo 9*Análisis de Sólidos*

Nota. Elaboración propia.

Anexo 10*Muestras*

Nota. Elaboración propia.

Anexo 11*Encuesta***Encuesta**

Objetivo dentro de la investigación: Realizar un diagnóstico de las condiciones actuales de la planta de beneficio animal.

Cordial saludo, espero que se encuentre muy bien. Gracias por participar en esta encuesta que permitirá conocer las condiciones actuales de la planta de beneficio animal. Recuerde que su participación es voluntaria y que esta actividad se desarrolla al margen de un proceso académico dentro de un proyecto de investigación.

Agradecemos seleccionar la respuesta que considere correcta según su elección.

Condiciones de la planta de beneficio ambiental

1. ¿En el desarrollo de la actividad principal de la planta qué recurso se usa principalmente?

- A. Energía
- B. Agua
- C. Insumos alimenticios
- D. Gas
- E. Otros ¿Cuáles?: _____

2. ¿Cuál es el tipo de actividad que realiza la planta de beneficio animal?

- A. Sacrificio de bovinos
- B. Sacrificio de porcinos
- C. Sacrificio de otros animales.

¿Cuáles?: _____

3. ¿Cuántos sacrificios se realizan a la semana por semana en la planta?

- A. Menos de 10
- B. Entre 10 a 30
- C. Entre 31 a 50
- D. Más de 51

4. ¿La planta cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales?

- A. Sí
- B. No
- C. En proceso de instalación
- D. No estoy seguro

5. ¿Qué tipo de residuos genera la planta? (Seleccione todas las que apliquen)

- A. Residuos orgánicos
- B. Residuos líquidos
- C. Residuos sólidos
- D. Otros ¿Cuáles?: _____

6. ¿Cómo se gestionan actualmente los residuos generados por la planta?

- A. Se disponen en rellenos sanitarios

- B. Se vierten directamente al agua
- C. Se compostan
- D. Otro ¿Cuál?: _____

7. ¿La planta de beneficio animal realiza algún tipo de capacitación a su personal sobre el manejo de residuos y tratamiento de aguas?

- A. Sí, de forma regular
- B. Sí, ocasionalmente
- C. No
- D. No estoy seguro

8. ¿Cómo calificaría las condiciones de higiene y seguridad en la planta de beneficio animal?

- A. Muy buenas
- B. Buenas
- C. Regulares
- D. Malas
- E. Muy malas

9. ¿Cuál es su percepción sobre el cumplimiento de las normativas ambientales en la planta?

- A. Totalmente cumplidas
- B. Mayormente cumplidas
- C. Poco cumplidas
- D. No se cumplen en absoluto
- E. No estoy seguro

10. ¿Qué aspectos considera que se deben mejorar en la planta de beneficio animal? (Seleccione todas las que apliquen)

- A. Infraestructura
- B. Manejo de residuos

- C. Capacitación del personal
- D. Cumplimiento normativo
- E. Manejo de higiene y seguridad a los empleados

11. ¿Qué tiempos se usan para los tiempos de operación?

- A. Menos de una hora
- B. Entre 1 a 2 horas
- C. Entre 3 horas a 5 horas
- D. Más de 5 horas

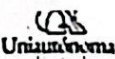
12. ¿Cuántas personas son necesarias para la operación?

- A. 1 persona
- B. Entre 2 a 4 personas
- C. 5 personas a 10 personas
- D. Más de 10 personas.

Nota. Elaboración propia.

Anexo 12

Respuesta de la encuesta

 Uniaurora	PROPUESTA TRABAJO DE GRADO FORMACIÓN ACADÉMICA	Versión: 1 Fecha: 16-06-2022 Pág.: 15
--	---	---

Condiciones de la planta de beneficio ambiental

1. ¿En el desarrollo de la actividad principal de la planta qué recurso se usa principalmente?
 - A. Energía ☒
 - B. Agua ☒
 - C. Insumos alimenticios
 - D. Gas
 - E. Otros ¿Cuáles?: Productos de Aseo y Desinfección - Talento Humano

2. ¿Cuál es el tipo de actividad que realiza la planta de beneficio animal?
 - A. Sacrificio de bovinos ☒
 - B. Sacrificio de porcinos
 - C. Sacrificio de otros animales. ¿Cuáles?: _____

3. ¿Cuántos sacrificios se realizan a la semana por semana en la planta?
 - A. Menos de 10 ☒
 - B. Entre 10 a 30
 - C. Entre 31 a 50
 - D. Más de 51

