



**Optimización de la Planta de Tratamiento de Agua Residual no Domestica (PTARnD) de la
Planta de Desposte y Derivados Cárnicos Quality Beef**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Ambiental

Juan Andrés Gómez Flórez

Alejandro de Jesús Molina Gonzales

Ingeniero Sanitario, Especialista en Gerencia de Proyectos

Corporación Universitaria Lasallista

Facultad de ingeniería

Caldas, Antioquia

2026

Agradecimiento

Deseo expresar mi más profundo amor e infinito agradecimiento a mi madre y a mi abuela. Fue su sacrificio diario y su apoyo inquebrantable lo que hizo posible que hoy pueda culminar esta etapa de mi formación profesional. Sin ustedes, este logro simplemente no habría sido posible.

A mi asesor, le agradezco su orientación académica y el acompañamiento brindado durante el desarrollo de este trabajo.

A la empresa Euro Supermercados, agradezco sinceramente la oportunidad de realizar mis prácticas empresariales en la Planta de Desposte y Derivados Cárnicos Quality Beef. De manera especial, extendiendo mi gratitud al equipo de trabajo de esta última, quienes, con su disposición, colaboración y apoyo, fueron fundamentales para el desarrollo del proyecto.

Finalmente, agradezco a cada persona que, a lo largo de estos cinco años de carrera, me brindó su ayuda. Cada gesto, desde el más pequeño hasta el más trascendental, dejó una huella importante en este camino y contribuyó a que hoy este logro sea una realidad.

A todos ustedes, gracias. Este logro no marca un final, sino el silencioso cierre de una etapa construida con esfuerzo, sacrificio y esperanza, donde cada recuerdo permanece.

Resumen

El presente trabajo se desarrolló en la Planta de Desposte y Derivados Cárnicos Quality Beef, empresa dedicada al procesamiento de productos bovinos y porcinos para su distribución en las 20 sedes de la cadena de supermercados Euro, ubicadas en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Montería y Barranquilla. El estudio tuvo como propósito formular una propuesta integral de optimización para la planta de tratamiento de aguas residuales no domésticas (PTARnD), actualmente en operación, debido a antecedentes de contingencias asociadas a sobrecargas hidráulicas y episodios de incumplimiento en la calidad del efluente vertido al alcantarillado público, según los criterios establecidos en la Resolución 0631 de 2015. La metodología incluyó la recopilación técnica de información sobre la construcción, operación y desempeño histórico del sistema, así como el análisis de caracterizaciones fisicoquímicas del agua residual cruda y del efluente tratado. Adicionalmente, se realizó un aforo volumétrico para determinar con precisión el caudal real generado en 2025, insumo fundamental para evaluar las capacidades hidráulicas de las unidades existentes. A partir de los resultados, se diagnosticaron las principales limitaciones operativas del sistema y se desarrolló un diseño optimizado que integra la infraestructura disponible con proyecciones de crecimiento productivo, incorporando ajustes en el manejo de caudales y el redimensionamiento de unidades críticas. La propuesta final establece una actualización técnico-operativa que permite mejorar la eficiencia del sistema, reducir riesgos de contingencia y fortalecer así la confiabilidad y continuidad del tratamiento en la PTARnD de Quality Beef.

Palabras clave: Agua residual no doméstica, optimización, caudal, tratamiento de aguas residuales no doméstica.

Abstract

The present study was conducted at the Quality Beef Meat Cutting and Processed Products Plant, a company dedicated to the processing of beef and pork products for distribution to the 20 branches of the Euro supermarket chain located in the Metropolitan Area of the Aburrá Valley, Montería, and Barranquilla. The objective of the study was to formulate a comprehensive optimization proposal for the Non-Domestic Wastewater Treatment Plant (NDWWTP) currently in operation, due to previous contingencies associated with hydraulic overloads and episodes of non-compliance with the quality of the effluent discharged into the public sewer system, in accordance with the criteria established in Resolution 0631 of 2015. The methodology included the technical collection of information regarding the construction, operation, and historical performance of the system, as well as the analysis of physicochemical characterizations of the raw wastewater and the treated effluent. Additionally, a volumetric flow measurement was carried out to accurately determine the actual flow rate generated in 2025, which served as a fundamental input for evaluating the hydraulic capacities of the existing treatment units. Based on the results obtained, the main operational limitations of the system were identified, and an optimized design was developed that integrates the available infrastructure with projected production growth, incorporating adjustments in flow management and resizing of critical units. The final proposal establishes a technical and operational update that improves system efficiency, reduces contingency risks, and thereby strengthens the reliability and continuity of treatment at the Quality Beef Non-Domestic WWTP.

Keywords: Non-domestic wastewater, optimization, flow rate, non-domestic wastewater treatment.

Table de contenido

Introducción	11
Planteamiento del problema.....	13
Justificación	15
Objetivos.....	17
Objetivo general.....	17
Objetivos específicos	17
Alcance y limitaciones.....	18
Marco teórico	20
El agua en la industria alimenticia	20
<i>Agua Residual Domestica</i>	20
<i>Agua Residual no Domestica</i>	20
Tratamiento del Agua Residual.....	21
<i>Pretratamiento</i>	21
<i>Tratamiento primario</i>	23
<i>Tratamiento secundario</i>	24
<i>Tratamiento terciario</i>	25
<i>Lodos</i>	25
Normatividad	27
Metodología	29
Determinación del Índice Volumétrico de Lodos	32
<i>Procedimiento:</i>	32
Determinación velocidad de sedimentación solidos sedimentables	33
<i>Procedimiento:</i>	33
Diseño trampa de grasa.....	34
Diseño tanque de igualación.....	35

Diseño Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente	36
Diseño Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente	41
Resultados	43
Diagnóstico de la actual planta de tratamiento de aguas residuales no domésticas.....	43
<i>Descripción del estado y funcionamiento del tren de tratamiento actual</i>	<i>43</i>
<i>Recopilación de información de interés</i>	<i>51</i>
Caudal de agua Residual no Domestica.....	58
Evaluación del tiempo de retención hidráulica (TRH) de las unidades de tratamiento actual en función del caudal actual Vs el de diseño.....	65
<i>Evaluación del comportamiento de lodos de la PTARnD.....</i>	<i>67</i>
<i>Análisis de la actual Planta de Tratamiento de Agua Residual no Domestica</i>	<i>68</i>
Propuesta de optimización de Planta de Tratamiento de Agua Residual no Domestica... 71	
<i>Cribado</i>	<i>71</i>
<i>Trampa de grasa</i>	<i>73</i>
<i>Tanque de igualación de caudal</i>	<i>74</i>
<i>Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente.....</i>	<i>75</i>
<i>Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente</i>	<i>76</i>
Evaluación bomba sumergible	77
Evaluación tubería de impulsión.....	78
Planos hidráulicos de las unidades optimizadas de la PTARnD.....	79
<i>Tratamiento preliminar</i>	<i>81</i>
<i>Reactor anaerobio de flujo ascendente.....</i>	<i>87</i>
<i>Filtro anaerobio de flujo ascendente</i>	<i>89</i>
Conclusiones	92
Recomendaciones	93
Referencias.....	94
Apéndice	98
Apéndice A: Memoria de calculo	98

Apéndice B: Planos hidráulicos 98

Índice de tablas

Tabla 1 Valores límites máximos permisibles para parámetros de Aguas Residuales no Domesticas de actividades del beneficio dual de bovinos y porcinos	28
Tabla 2 Ecuaciones de Volumen en m ³ para cilindros y prismas rectangulares	29
Tabla 3 Fórmula TRH y los valores recomendados por la normatividad colombiana para este parámetro para ciertas unidades de tratamiento	30
Tabla 4 Parámetros de interés diseño trampa grasa	35
Tabla 5 Parámetros de diseño Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente.....	36
Tabla 6 Valores limites, intervalos y sugerencias de parámetros de diseño.....	37
Tabla 7 Ecuaciones aplicadas en el dimensionamiento del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente	39
Tabla 8 Valores limites, intervalos y sugerencias de parámetros de diseño.....	41
Tabla 9 Ecuaciones aplicadas en el dimensionamiento del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente	42
Tabla 10 Caracterización del Agua Residual no Domestica cruda	51
Tabla 11 Resultados de caracterizaciones de vertimientos de proveniente de la Planta Quality Beef.....	54
Tabla 12 Valor de carga por contaminantes del 2016 al 2025.....	58
Tabla 13 Recopilación de caudales del año 2016 al 2025	59
Tabla 14 Caudales afluentes a la PTARnD obtenidos del monitoreo continuo de 12 horas en la Planta Quality Beef.....	60
Tabla 15 Recopilación de dimensiones, volúmenes y TRH diseño Vs TRH actual de las unidades de tratamiento.....	65
Tabla 16 Resultados de IVL en los tres puntos de muestro analizados	67
Tabla 17 Resultado IVL punto de muestreo 1.....	68
Tabla 18 Resultado IVL punto de muestreo 2.....	68
Tabla 19 Resultado IVL punto de muestreo 3.....	68
Tabla 20 Dimensionamiento cribado	72
Tabla 21 Dimensionamiento trampa de grasa.....	73

Tabla 22 Dimensionamiento tanque de igualación de caudal	74
Tabla 23 Dimensionamiento UASB.....	76
Tabla 24 Dimensionamiento Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente	77
Tabla 25 Evaluación diámetro mínimo requerido tubería de impulsión.....	78

Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de flujo funcionamiento de la PTARnD actual.....	44
Figura 2 Caudales obtenidos por método volumétrico del afluente de la Planta Quality Beef	64
Figura 3 Curvas de rendimiento seleccionadas para la evaluación de la bomba de succión	77
Figura 4 Vista en planta propuesta PTARnD	80
Figura 5 Vistas sistema de cribado tipo canastilla	82
Figura 6 Vista en planta sistema de tratamiento preliminar.....	84
Figura 7 Vista B-B cámaras de la trampa grasa	85
Figura 8 Vista A-A paso entre trampa grasa y tanque de igualación	86
Figura 9 Vistas en planta UASB	87
Figura 10 Vista A-A UASB.....	88
Figura 11 Vista en planta FAFA	89
Figura 12 Vista A-A FAFA y detalle lado de viga.....	90
Figura 13 Vista en planta del falso fondo FAFA.....	91

Introducción

La Planta de Desposte y Derivados Cárnicos Quality Beef, ubicada en el municipio de Itagüí, departamento de Antioquia, Colombia, desarrolla procesos del sector industrial de alimentos cárnicos de origen porcino y bovino. En sus operaciones se incluyen actividades como el recibo de canales, desposte, porcionado, empaque y transformación en derivados cárnicos, tales como chorizos, salchichas, ahumados y morcilla. La planta funciona como proveedor de cortes de carne y productos procesados para la cadena de supermercados Euro.

La operación de la organización requiere un uso constante de agua potable para labores de lavado, higienización y procesos propios de sus líneas de producción. Como consecuencia, se genera un afluente de agua residual no doméstica con cargas contaminantes específicas asociadas a la actividad industrial. La gestión de estas aguas se realiza mediante la planta de tratamiento de aguas residuales no domésticas (PTARnD), la cual fue diseñada e instalada desde el inicio de la operación de la planta en el año de 2016.

La PTARnD fue concebida bajo condiciones iniciales de caudal y cargas contaminantes acordes con el nivel de producción de ese momento. No obstante, aunque la infraestructura física de la empresa se ha mantenido sin modificaciones, la demanda operativa, la frecuencia de las actividades y la producción total de carne y derivados han aumentado de forma significativa. Este incremento se ha reflejado directamente en el comportamiento hidráulico del sistema, se evidencia un aumento del caudal de agua residual con respecto al valor de diseño.

La organización está sujeta al cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015, en particular a lo establecido en el artículo 16, referente a los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas al alcantarillado público, y en el artículo 9, que define los parámetros fisicoquímicos y los valores máximos permisibles para los vertimientos a cuerpos de agua superficiales provenientes de actividades agroindustriales y ganaderas. Actualmente, la PTARnD produce un efluente que cumple con los valores exigidos por la normatividad, siendo el único antecedente de incumplimiento el parámetro de aceites y grasas reportado en el año 2024.

Sin embargo, durante la operación diaria se han identificado situaciones de contingencia asociadas a sobrecargas hidráulicas. Entre ellas se destacan rastros de rebose en la caja de entrada del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA o UASB, por sus siglas en inglés) y, especialmente, el aumento del nivel en la trampa de grasas, que alcanza alturas superiores al metro y medio del muro que la separa del tanque homogeneizador. Este comportamiento evidencia que el caudal actual supera de forma recurrente la capacidad de almacenamiento y tránsito entre unidades, permitiendo el paso de sólidos, grasas y aceites que deberían ser retenidos en las etapas preliminares del tratamiento.

La presencia de estos contaminantes en las unidades posteriores compromete la eficiencia global del sistema, reduce el tiempo de retención hidráulica (TRH) y puede generar taponamientos en tuberías, afectaciones en las bombas de succión y sobrecargas en las unidades posteriores, las cuales no están diseñadas para manejar este tipo de materiales. En consecuencia, el sistema opera en condiciones cercanas a su límite, lo que representa un riesgo para la estabilidad del tratamiento y la continuidad del cumplimiento normativo.

En este contexto, el presente trabajo tiene como finalidad optimizar la planta de tratamiento de aguas residuales no domésticas de Quality Beef, tomando como base la infraestructura existente. Para ello, se realiza un análisis integral del tren de tratamiento, con el fin de identificar ajustes, adecuaciones, ampliaciones o reemplazos necesarios que garanticen la eficiencia del sistema, su capacidad de respuesta frente a los caudales actuales y su proyección ante el crecimiento productivo futuro. El objetivo final es asegurar la sostenibilidad operativa del proceso y el mantenimiento del cumplimiento regulatorio en la industria de beneficio y procesamiento de carne bovina y porcina.

Planteamiento del problema

La gestión y manejo del recurso hídrico luego de su uso representa un aspecto crítico para la industria alimentaria al tratarse de un sector que demanda agua en cada uno de los momentos de su producción, lo que se traduce a la generación continua de un efluente cargado de contaminantes. Las plantas de procesamiento de alimentos cárnicos o afines, como la Planta de Desposte y Derivados Cárnicos Quality Beef, generan afluentes de agua residual no domestica (ARnD) con alta carga orgánica, grasas y sólidos, lo que requiere un sistema de tratamiento eficiente para generar un efluente en cumplimiento de la normatividad vigente, en detalle con la Resolución 0631 de 2017, por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, lo que exige implementar y mantener sistemas de tratamiento de aguas residuales no domésticas funcionales en el tiempo.