4. ¿La planta cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales?
 - A. Sí
 - B. No
 - C. En proceso de instalación ☒
 - D. No estoy seguro

5. ¿Qué tipo de residuos genera la planta? (Seleccione todas las que apliquen)
 - A. Residuos orgánicos ☒
 - B. Residuos líquidos ☒
 - C. Residuos sólidos ☒
 - D. Otros ¿Cuáles?: _____



**FORMATO
PROPUESTA TRABAJO DE GRADO
FORMACIÓN ACADÉMICA**

Código: F-FA-008
Versión: 1
Fecha: 15-05-2022
Pág.: 15

6. ¿Cómo se gestionan actualmente los residuos generados por la planta?

- A. Se disponen en rellenos sanitarios
- B. Se vierten directamente al agua
- C. Se compostan
- D. Otro ¿Cuál?: Se entregan a una empresa

7. ¿La planta de beneficio animal realiza algún tipo de capacitación a su personal sobre el manejo de residuos y tratamiento de aguas?

- A. Sí, de forma regular
- B. Sí, ocasionalmente ☒
- C. No
- D. No estoy seguro

8. ¿Cómo calificaría las condiciones de higiene y seguridad en la planta de beneficio animal?

- A. Muy buenas
- B. Buenas ☒
- C. Regulares
- D. Malas
- E. Muy malas

9. ¿Cuál es su percepción sobre el cumplimiento de las normativas ambientales en la planta?

- A. Totalmente cumplidas
- B. Mayormente cumplidas
- C. Poco cumplidas ☒
- D. No se cumplen en absoluto
- E. No estoy seguro

10. ¿Qué aspectos considera que se deben mejorar en la planta de beneficio animal?
(Seleccione todas las que apliquen)

- A. Infraestructura ☒
- B. Manejo de residuos ☒
- C. Capacitación del personal ☒
- D. Cumplimiento normativo ☒
- E. Manejo de higiene y seguridad a los empleados

11. ¿Qué tiempos se usan para los tiempos de operación?

- A. Menos de una hora
- B. Entre 1 a 2 horas
- C. Entre 3 horas a 5 horas ☒
- D. Más de 5 horas

12. ¿Cuántas personas son necesarias para la operación?

- A. 1 persona
- B. Entre 2 a 4 personas
- C. 5 personas a 10 personas
- D. Más de 10 personas. ☒

Nota. Elaboración propia.

Anexo 13

Ficha de observación

Ficha de observación	
Objetivo dentro de la investigación: Realizar un diagnóstico de las condiciones actuales de la planta de beneficio animal.	
Fecha de la observación	
Observador	
Aspecto específico para observar	
Observación	

Nota. Elaboración propia.

Anexo 14

Ficha de observación diligenciada

	FORMATO PROPUESTA TRABAJO DE GRADO FORMACIÓN ACADÉMICA	Código: F-FA-008 Versión: 1 Fecha: 16-06-2022 Pág.: 17
	Anexo B. Ficha de observación Ficha de observación	
Objetivo dentro de la investigación: Realizar un diagnóstico de las condiciones actuales de la planta de beneficio animal.		
Fecha de la observación Observador Aspecto específico a observar	29/05/2025 Estudiantes - de la Universidad Autónoma Infraestructura y Equipos	
Observación	<u>Infraestructura</u> * Se observa deterioro en el recubrimiento de pisos, del área de corrales de espera, con presencia de grietas, y zonas con acumulación de agua, también estas se observa grietas en los pisos y muros del área de operación, lo cual esto genera daños en el bienestar animal Equipos <u>EQUIPOS</u> * Se evidencian deficiencias en el estado de mantenimiento de los Equipos de partes como desgastes, donde compromete a la efectividad del procedimiento y genera un impacto negativo en el Bienestar animal y la eficiencia del proceso	

	FORMATO PROPUESTA TRABAJO DE GRADO FORMACIÓN ACADÉMICA	Código: F-FA-008
		Versión: 1
		Fecha: 16-06-2022
		Pág.: 17

Anexo B. Ficha de observación
Ficha de observación

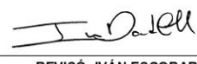
Objetivo dentro de la investigación: Realizar un diagnóstico de las condiciones actuales de la planta de beneficio animal.