En la planta Quality Beef, el tratamiento de las ARnD se realiza mediante una planta de tratamiento de agua residual no doméstica (PTARnD), que fue diseñada y construida en 2015, en base a las condiciones de producción de ese momento y empleando como caudal de diseño 0,17 L/s.

La situación actual evidencia que, aunque la infraestructura física de la planta cárnica no ha tenido ampliaciones, el incremento en la demanda y en la producción ha generado un aumento considerable en el consumo de agua. Como consecuencia, el caudal de ARnD que ingresa a la PTARnD ha crecido de forma proporcional, superando su capacidad de diseño original. Esta condición se presume vigente desde hace aproximadamente cinco años, periodo en el cual comenzaron a manifestarse fallas y eventos operativos que indicaban que el caudal a tratar excedía la capacidad de almacenamiento y manejo hidráulico del tren de tratamiento.

Como consecuencia, las unidades de tratamiento y de pretratamiento presentan sobrecargas que se manifiestan en desbordamientos, reducción del tiempo de retención hidráulica y paso de contaminantes hacia unidades posteriores que no están diseñadas para recibirlos. Estas fallas

operativas afectan la eficiencia global del sistema, incrementan el riesgo la vida útil de los equipos y comprometiendo la continuidad del cumplimiento normativo en los vertimientos.

La problemática ha sido identificada por el área ambiental de la empresa y se han realizado revisiones preliminares con el proveedor que diseñó la PTARnD, no se ha llevado a cabo un diagnóstico integral que permita determinar si la configuración actual del tren de tratamiento es suficiente para las exigencias hidráulicas y contaminantes presentes hoy, ni cuáles modificaciones o redimensionamientos serían necesarios para garantizar su funcionamiento adecuado.

En este contexto, la situación problemática se centra en que la PTARnD opera por encima de su capacidad de diseño, lo que genera fallas operativas reiteradas, pérdida de eficiencia en la remoción de contaminantes y riesgos asociados al manejo hidráulico del sistema. Lo anterior evidencia la necesidad de optimizar y replantear el tren de tratamiento existente, de manera que se ajuste a las condiciones actuales y reales de producción y a las proyecciones de crecimiento propias de la planta.

Justificación

El manejo responsable de las aguas residuales generadas en los procesos productivos debe ser un pilar fundamental dentro de las organizaciones, en coherencia con su compromiso ambiental y el cumplimiento normativo. El estudio propuesto aborda una problemática frecuente en las infraestructuras de tratamiento de aguas residuales industriales, ya que, en sus etapas iniciales, estos sistemas suelen diseñarse con base en datos y condiciones operativas del momento, sin considerar proyecciones a largo plazo. Mientras no se presenten cambios significativos en los parámetros de diseño, el sistema funciona de manera adecuada; sin embargo, con el paso del tiempo, las dinámicas de producción evolucionan, aumenta la capacidad operativa, se incrementa la demanda hídrica y, en consecuencia, el caudal de aguas residuales generadas. Bajo estas nuevas condiciones, las plantas de tratamiento se ven sobrecargadas y comienzan a manifestarse fallas ante niveles de caudal no previstos.

En la Planta de Desposte y Derivados Cárnicos Quality Beef, la necesidad de intervención radica en la diferencia entre el diseño original de la PTARnD y las condiciones operacionales actuales, modificadas por el aumento en la demanda y la producción de la planta cárnica. A pesar de que el sistema cumple con la Resolución 0631 de 2017 en términos de parámetros de vertimiento, los eventos de contingencia, como desbordes y colmataciones, evidencian un sobrepaso en la capacidad instalada que compromete la estabilidad operativa.

En la actualidad, el sistema aún genera un efluente que cumple con los parámetros normativos, a pesar de que, con el aumento de caudal se reducen los tiempos de retención hidráulica, se altera las condiciones de operación y, eventualmente, disminuye la eficiencia en la remoción de contaminantes. Esto implica que, a futuro, la planta podría generar un efluente con cargas superiores a los límites permisibles.

Además, se pone en riesgo la inocuidad y la trazabilidad de la calidad en el proceso de producción cárnica. El sistema de tratamiento está conectado directamente con todas las áreas de producción de la empresa, habiendo presencia de canaletas las cuales conducen el agua residual

no doméstica hasta la PTARnD. En situaciones de desborde, el agua puede acumularse, devolverse por las tuberías y verterse en las áreas de producción. La presencia de aguas residuales con alta carga microbiológica y la generación de olores ofensivos pueden conducir al cese de las actividades productivas y comprometer el estado sanitario de toda la instalación.

La novedad del enfoque propuesto radica en que no se plantea una nueva construcción, sino la optimización y el replanteamiento de un tren de tratamiento ya existente y en operación, ajustado a las condiciones actuales de caudal y a las características del agua residual. Los resultados esperados tienen una aplicación práctica, al reducir el riesgo operacional asociado a posibles desbordes y prolongar la vida útil de equipos críticos, como las bombas de succión, que pueden verse afectadas por el ingreso no previsto de grasas y sólidos. Esta optimización resulta fundamental para compensar los vacíos generados por la evolución de la planta y garantizar una operación eficiente, preventiva y sostenible del sistema de tratamiento.

Objetivos

Objetivo general

Optimizar la planta de tratamiento de agua residual no doméstica existente en la Planta de Desposte y Derivados Cárnicos Quality Beef, con la finalidad de continuar garantizando el cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

Objetivos específicos

- Diagnosticar el estado actual de la planta de tratamiento de aguas residuales no domésticas (PTARnD), considerando el caudal tratado y los parámetros de calidad del agua residual.
- Diseñar la planta de tratamiento de agua residual no domestica optimizada con el fin de garantizar su sostenibilidad y el cumplimiento continuo de la normatividad ambiental vigente.
- Elaborar los planos hidráulicos de las unidades optimizadas de la planta de tratamiento de agua residual no domestica buscando contar con la representación detallada del diseño.

Alcance y limitaciones

El presente trabajo se centra en la optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales no domésticas (PTARnD) existente y actualmente en operación en la Planta de Desposte y Derivados Cárnicos Quality Beef. La investigación tiene como objetivo establecer un diagnóstico integral del tren de tratamiento, con el fin de identificar los componentes y procesos que presentan fallas operativas o que requieren mejoras para garantizar un desempeño eficiente. A partir de este diagnóstico se estructurará la propuesta de optimización de la PTARnD. El enfoque principal consiste en adaptar el tren de tratamiento actual a las condiciones reales de caudal y a las características fisicoquímicas del agua residual, en lugar de plantear la implementación de un sistema completamente nuevo.

La aplicación y el estudio se restringen geográficamente a las instalaciones de la planta de tratamiento de agua residual no doméstica ubicada en la Planta de Desposte y Derivados Cárnicos Quality Beef. En el estudio no se incluirán el conjunto de acciones que hacen parte de cotizaciones y costos de construcción para llevar la propuesta a materialización. Así mismo como se excluirán análisis e información de la otra planta de tratamiento de agua residual no doméstica ubicada en otra sede del grupo empresarial que pertenece Quality Beef.

La propuesta de optimización de la planta de tratamiento de agua residual no doméstica al ser un ofrecimiento propositivo por parte del autor del presente trabajo, las decisiones, aspectos y juicio recae exclusivamente de este, solamente limitado por las condiciones dimensionales del espacio disponible actual para ubicar la PTARnD. Por otro lado, también será de decisión del autor que unidades usar, diseñar y descartar de la propuesta final.

Los resultados estarán condicionados por la disponibilidad y la precisión de los datos accesibles durante el proceso de análisis. En caso de presentarse vacíos de información, estos serán complementados mediante el uso de fuentes secundarias y la aplicación de la normatividad colombiana vigente para el diseño e implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales

no domésticas, así como los estándares de calidad de vertimientos aplicables a industrias dedicadas al procesamiento y aprovechamiento cárnico de bovinos y porcinos.

El estudio presenta datos e información de caracterizaciones de las aguas residuales no domésticas de un laboratorio con certificación tanto de los aforos y muestreos tomados del agua que se vierte en el sistema de alcantarillado luego de su tratamiento en la PTARnD, como de datos del agua cruda antes de su tratamiento. Los caudales y la carga contaminante de las ARnD en una planta cárnica son inherentemente variables en función de los turnos de producción, limpieza y volúmenes de desposte. El estudio debe basarse en la información disponible o en aforos puntuales, lo que podría no reflejar la totalidad de los picos operacionales, afectando la precisión del rediseño propuesto.

Como la base del presente trabajo es dejarle como producto a la empresa Planta de Desposte y Derivados Cárnicos Quality Beef una propuesta de optimización de su planta de tratamiento residual no doméstica, las soluciones de optimización propuestas estarán condicionadas por la viabilidad económica y el presupuesto que la empresa Quality Beef esté dispuesta a invertir, de forma que en un intermedio de efectividad, funcionalidad y costo, la propuesta de diseño se realizara bajo un lente de aprovechar al máximo la infraestructura, espacio y equipos actuales, deseando reducir al máximo la necesidad de adquirir y comprar nuevos equipos y materiales.

Marco teórico

El agua en la industria alimenticia

El agua es un recurso indispensable en la vida humana; de igual modo, su presencia es inherente a cualquier industria, especialmente a la alimentaria. En este sector, actúa no solo como ingrediente fundamental en numerosos productos, sino también como un agente esencial en prácticamente todas las etapas del proceso productivo, desde la preparación de alimentos hasta los procesos de limpieza de instalaciones, superficies y equipos (Galeano, 2020), así como en el saneamiento del personal y los colaboradores.

Asimismo, la relación entre el agua demandada por la industria alimenticia y sus características fisicoquímicas se encuentra normatizada desde su ingreso en forma potable, regulada por la Resolución 2115 de 2007, hasta su salida como agua residual doméstica o no doméstica, esta última regulada por la Resolución 0631 de 2015.

Agua Residual Domestica

Las aguas residuales domésticas son el resultado y están directamente relacionadas con las actividades humanas en hogares, en baños, en cocinas, el lavado... Estas aguas se caracterizan por poseer materia orgánica, nutrientes, microorganismos patógenos, productos químicos y, en ocasiones contaminantes, trazas de medicamentos, datos descritos por Chura et al. (2021).

Agua Residual no Domestica

Las aguas residuales no domésticas provienen principalmente de actividades industriales, comerciales e institucionales, y suelen contener contaminantes específicos según el proceso productivo. Por objeto de interés del presente trabajo, para la industria cárnica como el desposte y procesamiento de carne, sus aguas residuales generadas contienen una alta carga orgánica, grasas,

nutrientes y contaminantes, así como afirman Lukashenko, S., Syrovatsky, O., y Karahiaur, A. (2025).

Tratamiento del Agua Residual

El tratamiento de aguas residuales es el conjunto de procesos y operaciones que se basan y aprovechan de características y efectos físicos, químicos y biológicos para cumplir su el propósito de eliminar y/o reducir los contaminantes presentes en el agua, aportados previamente por el accionar humano ya sea proveniente de usos domésticos, industriales, agrícolas... De forma que se llega a mejorar las condiciones finales en un efluente y que a su vez pueda ser devuelto de manera segura al medio ambiente o reutilizado para otros fines. Este proceso es integral, al no solo enfocarse en el agua, sino también en la gestión y tratamiento de los sólidos tales como los lodos que se generan como subproductos en el accionar del tratamiento, en el mismo se separan durante el proceso y se hace un tratamiento (Duarte & Galindo, 2018).

El tratamiento del agua residual se realiza en plantas de tratamiento de agua residual o por sus siglas PTAR, las cuales son un conjunto de obras civiles y procedimientos físicos y químicos que buscan dar tratamiento al efluente de aguas residuales antes de ser vertidas a los cuerpos de agua, las plantas de tratamiento varían en sus unidades y procesos de tratamiento debido a características propias de las aguas que tratan, ya sean domésticas o no domésticas, el espacio que se cuenta para su instalación, las condiciones climáticas de la zona y por sus niveles de eficiencia en remoción de contaminantes, según el alcance en el tipo de contaminantes a remover, y las etapas del proceso que posean (Torres, 2021).

Pretratamiento

El pretratamiento constituye la fase inicial del proceso de tratamiento y mejora en las condiciones del agua residual, en esta se desarrolla un papel crucial, al tener como objetivo principal actuar como una barrera protectora para todo el sistema. A groso modo, busca eliminar,

reducir y/o retirar aquellos componentes del agua residual cruda que podrían causar graves problemas operativos o un mantenimiento excesivo en las etapas y unidades posteriores.

Según Fernández (2016) esta etapa está diseñada para remover los contaminantes como sólidos de gran o medio tamaño, siendo los más frecuentes palos, piedras, plásticos, textiles, sólidos inertes y abrasivos tales como las arenas y materiales flotantes como espumas, grasas y aceites.

La importancia de este proceso radica en la prevención de fallos sistémicos. Si no se eliminan a tiempo, estos materiales pueden obstruir tuberías y canales, dañar equipos mecánicos como las bombas, bloquear mecanismos en movimiento y atascar purgas o válvulas (Díaz y Gelvez, 2023). Cuando uno de estos problemas ocurre en una unidad crítica, las consecuencias pueden ser muy graves, llegando disminuir la eficiencia o incluso a paralizar la planta.

Cribado

El sistema de cribado, en esencia, son coladores con la función de retener los sólidos de gran tamaño que arrastra el agua, como trapos, plásticos, palos, ramas, y cualquier otro residuo sólido voluminoso que pueda quedar atrapado en el sistema de retención, que a su vez pueden estar formados por una serie de materiales como barras metálicas paralelas o en malla. Se instalan en un ángulo inclinado en el canal de entrada del agua residual, aprovechando de la fuerza de arrastre con la que llega el agua cruda para atravesar la barrera del sistema de cribado. Se clasifican según la separación entre sus barras, que a su vez definirá que tamaño de objetos podrá retener, ya sea desbaste grueso, medio o fino y su método de limpieza, que puede ser manual o automático (Díaz y Gelvez, 2023).