Fecha de la observación	
Observador	
Aspecto específico a observar	
Observación	Infraestructura de la PTAR • Deterioro en muros del tanque, Sedimentador con presencias de fisuras visibles, filtraciones lo cual compromete la estabilidad de la estructura y genera riesgos de contaminación del suelo o cuerpos de agua cercanos • Por otra parte se observa acumulación de sólidos flotantes y espumas, camara de de ar también con presencia de malos olores persistentes en el entorno, con mucha presencia de vectores lo que indica un funcionamiento deficiente del sistema de tratamiento biológico y posibles fallas en la operación o mantenimiento del sistema.

Nota. Elaboración propia.

Anexo 15

Resultados de laboratorio SENA

				Código: LAA-F-047-03		
Laboratorio de Análisis Ambientales Centro de Teleinformática y Producción Industrial						
INFORME DE RESULTADOS N° COT-030625-10-001						
Razón Social : NIT/CC: Municipio/Departamento:		Jurídica 1002952605 Popayán		FECHA DE EMISIÓN: 2025-06-10		
DATOS DEL CLIENTE Solicitante: JOHAN PECHENE Contacto: JOHAN PECHENE Dirección: Calle 5 # 8-58		Teléfono: 3188937547 e-mail: pechenejohan113@gmail.com				
INFORMACIÓN DE LA MUESTRA						
Identificación de la muestra: Agua residual matadero Matriz/Tipo de muestra: AGUA Fecha recepción de la 2025-06-06		N° muestras en lote: 6 Preservación: Refrigeración		Código Muestra: RM250606001 Código lote: RM250606		
DATOS DE MUESTREO						
Sitio de muestreo: Matadero Piendamó Longitud: N/D		Latitud: N/D		Altitud (msnm): N/D		
Fecha muestreo: 2025-06-06		Responsable muestreo: Cliente				
Plan de Muestreo: N/A		Hora muestreo: N/D		Tipo muestreo: Simple		
Observaciones muestreo:						
RESULTADOS						
Parámetro	Unidad	Resultado	± U	Fecha Análisis	Método de Ensayo	Valor de Referencia Normativo
Coliformes Totales (Cuantitativo)	UFC/100mL	2.2E+06	N.R.	2025-06-07	SM 9222 B Ed. 24. 2023	N/A
Escherichia coli (Cuantitativo)	UFC/100mL	1.6E+06	N.R.	2025-06-07	SM 9222 B Ed. 24. 2023	N/A
Abreviaturas: (NA) No Aplica (N.R) No Reporta (<) Reporte menor al límite de cuantificación del método (± U) Incertidumbre						
OBSERVACIONES:						
DESCARGO DE RESPONSABILIDAD El laboratorio NO EMITE OPINIONES NI DECLARACIONES acerca del cumplimiento de requisitos y/o especificaciones. El laboratorio no declara conformidad. El laboratorio no es responsable por información suministrada por el cliente. La validez de los resultados aquí reportados depende de las condiciones en que la muestra fue recibida. El resultado hace referencia única y exclusivamente a la muestra indicada en este informe, de acuerdo con las condiciones en que se recibió por parte del cliente. El laboratorio no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de la información aquí contenida y de las muestras analizadas.						
ACLARACIONES El laboratorio prohíbe la reproducción parcial o total de este informe, sin previa autorización. El cliente cuenta hasta con 5 días hábiles a partir de la fecha de emisión del informe para cualquier solicitud de verificación de resultados. El laboratorio evaluará viabilidad de la solicitud para volver a analizar la contramuestra custodiada por el laboratorio. En caso de no contar con contramuestra o que la misma no se encuentre en condiciones adecuadas para el análisis, no se podrán realizar repeticiones y la verificación se hará frente a la trazabilidad metrológica del resultado. El Laboratorio de Análisis Ambientales no subcontrata ensayos.						
 ELABORÓ: LUIS EDUARDO ROMERO Responsable Gestión Técnica y Administrativa Ingeniero Químico No. TP: 12989 CPIQ			 REVISÓ: IVÁN ESCOBAR Apoyo Administrativo y de Sistema de Gestión Ingeniero Ambiental No. TP: 19238174377CAU			
FIN DEL INFORME DE ENSAYO LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTALES CARRERA 9 NÚMERO 71N - 60, POPAYÁN, CAUCA Correo electrónico: labambientaltipi@sena.edu.co Teléfono / WhatsApp: 324 6128123						

Nota. Elaboración propia.

Anexo 16

Dibujos AUTOCAD

Anexos F

DIBUJOS 1 CAD PTAR PBA PIENDAMO.pdf