Trampa de grasas

Son tanques pequeños de flotación donde su principio de funcionamiento se basa en la diferencia de densidades, donde las grasas, natas y aceites, al ser más ligeros que el agua, asciende de forma natural y se acumula en la superficie. Ahí son retenidos, mientras que el agua libre de

estos flotantes continúa su camino a través de una descarga inferior hacia las siguientes etapas del tratamiento (Ayquipa Conde, 2021).

El RAS (2021) recomienda que la ubicación de la trampa de grasa es un factor trascendental, este debe de localizarse lo más cerca posible de la fuente de agua residual y antes que cualquier otra unidad de tratamiento. Con lo anterior se previene una serie de problemas graves en el tren de tratamiento, como la obstrucción de tuberías, la adherencia de grasa a piezas especiales, mecánicas, la acumulación de natas en otras unidades y la generación de malos olores.

Es una unidad que requiere de atención, operación, seguimiento y mantenimiento regular, pues de lo contrario, las partículas flotantes superan la capacidad de almacenamiento de la unidad, anulando su propósito, permitiendo el escape de cantidades apreciables de grasa y la generación de olores por la descomposición del material retenido. La frecuencia de limpieza debe determinarse mediante la observación directa del estado de la unidad; sin embargo, el RAS (2021) sugiere que, como regla general, la limpieza debe realizarse como mínimo cada vez que se alcance el 75% de la capacidad de retención de grasa. En casos concretos donde el agua residual provenga de sectores generadores de altas cargas orgánicas y grasas, la frecuencia limpieza puede variar desde una vez por semana hasta una vez cada dos o tres meses, dependiendo del volumen de producción

Tratamiento primario

Etapa de tratamiento donde el proceso de depuración se enfoca principalmente en la eliminación física de sólidos mayores (Mariño, 2022), en esta etapa se pueden observar los siguientes procesos:

- **Sedimentación:** Es el proceso donde se requiere que el agua fluye lentamente, logrando que la gravedad gane y haga que partículas sólidas más densas que el agua se asienten en el fondo, formando el lodo crudo (Londoño, 2023).

- Flotación: En este se busca separar las partículas menos densas que el agua, haciendo que asciendan a la superficie, se puede lograr dicho objetivo mediante la inyección de burbujas de aire (Beascochea et al., 2020).
- Coagulación y floculación: Dos procesos fisicoquímicos secuenciales, diseñados para separar y eliminar sólidos suspendidos como las coloides que, debido a su tamaño y estabilidad electrostática, no pueden ser removidos eficientemente, al no flotar ni sedimentarse por sí solas (Mariño, 2022).

Como primer paso, se agrega el coagulante, un químico de carga positiva, que neutraliza la carga electrostática de las partículas coloidales, la mezcla se logra a través de una agitación rápida para asegurar la distribución inmediata del coagulante a la vez que aumenta el choque entre las partículas desestabilizadas, formando microflóculos que van aumentando de tamaño en la mezcla lenta, hasta lograr el peso necesario para sedimentarse (Ibarra, 2020).

Tratamiento secundario

En esta etapa, se emplean microorganismos que se añaden o de por sí ya se encuentran en el agua residual. Estos organismos consumen los contaminantes orgánicos para su crecimiento, metabolismo y demás partes de su ciclo vital, logrando a su vez llevar estos compuestos a flocs biológicos sedimentables y sólidos inorgánicos que pueden ser removidos (Mariño, 2022).

Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente

La unidad de tratamiento de aguas residuales utiliza un proceso biológico en condiciones anaeróbicas para degradar la materia orgánica presente, el reactor es cerrado y en él, las aguas residuales fluyen de forma ascendente a través de un manto de lodos altamente concentrado y granulado, compuesto por microorganismos anaeróbicos, donde los mismos degradan la materia orgánica y produciendo biogás, agua y biomasa (Chernicharo, 2022).

Reactor aerobio de lodo activado

Este tipo de unidad de tratamiento se basa en la actividad del microbiota en un ambiente con presencia de oxígeno que debe ser inyectado continuamente, pues es con este que los microorganismos pueden respirar y consumir la materia orgánica presente, transformándola en biomasa nueva, dióxido de carbono y agua.

Tratamiento terciario

El tratamiento terciario actúa como un proceso de tratamiento específico, cuyo objetivo es alcanzar un nivel de calidad superior al obtenido por los métodos fisicoquímicos y biológicos. Esta fase permite la eliminación de contaminantes puntuales que persistir en el efluente, tales como compuestos responsables de color, olor, sólidos finos, nutrientes, contaminantes emergente, que requieren un tratamiento especializado (Carbotecnia, 2025).

Desinfección

Proceso que busca la eliminación o inactivación de microorganismos presentes en el agua residual, con la potencialidad de ser patógenos, de forma que pueden llegar afectar al ser humano y demás seres vivos. Según Pilonieta (2023) los elementos y sustancias comúnmente utilizadas en el tratamiento del agua para su desinfección son el cloro, el dióxido de cloro, las cloraminas, el ozono, el yodo y bromo.

Lodos

Generados como un subproducto del tratamiento de aguas residuales en específico en el tratamiento secundario, este elemento está conformado por agua, materia orgánica e inorgánica, a su vez que se encuentra bacterias, patógenos, virus, compuestos nitrogenados tales a proteínas, grasas, metales pesados, fósforo y otros compuestos (Echeverry, C, 2021). La composición del lodo estará definida por su origen y del tipo de agua residual tratada. Ante tal composición de

cargas contaminantes, se hace necesario a su vez darle un tratamiento a este residuo semisólido, el RAS-Título E se expresan tratamientos para los lodos:

- **Deshidratadora Centrífuga:** En esta unidad se acelera el proceso de deshidratación del lodo, a través de una rotación a gran velocidad, formando fuerzas centrífugas que separan las fases líquidas y sólidas (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021)
- **Filtros Prensa:** Equipo compuesto por múltiples placas verticales muy próximas entre sí, se encuentran cubiertas con telas filtrantes permeables. Una bomba de alta presión inyecta el lodo en el espacio entre estas placas y un mecanismo junta las placas, ejerciendo presión y fuerza al agua a atravesar los filtros, mientras que los sólidos se retienen, deshidratando así al lodo.
- **Lechos de secado:** Es una unidad simple, consistiendo en una estructura geométrica con una base de elementos filtrantes como arena, grava... sobre un sistema de drenaje. El secado del lodo es el resultado de la acción conjunta de la evaporación y la filtración del agua a través de la base hacia el drenaje. A medida que el lodo pierde humedad, se contrae y forma grietas. Las presencias de aberturas son cruciales al permitir que la radiación solar alcance las capas inferiores, acelerando el proceso (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021)

La duración de esta acción está directamente ligada a las condiciones climáticas del lugar, siendo la temperatura y el viento los factores más influyentes. Por esta razón, en zonas húmedas y de pocas horas de radiación solar se pueden añadir acondicionadores químicos como cal o polímeros coagulantes (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021).

- **Lombricompostaje de lodos:** Proceso biológico diseñado para estabilizar lodos de aguas residuales. Su eficacia reside en la acción de lombrices y microorganismos, que actúan conjuntamente para transformar la materia prima en un producto final valioso conocido como lombricompost. Las lombrices mejoran la calidad de los lodos a través de su actividad mecánica, al moverse, excavan una extensa red de galerías que aumenta

significativamente la porosidad y la aireación del material. Además, al consumir el lodo rico en materia orgánica en descomposición, digieren las bacterias y los hongos asociados, y excretan. Estas heces constituyen el lombricompost, son ricas en nutrientes de fácil asimilación para las plantas y en enzimas (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021).

Normatividad

En el contexto colombiano, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) dictó la Resolución 0631 de 2015, mediante la cual se establecen los parámetros y los valores límite máximos permisibles para vertimientos puntuales tanto a cuerpos de agua superficiales y al alcantarillado público. Por lo tanto, cualquier generador de vertimientos de aguas residuales no doméstica, está obligado a cumplir con las exigencias establecidas en esta norma. En caso particular, la empresa del presente estudio entra en los lineamientos del artículo 9, quien define los parámetros fisicoquímicos que deben monitorearse y sus valores máximos permisibles para vertimientos puntuales de ARnD a cuerpos de agua superficiales en actividades de agroindustria y ganadería (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. Art. 9 de marzo de 2015 [Colombia]). Aplicado al caso de beneficio dual de bovinos y porcinos, siendo la razón industrial de Quality Beef una actividad similar y de competencia.

Adicionalmente, dado que la empresa del presente estudio vierte sus aguas residuales al alcantarillado público, debe atenerse también al artículo 16 de la resolución, el cual fija los valores máximos permisibles para vertimientos de ARnD al sistema de alcantarillado (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. Art. 16 de marzo de 2015 [Colombia]).

En conjunto, estos artículos de la Resolución 0631 obligan a la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales eficientes, que garanticen que el efluente que es vertido cumpla con los límites normativos estipulados antes de su descarga, ya sea en cuerpos receptores naturales o en redes de alcantarillado.

Tabla 1

Valores límites máximos permisibles para parámetros de Aguas Residuales no Domésticas de origen de actividades del beneficio dual de bovinos y porcinos

Parámetros	Unidades	Beneficio Dual Bovinos y Porcinos
pH	-	6 a 9
Demanda Química de oxígeno	mg/L O ²	900
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L O ²	450
Sólidos suspendidos totales	mg/L	200
Sólidos sedimentables	mg/L	5
Grasas y aceites	mg/L	50
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y reporte
Ortofosfatos	mg/L	Análisis y reporte
Fósforo total	mg/L	Análisis y reporte
Nitratos	mg/L	Análisis y reporte
Nitritos	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno total	mg/L	Análisis y reporte
Cloruros	mg/L	500
Sulfatos	mg/L	500
Acidez total	mg/L CaCO ³	Análisis y reporte
Alcalinidad total	mg/L CaCO ³	Análisis y reporte
Dureza Cálcida	mg/L CaCO ³	Análisis y reporte
Dureza Total	mg/L CaCO ³	Análisis y reporte
Color real	m-1	Análisis y reporte

Nota. Fuente: MADS, Resolución 0631, 2015.

Metodología

Para dar cumplimiento al objetivo general del presente trabajo, el primer paso consiste en realizar el diagnóstico de la planta de tratamiento de aguas residuales no domésticas (PTARnD) que se encuentra en funcionamiento en la Planta de Desposte y Derivados Cárnicos Quality Beef. El propósito de este diagnóstico es evaluar integralmente las condiciones físicas, hidráulicas y operativas, así como el desempeño del sistema de tratamiento, con el fin de identificar oportunidades de optimización técnica.

La metodología empleada inicia con la recolección y revisión de la información disponible, la cual incluye el análisis de planos hidráulicos, fichas técnicas de los equipos instalados, manuales de operación y mantenimiento, así como los registros históricos de los análisis físicoquímicos del efluente. Esta información resulta fundamental para comparar las condiciones de diseño con el comportamiento actual del sistema y determinar si la PTARnD opera conforme a sus parámetros teóricos o presenta diferencias significativas.

La información técnica asociada a las medidas y dimensiones se complementa mediante la toma directa de medidas en las unidades de la PTARnD, empleando un flexómetro de 20 metros. De esta manera, se obtienen los valores ausentes en la documentación técnica y se comparan los datos registrados con las condiciones reales de la infraestructura.

Para determinar el volumen útil y el tiempo de retención hidráulico (TRH) de cada unidad de tratamiento, se emplea la geometría correspondiente a sus formas constructivas, las cuales son cilíndricas y prismáticas rectangulares. En la Tabla 2 se presentan las ecuaciones utilizadas para el cálculo del volumen en metros cúbicos (m^3).

Tabla 2

Ecuaciones de Volumen en m^3 para cilindros y prismas rectangulares

Volumen (V)

Figura geométrica	Formula	Donde:	Unidad
Cilindro	$V = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 * H$	V = volumen del tanque (m ³)	m ³
		D = diámetro interno del cilindro (m) H = altura efectiva o profundidad útil del líquido (m)	
Prisma rectangular	$V = L * B * H$	V = volumen del tanque (m ³)	m ³
		L= longitud efectiva del tanque (m)	
		B = ancho interno del tanque (m) H = altura o profundidad útil del líquido (m)	

Nota. Elaboración propia.

En cuanto al Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) se calcula a partir de la relación entre el volumen útil y el caudal de operación. Adicional, se compara los valores resultantes con valores sugeridos y recomendados del comportamiento del TRH en cada unidad de tratamiento. Lo mencionado se ilustra en la tabla 3.

Tabla 3

Fórmula TRH y los valores recomendados por la normatividad colombiana para este parámetro para ciertas unidades de tratamiento

Formula	Unidad	TRH sugerido en horas	Fuente
	Trampa de grasa	0,05	RAS 2000 Título E

$TRH = \frac{V}{Q}$	Reactor de lodos		
	activados	4 – 8	RAS 2000 Título E
TRH= Tiempo de Retención Hidráulico en horas	convencional		
	Reactor UASB	6 – 9	Resolución 0330 de 2017
V= Volumen en m ³	Clarificador	>1	RAS 2000 Título E
Q= Caudal en m ³ /s			

Nota. Elaboración propia.

Para conocer la caracterización del efluente, se recopilan los resultados de laboratorio disponibles de los últimos años. Estas caracterizaciones se realizan semestralmente y están a cargo de un laboratorio acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Los análisis incluyen parámetros como aceites y grasas, acidez, alcalinidad, color real, compuestos orgánicos halogenados absorbibles (AOX), cloruros, DBO₅, dureza cálcica, dureza total, DQO, fósforo reactivo disuelto, fósforo total, nitratos, nitritos, nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total Kjeldahl, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, sulfatos y sustancias activas al azul de metileno (SAAM).

Como parte del diagnóstico, se realiza una inspección técnica de la infraestructura mediante visitas a la PTARnD y recorridos detallados por todas las unidades que conforman el tren de tratamiento. Durante esta fase se evalúa el estado físico y estructural de componentes como rejas, canaletas y unidades de tratamiento, así como la presencia de fisuras, corrosión u obstrucciones. Asimismo, se examina el funcionamiento de equipos, tales como bombas, válvulas y tableros eléctricos.

El caudal se determina mediante el método de aforo volumétrico, el cual consiste en medir el volumen de agua residual recolectado en un recipiente de capacidad conocida (1 litro) y registrar el tiempo de llenado con un cronómetro. El punto de muestreo se ubica en la entrada del agua

residual no doméstica al tren de tratamiento, específicamente en el tubo de 6 pulgadas que descarga sobre la unidad de cribado. El muestreo se realiza cada 20 minutos durante una jornada continua de 12 horas, siguiendo los siguientes pasos:

1. Capturar el flujo de agua en un recipiente de volumen conocido.
2. Se toma y registra el tiempo que tarda en llenarse el recipiente hasta el volumen conocido.
3. El caudal se determina utilizando la fórmula:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

Q : caudal en L/s.

V : volumen de agua recolectado en litros.

t : tiempo en que se llena el volumen, en segundos.

El proceso culmina con la consolidación de los resultados del diagnóstico, las observaciones realizadas, los análisis comparativos. Los resultados incluyen las observaciones y actividades necesarias para la mejora y optimización de la planta.

Determinación del Índice Volumétrico de Lodos

Indicador que relaciona el volumen ocupado por el lodo asentado dividido por la concentración de sólidos en suspensión.

Fórmula práctica:

$$IVL \left(\frac{mL}{g} \right) = \frac{1000 \cdot V_s (mL/L)}{SST (mg/L)}$$

Procedimiento:

- Tomar muestra representativa del agua residual de los puntos de muestreo seleccionados:

1. Entrada a PTARnD
 2. Válvula de muestreo UASB
 3. Válvula de pulga UASB
- Homogeneizar suavemente antes de realizar el ensayo.
 - Llenar exactamente 1 L en el cono Imhoff de la muestra.
 - Iniciar el cronómetro al momento de terminar de llenar y permitir la decantación sin perturbaciones.
 - Transcurridos 30 minutos, leer el volumen de lodo asentado V_s en mL.
 - Calcular IVL con la fórmula indicada.
 - Caracterizar el IVL según los rangos que establece Ramírez (2017):

IVL < 90 mL/g – excelente sedimentabilidad

90 < IVL < 150 mL/g – buena sedimentabilidad

IVL > 150 mL/g – malas condiciones de sedimentabilidad

Determinación velocidad de sedimentación solidos sedimentables

Velocidad con que desciende la interfase agua–lodo en ensayos de decantación por lotes. Se obtiene como la pendiente (Δ altura/ Δ tiempo) de la curva altura vs. tiempo en la etapa de sedimentación correspondiente.

Procedimiento:

- Tomar muestra representativa del agua residual de los puntos de muestreo seleccionados.
- Homogeneizar suavemente antes de realizar el ensayo.
- Llenar la probeta de 1 L con la muestra homogenizada.
- Iniciar el cronómetro y registrar la altura de la interfase lodo–clarificado (h) en $t = 0$.
- Registrar la altura y tiempos definidos.

- Continuar hasta se aprecia la separación total de la interface, dejando un clarificado superior y un manto de lodo sedimentado.
- Graficar h (m) vs. t (s). La pendiente negativa de la curva en la zona lineal corresponde a la velocidad de descenso:

$$v = -\frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Diseño trampa de grasa

En primera instancia, se llevó a cabo la recopilación de información operativa y dimensionamiento de la unidad de pretratamiento existente. Con la información recolectada se verificó el desempeño hidráulico de la trampa mediante:

- Cálculo del Tiempo de Retención Hidráulica Real (TRH actual)

$$TRH = \frac{Volumen}{Q}$$

- Cálculo de la velocidad ascensional

$$Va = Q * \text{Área}$$

- Relación Largo-Ancho

$$\frac{L}{A}$$

Los resultados se verifican al amparo de criterios y recomendaciones de diseño estipulados en la Resolución 0330 del 2017 y como material de apoyo al Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS (2021), cuyos valores y parámetros de interés se visualizan en la siguiente tabla:

Tabla 4*Parámetros de interés diseño trampa grasa*

Parámetro	Valor	Unidad
TRH mínimo	2,5	Minutos
Velocidad ascensional	0,004	m/s
Altura útil mínima	0,35	m
Relación $\frac{L}{A}$	$\frac{1}{1} a \frac{3}{1}$	

Nota. Elaboración propia.**Diseño tanque de igualación**

Determinar el volumen necesario del tanque de igualación para suavizar variaciones de caudal horario en el afluente a la planta de tratamiento, asegurando que el sistema reciba caudales dentro del rango máximo y mínimo deseado. El diseñador selecciona los límites operativos de caudal que se desea imponer al proceso con base en la capacidad hidráulica de las unidades aguas abajo.

- Q_{\max} : caudal máximo
- Q_{\min} : caudal mínimo.

Para cada hora, calcular la diferencia entre el caudal horario real y el caudal de referencia elegido.

$$\text{Exceso horario: } E_x = Q_{\max} - Q_x$$

- Sí $E_x > 0$ hay exceso (se debe almacenar).
- Sí $E_x < 0$ no hay exceso (puede ser déficit).

$$\text{Déficit horario: } E_x = Q_{\min} - Q_x$$

- Sí $E_x < 0$ hay déficit

Se construye una serie acumulada que representa el volumen acumulado hora a hora, la suma algebraica inicia a partir de la hora que refleje el primer exceso. El volumen requerido del tanque es igual al valor máximo positivo de la suma acumulada, además de considerar el espacio libre que ronda el 10% y 20% del volumen útil.

Para el dimensionamiento del tanque relacionar volumen con dimensiones, para un tanque rectangular: $V_{\text{Rectangular}} = L \cdot H \cdot B$

Diseño Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

Con el fin de establecer las dimensiones y condiciones operativas del reactor UASB, a continuación, se presentan los parámetros requeridos y las expresiones empleadas en el proceso de cálculo.

Tabla 5

Parámetros de diseño Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

Parámetro	Expresión	Unidad
Caudal medio	Q_{med}	m^3/d
Caudal máximo	$Q_{\text{máx}}$	m^3/d
Concentración DQO afluente	Fo DQO	mg DQO/L
Concentración DBO afluente	Fo DBO	Mg DBO/L
Coefficiente producción de solidos	Y_{LSST}	$\text{Kg}_{\text{SST}} / \text{Kg}_{\text{DQOAPL}}$
Coefficiente producción de solidos DQO	Y_{LDQO}	$\text{Kg}_{\text{DQOL}} / \text{Kg}_{\text{DQOAPL}}$

Concentración esperada de lodo puga	CL	%
Densidad lodo	Y	Kg SST/m ³
Temperatura promedio mes frio	T	°C
Tiempo de Retención Hidráulico	TRH	H

Nota. Elaboración propia.

Tabla 6

Valores limites, intervalos y sugerencias de parámetros de diseño

Tiempo de Retención Hidráulico			
Temperatura Agua residual °C		TRH (h)	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017, art. 191)
	16 a 19	10 - 14	
	20 a 26	6 – 9	
	>26	>6	
Profundidad Tanque			
			(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017, art. 191)
h	4,5 – 6	m	
Velocidades de Flujo ascendente para el diseño de reactores UASB			
Caudal influente	Velocidad ascendente	Unidad	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017, art. 191)
Caudal medio	0,5 – 0,7	m/h	
Caudal máximo	0,9 – 1,1	m/h	
Caudal pico temporal	<1,5	m/h	
Área de influencia de los Distribuidores de flujo en el reactor UASB			

Tipo de lodo	Carga orgánica aplicada (kg DQO/m ³ ·d)	Área de influencia de cada distribuidor (m ²)	
Lodo denso floculento (> 40 kg SST/m ³)	<1,0	0,5 – 1,0	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017, art. 191)
	1,0 – 2,0	1,0 – 2,0	
	>2,0	2,0 – 3,0	
Lodo floculento espesado (20 – 40 kg SST/m ³)	1,0 – 2,0	1,0 – 2,0	
	>3	2,0 – 5,0	
Lodo granular	<2,0	0,5 – 1,0	
	2,0 – 4,0	0,5 – 2,0	
	>4	>2,0	
Tasa de desprendimiento del gas			
Rango mínimo 1 y máximo 3 a 5 m ³ /m ² -h			(Rosales, 2019)
Velocidad en la abertura para sedimentación			
Caudal promedio	Caudal máximo		(Chernicharo de Lemos, 2007)
< 2 – 2,3	< 4 – 4,2		
Ángulo de la campana de gases			
	45°		(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017, art. 191)

Nota. Elaboración propia.

Tabla 7*Ecuaciones aplicadas en el dimensionamiento del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente*

Parámetro	Ecuación	Unidad
Carga de paso orgánica afluente promedio	$Lo = Fo * Q_{med}$	Kg DQO/d
Volumen total del reactor	$V = Q * TRH$	m ³
Área reactor	$A = \frac{V_{reactor}}{H}$	m ²
Largo	$L = A/W$	M
Carga aplicada orgánica volumétrica	$L = \frac{Lo}{V * n}$	Kg DQO/m ³ -d
Carga aplicada orgánica hidráulica volumétrica	$Lh = \frac{1}{TRH * 24}$	m ³ /m ³ -d
Total bocas de distribución por reactor	$TB_{REACT} = A/Ai$	Unidades
Diámetro del distribuidor	$\emptyset d = \frac{2}{TB_{rec}} * \sqrt{\frac{Q_{medio}}{86400 * V' * \pi}}$	M
Eficiencia de remoción de DQO	$EDQO = 100 * (1 - 0,68 * TRH^{-0,35})$	%
Eficiencia de remoción de DBO	$E_{DBO} = 100 * (1 - 0,70 * TRH^{-0,50})$	%
Concentración del efluente de DQO	$F_{DQO} = F_{O_{DQO}} = -E * \frac{Fo}{100}$	mg/L
Eficiencia de remoción de DBO	$F_{DBO} = F_{O_{DBO}} - E * \frac{Fo}{100}$	mg/L
Concentración del efluente de SS	$C_{SS} = 10 + \frac{250}{TRH}$	mg/L
Producción de metano	$DQO_{CH4} = Q * (Fo - F) - Yl, DQO * Q * Fo$	KgDQO/d

Volumen de metano	$V_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{(P * \frac{K}{(R * (273 + T^{\circ}C))})}$	m ³ /d
Producción de biogás	$V_{biogás} = \frac{V_{CH_4}}{\%}$	m ³ /d
Total longitud de colectores o campanas	$Total\ long\ colector = W * \#campanas$	m
Área de interfase líquido-gas	$A_{il - g} = \frac{Qg}{Vg}$	m ²
Ancho del colector de gas	$W_{colector} = \frac{A_{il - g}}{\#colectores * L * 2}$	m
Longitud de cada abertura simple (ancho de cada reactor)	W	m
Velocidad por abertura	$V = \frac{Q_{med}}{A_{total\ de\ aberturas}}$	m/h
	$V = \frac{Q_{máx}}{A_{total\ de\ aberturas}}$	m/h
Número de sedimentadores	$L_{sed} = \#sed\ reactor * \#sed\ por\ reactor$	Unidades
Longitud de cada sedimentador	W	m
Longitud total de sedimentadores	$L_{sed} = \#sed\ por\ react * long\ cada\ react$	m
Ancho de cada sedimentador	$W_{sed} = \frac{\#sed\ por\ reactor}{L}$	m

Ancho del colector inferior de gas	$W_{ci} = W_{sed} - Sg \cdot d$	m
Altura de la campana de gases	$Hg = (W_{ci} - W_{cs}) \cdot \tan(\theta g)$	m
Ancho del colector superior de gas	$W_{cs} = \frac{\text{Total longcolector}}{Ail - g}$	m
Altura deflector	$Hd = 2W_{cs} \cdot \tan(\theta d)$	m
Ancho útil del sedimentador	$A \text{ útil} = W_{sed} - W_{colector} - e_{pared}$	m
Carga superficial	$L = \frac{Q_{medio}}{A \text{ útil} - sedimentadores}$	m/h
	$L = \frac{Q_{medio}}{A \text{ útil} - sedimentadores}$	m/h
Producción de lodo	$P_{l, sst} = Y_{LSST} \cdot DQO_{API}$	KgSST/d
Volumen del lodo	$V_{lodo} = \frac{Plodo}{\gamma \cdot Cl}$	m ³ /h

Nota. Elaboración propia.

Diseño Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente

Tabla 8

Valores límites, intervalos y sugerencias de parámetros de diseño

Parámetro	Valor	Fuente
Material filtrante	Grava	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017, art. 175
Profundidad lecho	1,2 y 3,0 m	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021

Relación L:PL	El largo no deben exceder tres veces la profundidad del lecho.	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021
Velocidad ascensional	< 1 m/h	Chernicharo de Lemos, 2007
Volumen lecho de grava	Volumen de 0,02 a 0,04 m ³ de grava por cada 0,1 m ³ /día	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017, art. 175

Nota. Elaboración propia

Tabla 9

Ecuaciones aplicadas en el dimensionamiento del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente

Parámetro	Ecuación	Unidad
Tiempo de Retención Hidráulica	$TRH = \frac{V}{Q}$	h
Volumen efectivo del filtro anaerobio	$V=Q*TRH$	m ³
Volumen del tanque que contiene el filtro	$V_t = Lecho\ grava * \frac{Q}{0,1}$	m ³
Carga organica	$L_o=Q*S_o$	KgDBO/día
Carga volumétrica	$L_v = \frac{Q * S_o}{V_t}$	kgDBO/m ³ *d
Área requerida del filtro	$A_r = \frac{V_r}{h_{pl}}$	m ²
Longitud filtro	$L = \frac{A_r}{W}$	m
Área requerida distribución de afluente	$A_D = \frac{Q}{V_{asc}}$	m ²
Área orificios	$A_o = \pi r^2$	m ²
Número de orificios requeridos para distribuir el afluente	$\#_{orificios} = \frac{A_D}{A_o}$	Unidades

Nota. Elaboración propia.

Resultados

Diagnóstico de la actual planta de tratamiento de aguas residuales no domésticas

Descripción del estado y funcionamiento del tren de tratamiento actual

En la Planta de desposte y derivados cárnicos de Inversiones Euros S.A. se generan aguas residuales domésticas asociadas al uso de los baños, vistieres, cafetín, y aguas residuales industriales, que se produce durante todas las actividades, que implican el desposte y procesamiento de la carne, incluidas actividades de limpieza de las instalaciones y los carros, estas deben ser tratadas antes de ser vertidas a un cuerpo de agua superficial o el alcantarillado público, de modo que las instalaciones cuentan con una planta de tratamiento de aguas residuales no domésticas, donde se reducen las cargas contaminantes para así cumplir con lo establecido en la Resolución 0631 de 2015 y finalmente, ser vertidas al alcantarillado de EPM.

Los drenajes se encuentran distribuidos en el suelo del piso 1 y 2, además, están provistos previstos de rejillas con agujeros de diámetro 0,03 cm para evitar entrada de plagas y retener sólidos gruesos como desgorde y restos de carne. Los pisos y drenajes tienen la inclinación adecuada para permitir un flujo rápido y eficiente de los líquidos desechados. Además, los drenajes están cubiertos por una tapa con agujeros de diámetro de 2,4 cm y 1,5 cm.

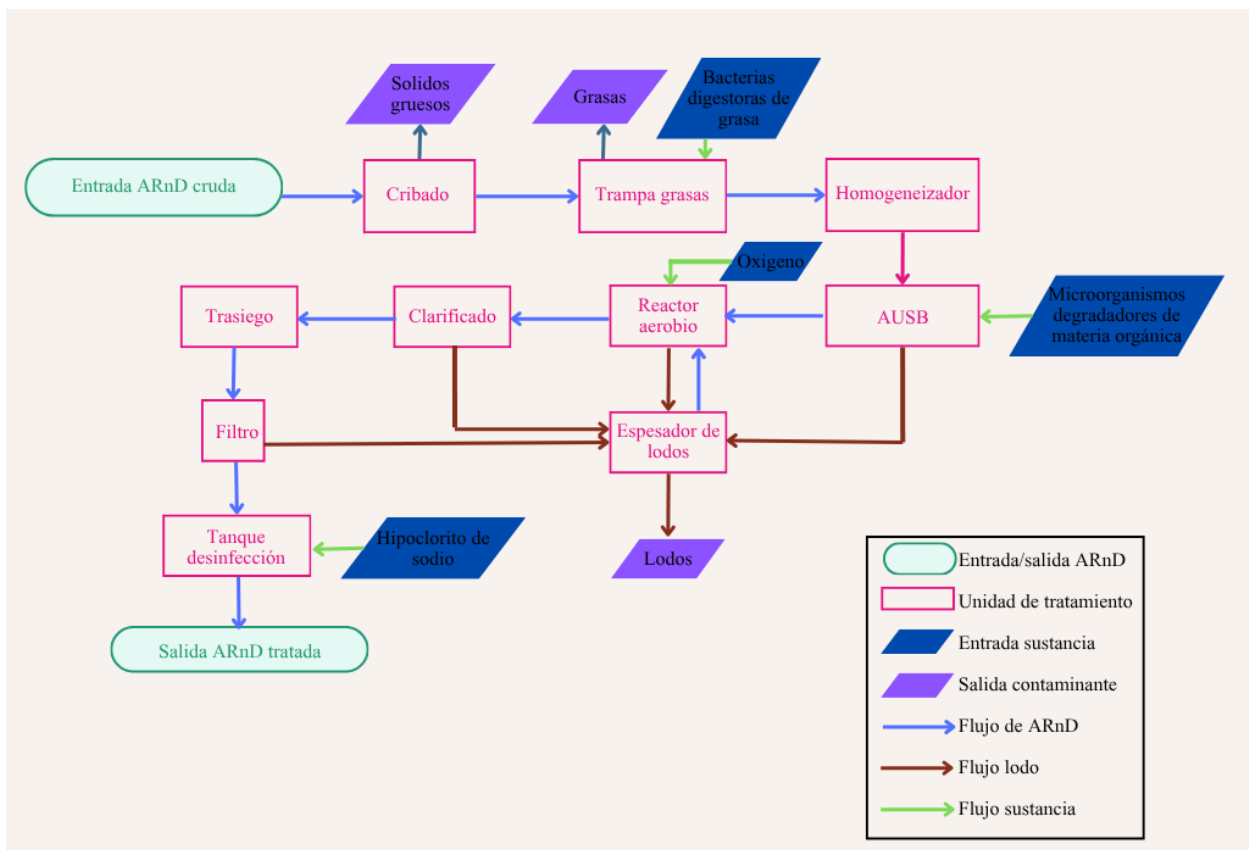
Aquí se encuentra la primera observación, resulta que cotidianamente se deben de limpiar y retirar sólidos y elementos que quedan en las rejillas, por lo que se taponan y el agua empieza a inundar las zonas. En específico, el drenaje en la zona del lavamanos del área del desposte y el del área de porcionado, se deben de limpiar hasta cuatro veces al día, debido a la cantidad de pedazos de carne y grasa que caen al suelo y obstruyen el sistema de drenaje.

Las aguas residuales industriales generadas contienen altas concentraciones de materia orgánica, debido al exceso de grasa, sangre y otros residuos orgánicos que generan las canales, también contienen grandes cantidades de productos de limpieza como desengrasantes y

desinfectantes a base de cloro y ácidos. Las aguas son conducidas a la planta de tratamiento de aguas residuales no domésticas, cual fue diseñada e instalada por Eduardoño S.A. E tren de tratamiento existentes se presenta en la Figura 1.

Figura 1

Diagrama de flujo funcionamiento de la PTARnD actual



Nota. Elaboración propia.

Pretratamiento

Cribado

El tratamiento inicia con el cribado, compuesto por una canastilla metálica con orificios de 0,6 cm tanto en su fondo, como en sus paredes. Esta rejilla tiene la función de retener sólidos de mayor tamaño que logran pasar por las rejillas del drenaje y que ingresan a la PTAR, como partes del desgorde de la carne, sebo, entre otros. El sistema de cribado se le realiza mantenimiento constantemente cada miércoles de cada semana, el mantenimiento se realiza de manera manual por un tercero. Los orificios comúnmente se ven obstruidos por materiales retenidos, a tal punto, que ya no hay paso del agua por las rejillas, por lo cual el agua junto los materiales que arrastra, continúan su paso por encima de la unidad a causa del desbordo.

Trampa de grasa

La trampa de grasas es subterránea y está ubicada bajo el parqueadero de recibo de canales, en esta entra el agua que atraviesa el cribado, el propósito de esta unidad es retener los sólidos flotantes como las grasas, natas y aceites que atraviesan el cribado o que están mezcladas en el agua residual. La acumulación del material flotante es de 7 días, pues la extracción de estas sustancias y limpieza superficial de la unidad se realiza cada miércoles de manera manual por parte de un tercero que ingresa a la unidad.

En la unidad se dispone de manera flotante una tableta solida de BT-GREEN TABS que material compuesto de bacterias naturales que actúan degradando grasas, aceites, proteínas y detergentes retenidos en la unidad.

La trampa grasa cada semana muestra señales de desbordo, al observarse líneas de grasa a niveles fuera de los límites de la trampa, lo que evidencia que en algún momento de la semana el nivel del agua llevo hasta esas alturas.

Tanque de igualación de caudal

La unidad permite generar flujos de aguas residuales de características similares y de caudal constante. Este tanque recibe los afluentes provenientes de la trampa de grasa, variables de

aguas residuales de proceso. es fundamental debido a que amortigua las variaciones del caudal, controla las sobrecargas hidráulicas y orgánicas que pueden interferir en el proceso biológico, unidad fundamental en la planta, al manejar caudales tan discontinuos debido a que los mayores consumos de agua se dan en los horarios de limpieza.

La trampa de grasa y el tanque homogeneizador se encuentran ubicados en el mismo lugar, solamente separados por un muro de 1,4 m de alto y 0,2 m de espesor. Al desbordarse la trampa de grasa, que normal nete ocurre cada semana, el agua y grasa pasa al tanque homogeneizador, igualando el nivel del agua en ambos tanques, como evidencia se tienen las líneas de grasa que muestra como el agua subió. En el año 2025 las dos unidades implicadas se han rebotadas un total de 6 veces, momentos en que el agua sobrepaso y colmato todo el volumen del prisma rectangular que conforma la trampa de grasas más el tanque homogeneizador. En el momento más crítico, el agua llego a 5 cm del desborde y verter el agua en la zona donde se descargan los canales.

En el tanque homogeneizador, la única salida que tiene el agua para seguir el tren de tratamiento, es por medio de una bomba de succión de especificaciones VXm 10/50-N de 1 HP, el cual es accionado automáticamente por un flotador. Cuando el nivel del agua sube, el flotador también lo hace y activa un interruptor que enciende la bomba. La bomba comienza a succionar, elevando el agua y llevándola a la siguiente unidad de tratamiento, haciendo que el nivel en el tanque homogeneizador baje. Cuando el nivel del agua desciende por debajo de cierto punto, el flotador baja, el interruptor se desactiva y la bomba se apaga para evitar que succione aire y se dañe.

La bomba se encuentra sobre una canastilla de plástico que hace función de base y se filtró que no permite que solidos grandes entren a la bomba, sin embargo, a la gran cantidad de grasas que pasan de la trampa grasa al desbordarse al homogeneizador, hace que su presencia ponga en riesgo la bomba sumergible. Las seis ocasiones que el tanque se desbordo este asociado a fallos parciales o totales de la bomba.

Detalle a resaltar, el largo total de la canastilla, la bomba y el cable del flotador, suman 1,60 m de largo, medida que supera el muro de separación entre las unidades, lo que significa que la

bomba no se activa hasta que el agua alcanza el nivel de 1,60 m, pero cuando lo hace ya la trampa grasa y el homogenizado ya se conectaron y se generó el paso de las grasas, natas y aceites flotantes.

Tratamiento secundario

Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

Sistema de tratamiento donde el agua residual ingresa por la parte inferior y fluye hacia arriba a través de un manto de lodos. En este proceso, las bacterias anaerobias y facultativas presentes en el lodo granular degradan la materia orgánica y generan biogás que no es aprovechado y se emite a la atmósfera. Además de la población nativa de microbiota, constantemente se está agregando BT-Green Líquido en una dilución en agua, una parte de BT-GREEN por 20 partes de agua, este producto es una mezcla sinérgica concentrada de bacilos, que degradan la materia orgánica con presencia de almidón, grasas, proteínas y celulosa.

El funcionamiento de un reactor UASB se ve gravemente afectado por un aumento en el caudal de entrada. Este incremento provoca reboses en su caja de entrada, en lo corrido del año 2025 de este reboce se tiene constancia de 5 ocasiones. Además, a un mayor caudal, disminuye el tiempo de retención hidráulico. Como resultado, los microorganismos no tienen el tiempo suficiente para degradar toda la materia orgánica, afectando la calidad final del efluente. Otra dificultad se encuentra en el aumento de la velocidad ascensional, lo que puede provocar un "lavado de microorganismos", arrastrándolos fuera del reactor con el efluente y disminuyendo así la cantidad de biomasa activa disponible para el tratamiento.

Reactor aerobio

El proceso de lodos activados utiliza microorganismos aerobios, principalmente bacterias y protozoos, para degradar la materia orgánica no degradada en el proceso anaerobio. Estos microorganismos crecen y se multiplican dentro del reactor mientras están suspendidos en el agua,

aglomerándose naturalmente para formar flocs. Al tratarse de un tratamiento dependiente a la presencia de oxígeno, está presente un soplador de referencia FPZ-SCL 30DH que suministra aire constantemente al tanque. En el caso de la planta en estudio, este reactor se encuentra construido de forma subterránea y se tiene registro de un momento en que estuvo en estado de reboce durante el año 2025.

A vista, en el reactor se observa diariamente una capa brillante y reflectiva, probablemente aceites y grasas, a su vez que una leve espuma que se puede asociar a la alta concentración de detergentes en el agua residual. Sin embargo, en el caso específico de la Planta Quality Beef, se destaca que los detergentes utilizados en sus operaciones son biológicamente degradables y en mayoría no contienen fósforo. La presencia de aceites se le atribuye a la trampa grasa que como se ha mencionado continuamente está permitiendo el paso por desborde de materiales flotantes al resto del sistema de tratamiento y por el lado de la espuma se puede señalar al reducido tiempo de retención hidráulica en la unidad, de modo que los microorganismos y otras condiciones biológicas no tengan el tiempo suficiente para degradar en su totalidad estos elementos.

Clarificado

El clarificador es una unidad subterránea que se encuentra inmediatamente después del tratamiento aerobio. Su propósito fundamental es separar los sólidos suspendidos del agua que ya ha sido tratada. Este proceso de separación se logra por gravedad. El agua ingresa al tanque y fluye lentamente a través de una estructura interna, similar a un panal de abejas, que optimiza la superficie de asentamiento y permite que los sólidos caigan al fondo.

En la parte superior, el agua ya clarificada pasa por una canaleta de dientes de sierra. Finalmente, los sólidos que se acumulan en el fondo, una parte importante de este lodo se recircula de regreso al reactor aerobio.

Tanque trasiego

Una unidad de paso que se sitúa en una posición intermedia después del clarificador y justo antes del filtro Polyglass de 16". La unidad ajusta las características de presión y caudal del agua de forma que sean óptimas para su correcto y eficiente paso a través del filtro de presión. El filtro, al ser un equipo a presión, requiere un suministro constante y regulado para operar según su diseño. La lámina de agua en el tanque trasiego siempre se observa una capa aceitosa.

En el interior del tanque de trasiego se encuentra instalada una bomba sumergible de referencia VXm 10/35-ST que es accionado por un flotador. Esta bomba es la responsable de la elevación e impulsión de las aguas residuales, suministrando la energía necesaria para vencer la resistencia del sistema y forzar el agua a pasar por el lecho filtrante del filtro de presión Polyglass 16".

Tratamiento terciario

Filtración descendente a presión

El filtro Polyglass de 16" de diámetro actúa como un proceso de pulimiento complementario dentro del sistema de tratamiento. La operación se desarrolla en filtración descendente y se lleva a cabo en un lecho mixto dispuesto por capas, el cual está conformado por gravas, arenas y carbón activado. Los lechos son sostenidos por una malla con agujeros de 3/4" que además impiden el transporte de estos materiales con el agua.

La primera capa está conformada por grava de diámetros entre 1/2" a 1/4" y pesa 35 kg. El siguiente lecho también se constituye por gravas y pesa 35 kg, pero de diámetro entre 1/4" a 1/8", la tercera capa ocupa está formada por 35 kg de gravas de diámetros entre los 1/8" y los 10mm. La capa cuatro consta de 30 kg de arena de alrededor de 0,45 mm de diámetro. El quinto lecho filtrante se compone por 15 kg de carbón activado. El porcentaje vacío de espacio se deja para permitir la acción de retrolavado, que se realiza dos veces por día.

El objetivo principal de esta etapa es la eliminación de las partículas que lograron escapar del clarificador. Al pasar el agua bajo presión a través de este lecho, las partículas son retenidas

mediante la combinación de mecanismos distintos y simultáneos. En el cernido, las partículas que son físicamente más grandes que los espacios porosos entre los granos de arena o carbón. La partícula simplemente no puede pasar y queda retenidas. En el movimiento Inercial la velocidad del agua es suficiente para que la inercia de una partícula la obligue a chocar y quedar atrapada en un grano. También se presentan fuerzas electrostáticas donde las partículas suspendidas y la superficie de los granos filtrantes a menudo tienen cargas eléctricas generalmente opuestas que hacen que se atraigan y adhieran una a la otra, Las fuerzas de Van Der Waals que son fuerzas de atracción intermoleculares débiles que actúan a muy corta distancia. Contribuyen a la cohesión entre la partícula y el medio una vez que están lo suficientemente cerca.

Tanque de contacto

Consta de un tanque sencillo donde el agua ingresa en su parte inferior, y se almacena mientras un flotador que contine una pastilla de hipoclorito de cloro, va liberando la sustancia desinfectante. Esta unidad no cuenta con información, ni esta estandarizado el tiempo de contacto entre el agua y el desinfectante para que sea eficaz el proceso, ni se conoce la dosis del desinfectante. El cambio de la pastilla se realiza cada que se acaba y en los casos que no haya en almacenamiento este elemento se emplea hipoclorito de sodio al 13% liquido.

Como en los parámetros evaluados por laboratorio no se piden microbiológicos, no se conoce la concentración y tipos de microorganismos que salen en el efluente. Y, por ende, el nivel de eficiencia de la unidad. En la unidad es usual ver flotando grasas de tamaño considerable, también, en el último mantenimiento del tanque, al vaciarlo se encontró una capa de lodo de aproximado 5 cm de alto que se había sedimentado, señalando que del filtro está atravesando el agua junto con solidos sedimentables.

Tanque espesador de lodos

Esta unidad está diseñada para manejar y reducir el volumen de los lodos generados en las diferentes etapas del tratamiento de agua. Se recolectan los lodos procedentes del clarificador, el

reactor UASB y el agua de lavado del filtro a presión. En la unidad se presentan notablemente grasas y aceites, en su superficie y alrededor del tanque se forma una capa de este material.

Recopilación de información de interés

Caracterización Agua Residual no Domestica cruda

Con el propósito de obtener una comprensión precisa de las condiciones reales previas al tratamiento del agua residual no doméstica generada en la Planta de Desposte y Derivados Cárnicos Quality Beef, la caracterización de los principales parámetros fisicoquímicos del afluente más recientes corresponde al año 2019.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante cinco jornadas de muestreo, junto con el valor promedio correspondiente a cada parámetro analizado. Estos datos permiten definir el comportamiento típico del afluente.

Tabla 10

Caracterización del Agua Residual no Domestica cruda

Parámetro	28-ene-19	27-mar-19	10-abr-19	24-abr-19	8-may-19	Promedio
pH	6,3	6,8	6,6	7,0	7,9	6,9
T (°C)	22,7	25,4	23,7	25,0	24,4	24,2
DQO (mg O ₂ /L)	618,0	533,2	560,4	723,6	297,5	546,5
DBO (mg/L)	288,0	127,9	153,4	263,0	126,4	191,7

SST (mg SST/L)	332,0	300,0	260,0	460,0	110,0	292,4
SSED (mL/L)	0,7	0,2	0,5	<0,1	1,0	0,6
Grasas y Aceites (mg/L)	157,0	169,0	641,5	476,0	215,1	331,7
Cloruros (mg/L)	12,2	58,8	95,4	68,0	71,2	61,1
Sulfatos (mg/L)		71,7	36,1	101,8	38,6	62,0
Alcalinidad Total (mg CaCO ₃ /L)	114,0	46,5	88,0	106,6	63,6	83,7
SSV (mg/L)	322,0	-	249,0	407,0	303,0	320,25

Nota. Adaptado de Totena, 2021.

Caracterización del efluente tratado de PTARnD

De la recopilación de los informes técnicos de la caracterización de aguas residuales no domésticas planta de desposte y derivados cárnicos de Inversiones Euro S.A. a los que se tuvo acceso. El análisis comparativo de los resultados de los muestreos de aguas residuales frente a los límites máximos permisibles establecidos por la Resolución 0631 de 2015, se puede evidenciar que los parámetros asociados al vertimiento han mostrado una tendencia técnica positiva en el tiempo, confirmando que en general siempre la calidad del efluente tratado se encuentra en un grado de cumplimiento normativo en los años recopilados. Siendo el único precedente de

incumplimiento en el año 2024 donde se superó el valor máximo permisible del parámetro de Grasas y Aceites.

Tabla 11

Resultados de caracterizaciones de vertimientos de ARnD proveniente de la Planta Quality Beef

Parámetro	12/10/16	6/12/17	6/12/18	22/10/19	6/5/20	20/5/21	8/4/22	18/5/23	17/6/24	22/05/25
Temperatura (°C) Art.5	24,3 – 25,3	22,5 – 24,9	-	22,9 – 28,2	26,4	27,0	25,4	28,7	31,2	27,7
pH (U de pH)	6,78-7,19	6,43-6,62	6,76	6,97-7,18	6,49- 6,57	7,03-7,28	6,11-6,69	6,88-7,30	6,15-8,22	6,66 - 6,86
DQO (mg O ₂ /L)	108,6	352	543	386	439	341	371,0	365	506	535
DBO ₅ (mg/L)	14	156	295	155	185	135	222,0	179	242	168
SST (mg SST/L)	6,72	42,2	104	26,4	43,6	26,5	60,7	42,6	103	45,7
SSED (mL/L)	< 0,1	< 0,1	-	< 0,1	< 0,1	1,4	3,0	< 0,1	< 0,10	1
Grasas y Aceites (mg/L)	< 5	37,6	38,0	22,3	43,2	< 10,0	33,1	30	72,9	34,5
Sustancias activas al azul de metileno (mg/L)	20,1	21,32	-	-	-	-	-	-	1,3	18,7

Surfactantes										
Aniónicos										
como SAAM	-	-	-	0,427	-	35,00	13,6	2,68	1,3	18,7
(mg/L)										
Fósforo										
reactivo										
Soluble	-	-	-	34,81	-	9,00	5,7	6,55	4,24	10,3
(mg P- PO ₄ ³⁻ /L)										
Parámetro	12/10/16	6/12/17	6/12/18	22/10/19	6/5/20	20/5/21	8/4/22	18/5/23	17/6/24	22/05/25
Fósforo Total										
(mg P/L)	1,06	1,61	53,8	45,31	-	10,4	14,8	17,8	7,55	11,4
Nitratos (mg N-NO ₃ -/L)	< 1,5	33,1	-	19,6	-	1,49	< 1,4	< 1,4	< 1,40	0,533
Nitritos (mg N-NO ₂ -/L)	< 0,007	0,021	-	< 0,01	-	< 0,010	0,0	0,086	0,029	0,049
Nitrógeno										
Amoniacal										
(mg N- NH ₃ /L)	4,1	14	-	21,84	-	18,8	1,4	20,2	5,36	6,63

Nitrógeno										
Total (mg N/L)	5,1	-	550	57	-	32,9	7,7	25,7	13	7,96
Cloruros (mg Cl/L)	25,2	54,4	152	307	74,2	48,3	< 10	93,5	29,8	154
Sulfatos (mg So ₂ /L)	1,22	< 10	7,7	< 10	< 10	< 10,0	< 10	< 10	11,9	< 3,00
Acidez Total (mg CaCO ₃ /L)	16,04	54,4	-	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10	< 10,0	< 10,0
Alcalinidad										
Total (mg CaCO ₃ /L)	43,1	125	-	213	131	114,0	105,0	115	47,6	135
Dureza										
Cálcica (mg CaCO ₃ /L)	31,8	25	-	9,8	-	20,0	13,0	18	18	15
Dureza Total (mg CaCO ₃ /L)	50,7	31	-	19	-	27,0	44,0	28	27	32
Parámetro	12/10/16	6/12/17	6/12/18	22/10/19	6/5/20	20/5/21	8/4/22	18/5/23	17/6/24	22/05/25
Color real (436 nm) (m-1)	1,17	3,1	-	2,63	-	2,2	5,6	32,2	15,5	10,7

Color real (525 nm) (m- 1)	0,6	1,8	-	1,4	-	1,2	3,3	22,4	10,4	6,58
Color real (620 nm) (m- 1)	0,386	1,3	-	1,02	-	0,9	2,2	16,1	7,44	4,54
Nitrógeno Total Kjeldahl (mg N- NTK/L)	-	21,3	-	37,39	-	31,4	6,2	24,2	11,6	7,38

Informe técnico HidroQuímica, comunicado personal, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025

Nota. Resaltado en color rojo se encuentra el valor que midió el parámetro que supero el límite permisible por la Resolución 0631 de 2015. Elaboración propia

La tabla 12 presenta la evolución temporal de diversos parámetros que reflejan la carga en kilogramos aportados por día en el vertimiento, asociado a las aguas residuales durante los años 2016, 2017, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 y 2025. Permitiendo observar las variaciones y tendencias en la cantidad de contaminantes vertidos a lo largo del tiempo.

Tabla 12*Valor de carga por contaminantes del 2016 al 2025*

CARGA CONTAMINANTE										
Parámetro	Unidades	2016	2017	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Caudal promedio	L/s	0,01	0,494	0,184	0,21	0,11	0,932	0,409	0,623	0,225
Tiempo efectivo										
de descarga diario	Horas/día	12	12	12	12	12	2,5	12	4,9	11
Tiempo efectivo										
de descarga mensual	Días/mes	26	26	26	26	26	26	26	26	26
DQO	Kg/día	0,038	2,618	3,067	3,966	1,67	3,069	6,45	13,506	4,7575
DBO5	Kg/día	0,005	1,16	1,232	1,6713	0,66	1,837	3,163	6,459	1,494
SST	Kg/día	0,002	0,314	0,21	0,3939	0,13	0,502	0,753	2,749	0,4064
Grasas y Aceites	Kg/día	0,002	0,28	0,177	0,39093	0,049	0,274	0,53	1,946	0,3068

Nota. Recuperado de informes técnicos de HidroQuímica, comunicado personal, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025. Elaboración propia

Caudal de agua Residual no Domestica

De la recopilación de información, se recuperan los caudales mínimos, máximos y promedios obtenidos por estudios pasados. Resalta el hecho que el promedio de valores casi en su totalidad (exceptuando el del año 2016) los caudales dan valores superiores al caudal de diseño de la Plata de Tratamiento de Agua Residual no Domestica, además que los valores tienden al aumento y se mantienen en esta condición. La información se encuentra en la tabla 13, obtenida de informes técnicos, HidroQuímica (comunicado personal, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025)

Tabla 13*Recopilación de caudales del año 2016 al 2025*

Caudales	2016	2017	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Caudal									
Mínimo (L/S)	0,004	0,352	0,061	0,17	0,07	0,396	0,409	0,388	0
Caudal									
Máximo (L/S)	0,015	0,694	0,55	1,22	0,34	1,361	1,638	2	1,556
Caudal									
promedio (L/s)	0,01	0,494	0,184	0,21	0,11	0,932	0,409	0,623	0,225

Nota. Recuperado de *informes técnicos de HidroQuímica*, comunicado personal, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025. Elaboración propia

El monitoreo y medida de caudales realizado en una jornada de 12 horas seguidas, reflejo el comportamiento característico del sistema a lo largo del ciclo operativo diario. Los picos de caudal coinciden con los cuatro momentos principales asociados al trabajo del equipo de limpieza denominados operativos, donde al cese del proceso productivo, se interviene las zonas de producción para su lavado, limpieza y desinfección. Estos momentos generan aumentos temporales en el flujo de agua residual debido al uso intensivo de agua en dichas labores, lo cual explica las variaciones notorias detectadas en los registros.

Asimismo, se evidencia que la mayoría de los caudales obtenidos presentan valores superiores a 0,17 L/s, cifra que corresponde al caudal de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales, actualmente en funcionamiento. La recopilación de los datos resultantes se observa en la tabla 14.

Tabla 14

Caudales afluentes a la PTARnD obtenidos del monitoreo continuo de 12 horas en la Planta Quality Beef

Toma	Prueba	Hora	Volumen (L)	Tiempo (s)	Caudal (L/s)	Promedio por toma (L/s)
1	1	6:00	10	28,2	0,35	0,37
	2	6:02	10	29,6	0,34	
	3	6:03	10	23,8	0,42	
2	1	6:20	10	20,5	0,49	0,48
	2	6:23	10	20,9	0,48	
	3	6:25	10	20,8	0,48	
3	1	6:39	10	21,3	0,47	0,46
	2	6:40	10	22,1	0,45	
	3	6:42	10	22,2	0,45	
4	1	7:00	10	15,5	0,65	0,69
	2	7:01	10	13,6	0,74	
	3	7:03	10	14,2	0,70	
5	1	7:20	10	15,8	0,63	0,76
	2	7:21	10	12,5	0,80	
	3	7:21	10	11,6	0,86	
6	1	7:40	10	49,2	0,20	0,23
	2	7:42	10	42,5	0,24	
	3	7:44	10	41,4	0,24	
7	1	8:00	10	45,6	0,22	0,23
	2	8:03	10	47,1	0,21	
	3	8:06	10	41	0,24	
8	1	8:20	10	43,8	0,23	0,23
	2	8:23	10	42,7	0,23	
	3	8:25	10	44,3	0,23	

9	1	8:40	10	90,5	0,11	0,11
	2	8:42	10	96,4	0,10	
	3	8:45	10	94,3	0,11	
10	1	9:00	10	15,1	0,66	0,77
	2	9:03	10	12,4	0,81	
	3	9:06	10	12	0,83	
11	1	9:20	10	30,5	0,33	0,33
	2	9:22	10	31,5	0,32	
	3	9:24	10	30,1	0,33	
12	1	9:40	10	32,7	0,31	0,30
	2	9:42	10	34,8	0,29	
	3	9:44	10	32,6	0,31	
13	1	10:00	10	49,7	0,20	0,22
	2	10:02	10	40,5	0,25	
	3	10:04	10	48,2	0,21	
14	1	10:20	10	39,2	0,26	0,27
	2	10:23	10	36,9	0,27	
	3	10:26	10	36,5	0,27	
15	1	10:40	10	67,7	0,15	0,15
	2	10:43	10	60,4	0,17	
	3	10:46	10	66,5	0,15	
16	1	11:00	10	68	0,15	0,15
	2	11:05	10	65,2	0,15	
	3	11:08	10	69,9	0,14	
17	1	11:20	10	93,6	0,11	0,11
	2	11:24	10	93,3	0,11	
	3	11:27	10	94,9	0,11	
18	1	11:40	10	43,8	0,23	0,22
	2	11:42	10	46	0,22	
	3	11:44	10	46,5	0,22	
19	1	12:00	10	25,8	0,39	0,41

	2	12:02	10	22,6	0,44	
	3	12:03	10	24,9	0,40	
	1	12:21	10	21,1	0,47	
20	2	12:22	10	22,8	0,44	0,47
	3	12:23	10	20,3	0,49	
	1	12:40	10	22	0,45	
21	2	12:41	10	25,2	0,40	0,44
	3	12:43	10	20,7	0,48	
	1	1:01	10	27,3	0,37	
22	2	1:02	10	30,6	0,33	0,34
	3	1:03	10	31,2	0,32	
	1	1:20	10	11,8	0,85	
23	2	1:21	10	19,7	0,51	0,56
	3	1:22	10	31,3	0,32	
	1	1:40	10	56,1	0,18	
24	2	1:42	10	55,7	0,18	0,18
	3	1:43	10	55	0,18	
	1	2:00	10	18,8	0,53	
25	2	2:01	10	15,5	0,65	0,64
	3	2:03	10	13,4	0,75	
	1	2:20	10	22,5	0,44	
26	2	2:23	10	22,2	0,45	0,43
	3	2:24	10	24,4	0,41	
	1	2:40	10	23,5	0,43	
27	2	2:43	10	21,6	0,46	0,45
	3	2:45	10	21,7	0,46	
	1	3:00	10	20	0,50	
28	2	3:03	10	25,5	0,39	0,45
	3	3:05	10	21,2	0,47	
	1	3:20	10	30,3	0,33	
29	2	3:23	10	30,4	0,33	0,33

	3	3:26	10	30,6	0,33	
	1	3:40	10	18	0,56	
30	2	3:45	10	19,3	0,52	0,54
	3	3:46	10	18,5	0,54	
	1	4:00	10	16,1	0,62	
31	2	4:01	10	16,4	0,61	0,61
	3	4:03	10	16,7	0,60	
	1	4:20	10	13,3	0,75	
32	2	4:22	10	13,9	0,72	0,75
	3	4:23	10	13	0,77	
	1	4:40	10	12,7	0,79	
33	2	4:43	10	12,3	0,81	0,81
	3	4:45	10	12	0,83	
	1	5:00	10	11,8	0,85	
34	2	5:04	10	11,2	0,89	0,87
	3	5:06	10	11,6	0,86	
	1	5:19	10	13,9	0,72	
35	2	5:21	10	12,6	0,79	0,75
	3	5:23	10	13,7	0,73	
	1	5:40	10	18,8	0,53	
36	2	5:41	10	15,8	0,63	0,62
	3	5:42	10	14,1	0,71	
	1	6:00	10	43,6	0,23	
37	2	6:01	10	45,3	0,22	0,22
	3	6:02	10	48,7	0,21	

Nota. Elaboración propia

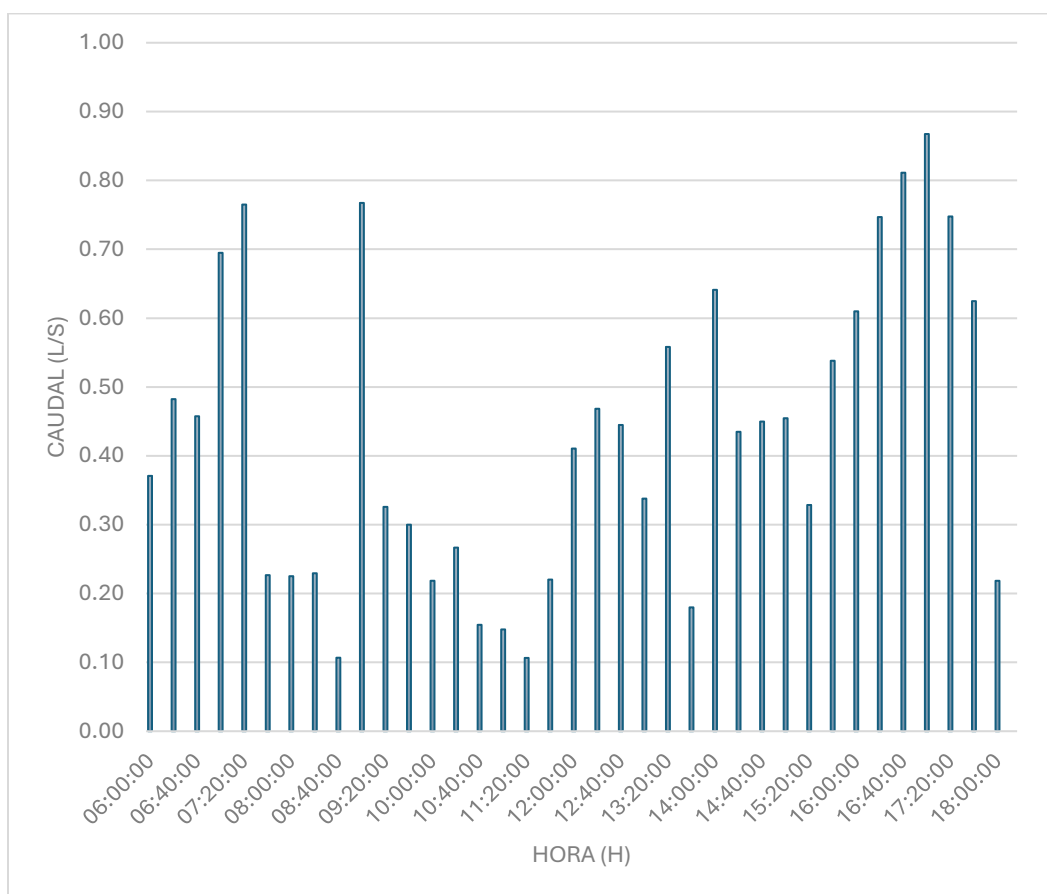
El valor máximo, mínimo y promedio de caudal medido corresponde a 0,86 L/s, 0,11 L/s y 0,43 L/s correspondientemente. Por su parte, en la ilustración 2 se aprecia gráficamente los

caudales obtenidos a partir del muestreo realizado bajo la metodología volumétrica en una jornada de trabajo de 12 horas seguidas en la organización.

En la figura 2 se pueden observar claramente cuatro picos de vertimiento de agua residual no doméstica, estos coinciden con las cuatro jornadas de limpieza comúnmente ejecutadas en la jornada, siendo el previo al inicio de laborales, cuando se cesa la actividad por el momento de desayuno, igual que en la hora de almuerzo y a final de jornada.

Figura 2

Caudales obtenidos por método volumétrico del afluente de la Planta Quality Beef



Nota. Elaboración propia

Evaluación del tiempo de retención hidráulica (TRH) de las unidades de tratamiento actual en función del caudal actual Vs el de diseño

Dando uso al dato más actual de caudal obtenido, que corresponde al calculado por el método volumétrico en el presente trabajo, se emplea el caudal promedio de afluente generado en la planta Quality Beef para medir el TRH actual en que están trabajando las unidades de tratamiento. En la tabla 15 se expresa lo anterior mencionado, además, que las dimensiones de cada unidad y sus correspondientes volúmenes.

Tabla 15

Recopilación de dimensiones, volúmenes y TRH diseño Vs TRH actual de las unidades de tratamiento

Unidad	Geometría	Dimensiones (m)	Volumen (m ³)	Caudal de diseño PTARnD 0,17 L/s	Caudal medido actual 0,431 L/s
				TRH (h)	TRH (h)
Cribado	Canastilla rectangular	Alto: 0,2 Ancho: 0,7 Largo: 0,4 Diámetro de agujero: 0,03	N/A	N/A	N/A
Trampa Grasa	Prisma rectangular	Número de cámaras: 2 (adimensional) Largo cámara: 1,20 Ancho cámara: 0,80	1,82	2,98	1,17

		Profundidad útil cámara: 0,95			
Tanque Homogeneizador	Prisma rectangular	Largo: 2,55 Ancho: 1,8 Profundidad útil: 1,15	5,28	8,63	3,4
UASB	Cilindro	Diámetro: 1,49 Altura: 4,6	8,1	13,24	5,22
Reactor de lodos activados	Cilindro	Diámetro: 1,9 Largo: 3,5	10	16,34	6,45
Espesador de lodos	Cilindro	Diámetro: 0,95 Altura: 1,40	1	1,63	0,64
Clarificado	Cilindro	Diámetro: 1,7 Altura: 2	4,5	7,35	2,9
Trasiego	Cilindro	Diámetro: 0,8 Altura: 1,46	1,2	1,96	0,77
Filtro	Cilindro	Diámetro: 0,41 Altura: 1,651	V tanque: 1.896 V espacio retro lavado: 0,0696 V material filtrante: 0,12 Grava ($\varnothing \frac{1}{2}''$ a $\frac{1}{4}''$): 0,0264	N/A Flujo de filtración: 1,5 m^3/h	N/A

		Grava ($\emptyset \frac{1}{4}''$ a $\frac{1}{8}''$):			
			0,0264		
		Grava (\emptyset			
		$\frac{1}{8}''$ a 10mm):			
			0,0264		
		Arena (0,45 mm):			
			0,024		
		Carbón activado:			
			0,0168		
Tanque de contacto	Cilindro	Diámetro:			
		0,95	1	1,63	0,64
		Altura:1,40			

Nota. Los valores resaltados en rojo resaltan las unidades que su TRH está por fuera de los valores sugeridos por guías y normatividades de diseño de estas unidades de tratamiento de aguas residuales recopiladas en la tabla 3. Por su parte los valores resaltados en amarillo expresan valores de TRH cercanos a los límites. Elaboración propia.

Evaluación del comportamiento de lodos de la PTARnD

Índice Volumétrico de Lodos

Tabla 16

Resultados de IVL en los tres puntos de muestro analizados

Resultados IVL						
Punto de Muestreo	Toma 1 Vs (mL/L)	Toma 2 Vs (mL/L)	Toma 3 Vs (mL/L)	Promedio	IVL (mL/g)	Característica de la sedimentabilidad
1	0	0	0	No hubo sedimentación visible a los 30 minutos		

2	20	19	18,5	19,17	68,5	Excelente sedimentabilidad
3	60,5	60	55	58,5	208,9	Mala sedimentabilidad

Nota. Elaboración propia.

Velocidad de sedimentación

Tabla 17

Resultado IVL punto de muestreo 1

Punto muestreo 1	No se evidenció sedimentación dentro de los 30 minutos de prueba.
-------------------------	---

Nota. Elaboración propia.

Tabla 18

Resultado IVL punto de muestreo 2

Punto de muestreo 2	Toma 1		Toma 2	
Velocidad sedimentación	0,009	cm/s	0,012	cm/s
Velocidad sedimentación promedio	0,010		cm/s	

Nota. Elaboración propia.

Tabla 19

Resultado IVL punto de muestreo 3

Punto de muestreo 3	Toma 1		Toma 2	
Velocidad sedimentación	0,010	cm/s	0,008	cm/s
Velocidad sedimentación promedio	0,009		cm/s	

Nota. Elaboración propia.

Análisis de la actual Planta de Tratamiento de Agua Residual no Domestica

Gracias a la descripción y medición integral de cada componente de la PTARnD anteriormente mencionado, se evidencia que, aunque el sistema cumple en términos los límites máximos permisibles establecidos por la Resolución 0631 de 2015, presenta debilidades operativas y estructurales asociadas principalmente a la gestión ineficiente de grasas y aceites, y la limitada

capacidad de adaptación frente a caudales superiores al de diseño. El monitoreo de caudales realizado durante una jornada continua de 12 horas permitió identificar picos hidráulicos coincidentes con los cuatro momentos operativos de limpieza y desinfección de las áreas de producción, los cuales generan incrementos temporales significativos en el flujo de agua residual.

En este contexto, se registraron valores de caudal máximo, mínimo y promedio de 0,86 L/s, 0,11 L/s y 0,43 L/s, respectivamente, superando en la mayoría de los casos el caudal de diseño original de la planta (0,17 L/s). Esta condición confirma que la infraestructura actual opera de forma recurrente por encima de su capacidad hidráulica diseñada y esperada, lo que explica los eventos de rebose observados en diferentes unidades del sistema y la reducción del tiempo de retención hidráulica en los procesos biológicos.

La activación tardía de la bomba sumergible ubicada en el tanque de igualación se debe a una instalación inadecuada del flotador. El cable del flotador presenta una longitud mayor que la altura del muro divisor entre el tanque de igualación y la trampa de grasas. Como consecuencia, cuando el flotador envía la señal de encendido, el nivel del agua ya ha superado el límite entre ambas unidades, permitiendo el paso de grasas, aceites, natas y sólidos gruesos provenientes del cribado hacia las etapas posteriores del tratamiento.

Esta situación se evidenció durante un mantenimiento de emergencia, en el cual ambas unidades se encontraban desbordadas. Al retirar la bomba, se observó la longitud excesiva del cable del flotador. Adicionalmente, se comprobó que la bomba actualmente en operación cuenta con la potencia necesaria para elevar el agua residual hacia la siguiente unidad de tratamiento.

La sobrecarga hidráulica y la activación tardía del sistema de bombeo en el tanque de igualación, han favorecido el arrastre de grasas, aceites y sólidos hacia las etapas posteriores del tratamiento, afectando el desempeño del reactor anaerobio, el reactor aerobio, el sistema de bombas y las unidades de pulimiento. La presencia persistente de material flotante en el reactor aerobio, el tanque de trasiego, el filtro a presión y el tanque de contacto confirma una remoción insuficiente de grasas en el pretratamiento, lo cual incrementa el riesgo de inhibición biológica, formación de espumas, obstrucciones y fallas mecánicas. Asimismo, los episodios de rebose en la

trampa de grasas y el tanque de igualación, junto con los fallos recurrentes en las bombas sumergibles, evidencian la necesidad de mejorar el control de niveles, reforzar la separación hidráulica entre unidades y redimensionar los volúmenes útiles para manejar adecuadamente los picos de caudal.

Aunque los informes históricos de caracterización muestran una tendencia positiva en la calidad del efluente tratado, con cumplimiento normativo sostenido en la mayoría de los parámetros evaluados, el antecedente de incumplimiento en el año 2024 para el parámetro de Grasas y Aceites confirma que este contaminante representa el principal punto crítico del sistema.

Desde una perspectiva técnica, se menciona que la PTARnD requiere una optimización integral orientada a:

- Explorar opciones para asegurar que las unidades de pretratamiento retengan y almacenen adecuadamente los contaminantes para los cuales fueron diseñadas, sin saturarse ni permitir su paso a las unidades posteriores, durante los periodos entre las labores de mantenimiento y retiro de residuos.
- Definir y verificar que la bomba sumergible presente en el tanque de igualación se active y funcione de tal forma que el nivel de agua nunca logre sobrepasar la altura del muro divisorio entre la trapa de grasa y el tanque de igualación.
- Redimensionamiento de la unidad UASB, la cual presenta un TRH inferior al requerido por la Resolución 0330 de 2017. Esta condición no solo representa un diseño no conforme con la normativa colombiana, sino que también reduce el tiempo de contacto entre el agua residual y el manto de lodos, lo que impide que los microorganismos completen adecuadamente la degradación de la materia orgánica. Adicionalmente, el incremento de la velocidad ascensional asociado a caudales elevados favorece el arrastre de lodos fuera del reactor, provocando la pérdida de biomasa activa, lo cual explicaría la baja cantidad de lodos observada en la unidad.

- Si se contempla la continuación de funcionamiento del tratamiento terciario asociado a la desinfección del agua residual en el tanque de contacto se hace obligatorio la estandarización del proceso de desinfección mediante el control de dosis, tiempo de contacto y verificación microbiológica.
- Como se busca eliminar a lo máximo posible los aparatos eléctricos tales como bombas y aireadores usados en la PTARnD. Se requiere diseñar una unidad que conjunto al UASB, estén en capacidad de tratar el agua residual no domestica y general un efluente con características dentro de los limites permisibles de la resolución 0631 de 2015.

Propuesta de optimización de Planta de Tratamiento de Agua Residual no Domestica

Cribado

Con base en los resultados de los análisis hidráulicos que se han realizado, se encontró que la unidad de cribado que está instalada puede funcionar con el futuro caudal de agua residual a tratar. Esto se debe a que cumple con los requisitos de velocidad y capacidad hidráulica que se exigen para este tipo de sistemas. No obstante, durante la operación se identificó como principal dificultad el taponamiento total de los orificios del cribado cada cinco días, lo cual provoca el desbordamiento del agua residual por encima de la unidad.

Considerando que, a futuro, no se contempla un aumento en la frecuencia de mantenimiento y que se mantendrá el esquema actual de limpieza semanal (realizado los días miércoles), se planteó una optimización geométrica de la unidad de cribado. Esta consistió en el incremento de la altura del sistema, con el fin de proporcionar mayor área disponible para el paso del agua y la retención de sólidos.

El aumento de la altura permite disponer de un mayor número de orificios funcionales, lo cual incrementa la capacidad de almacenamiento temporal de sólidos retenidos, reduce el riesgo de colmatación prematura y garantiza una operación adecuada del sistema hasta la siguiente jornada de mantenimiento. De esta manera, se mejora la confiabilidad hidráulica de la unidad sin necesidad de modificar la frecuencia de limpieza. El soporte matemático se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 20*Dimensionamiento cribado*

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal máximo	0,0011	m ³ /s
Diámetro de perforaciones	0,006	m
Velocidad a través de la placa perforada	0,4	m/s
Ancho	0,5	m
Largo	0,8	m
Alto	0,2	m
Espaciamiento entre orificios	0,003	m
Número de orificios requeridos	169	Unidad
Área hidráulica requerida	0,003	m ²
Área bruta requerida	0,005	m ²
Área canastilla	0,68	m ²
Área de orificios	2,8E-05	m ²
Eficacia o área abierta	0,5	
Perdida de carga	0,009	m
Verificación pérdida de carga	0,009<=0,15	Ok
Distribución orificios		
Dimensión	Parámetro	Unidades
Distribución de orificios en la Base		
W	Espaciamientos	56
	Orificios	55

L	Espaciamientos	89
	Orificios	88
Distribución de orificios en lado lateral		
W	Espaciamientos	56
	Orificios	55
H	Espaciamientos	22
	Orificios	21
Distribución de orificios en lado frontal		
L	Espaciamientos	89
	Orificios	88
H	Espaciamientos	22
	Orificios	21
Total orificios		10841

Nota. Elaboración propia.

Trampa de grasa

La trampa de grasas existente cuenta con dimensiones, tiempo de retención hidráulica y el parámetro de velocidad ascensional para el caudal de diseño acorde a los requerimientos que señala la Resolución 0330 de 2017. Sin embargo, con el propósito de optimizar su desempeño, se plantea la instalación de un bafle en cada una de las dos cámaras del sistema. La incorporación de estos elementos permite mejorar la distribución del flujo, disminuir la velocidad del agua residual y reducir la turbulencia interna, favoreciendo la separación por flotación de grasas y aceites. Asimismo, los baffles evitan el arrastre de material flotante hacia la salida. El soporte matemático de lo anterior se observa en la tabla 21.

Tabla 21

Dimensionamiento trampa de grasa

Parámetro	Valor	Unidad
Volumen	1,8	m ³

Área	1,9	m ²
TRH	3202	s
Velocidad ascensional	0,0003	m/s
Relación Largo-Ancho	3/1	
Ancho total	0,8	m
Longitud total	2,4	m
Altura útil	0,95	m
Borde libre	0,2	m
Altura total	1,15	m
Ancho de cámara	0,8	m
Longitud cámara	1,2	m
Ubicación bafle a partir de la entra del afluente.	0,9	m

Nota. Elaboración propia.

Tanque de igualación de caudal

Los resultados obtenidos a partir del análisis de caudales máximos por hora durante las 12 horas de operación de la empresa permitieron identificar los periodos de exceso y déficit respecto a los caudales máximo y mínimos utilizados a criterio de diseño. Mediante la suma algebraica acumulada de estos valores se determinó el volumen necesario para compensar las variaciones del flujo a lo largo del día.

Con base en el valor máximo de almacenamiento requerido, se definió el volumen útil del tanque de igualación, considerando además el volumen ocupado por la loza de mantenimiento y un borde libre del 20 %. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla a continuación.

Tabla 22

Dimensionamiento tanque de igualación de caudal

Hora	Proyección caudal 2027 (m ³ /h)	Caudal Máximo (m ³ /h)	Caudal Mínimo (m ³ /h)	Exceso	Déficit	Suma Algebraica
6:00	2,1			0,5	0,0	0,5
7:00	2,7			1,1	0,0	1,6
8:00	0,9			0,0	-0,5	1,0
9:00	2,2			0,6	0,0	1,7
10:00	1,0			0,0	-0,4	1,3
11:00	0,8			0,0	-0,6	0,6
12:00	2,1	1,6	1,4	0,5	0,0	1,1
1:00	1,7			0,1	0,0	1,2
2:00	2,4			0,8	0,0	2,1
3:00	2,1			0,5	0,0	2,6
4:00	3,4			1,8	0,0	4,4
5:00	3,6			2,0	0,0	6,3
6:00	1,0			0,0	-0,4	6,0
Dimensionamiento						
Volumen tanque de igualación				7,8		m ³
Volumen ocupado por loza de mantenimiento				0,2		m ³
Borde libre				20		%
Altura				1,7		m
Ancho				2,5		m
Largo				1,8		m

Nota. Elaboración propia.

Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

Debido a la completa ausencia de información técnica detallada sobre el diseño, dimensiones, condiciones operativas y parámetros hidráulicos del reactor UASB existente, no fue posible utilizarlo como base para el análisis ni para la validación de resultados. Esta limitación representaba un riesgo significativo para la confiabilidad de los cálculos, la imposibilidad de utilizar el reactor existente reforzó la necesidad de realizar un diseño independiente, confiable y técnicamente sustentado.

El reactor UASB propuesto cumple con los criterios hidráulicos y operativos establecidos en la literatura técnica, garantizando un tratamiento eficiente del agua residual. En la tabla 23 se corrobora lo anteriormente afirmado (véase el apéndice A para la hoja de cálculo completa).

Tabla 23

Dimensionamiento UASB

Parámetro	Valor	Unidad
Volumen Útil del Reactor	18	m ³
Altura Útil	4,5	m
Área Transversal	4,1	m ²
Largo	1,6	m
Ancho	2,5	m
Tiempo de Retención Hidráulica	9	h
Velocidad Ascensional Media	0,5	m/h
Velocidad Ascensional Máxima	1	m/h
Velocidad de descenso por cada tubo distribución afluente	0,05	m/s

Nota. Elaboración propia.

Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente

Posterior al tratamiento en el reactor UASB, el efluente es dirigido al Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA), el cual actúa como unidad de pulimiento final para reducir aún más la carga orgánica remanente. Las dimensiones finales y los parámetros de operación se resumen en

la Tabla 24. Para una revisión exhaustiva de las ecuaciones aplicadas y el desarrollo paso a paso de la memoria matemática, se remite al lector al apéndice A.

Tabla 24

Dimensionamiento Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente

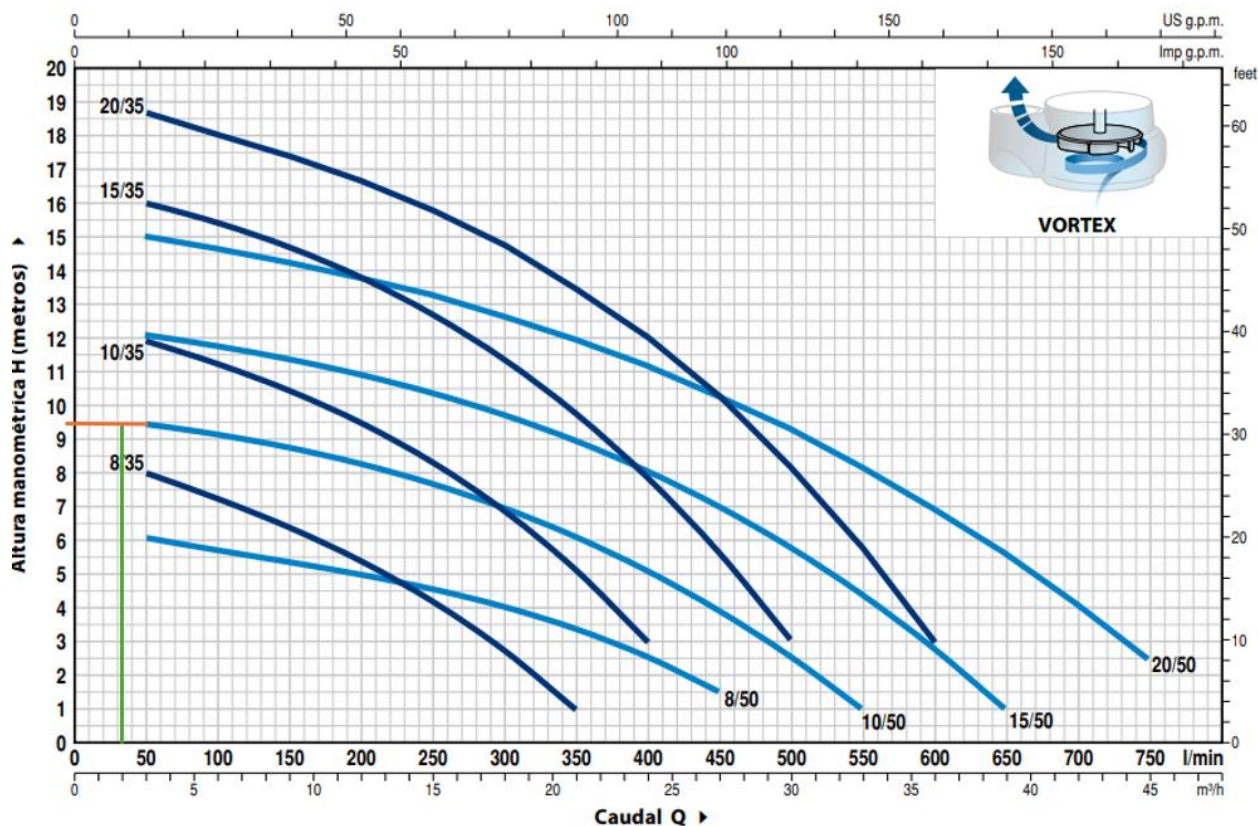
Parámetro	Valor	Unidad
Volumen lecho de grava por cada 0,1m ³ /d	0,02	m ²
Volumen útil	9,8	m ³
Profundidad lecho	1,2	m
Ancho filtro	3,5	m
Largo filtro	2,3	m
Velocidad ascensional	9,4	m/h
Material filtrante	Rosetones plásticos	

Evaluación bomba sumergible

La potencia mínima requerida para el equipo de succión necesario para el proyecto propuesto arrojó un valor de 0,06 HP. Valor mencionado comparado con ficha técnica y curvas de rendimiento propias del proveedor de la bomba actualmente instalada, señalan que la bomba en las condiciones de caudal proyectadas está en capacidad de elevar el agua a una altura de 9,5 metros, esto último se puede corroborar en la figura 3.

Figura 3

Curvas de rendimiento seleccionadas para la evaluación de la bomba de succión



Nota. Adaptado de *Electrobombas sumergibles para aguas residuales VX* (p. 3), por Pedrollo S.p.A., s.f.

Evaluación tubería de impulsión

En esta sección, se presentan los resultados de la evaluación del tramo comprendido entre el tanque de igualación de caudal y el reactor UASB. Los resultados indican que el diámetro actual instalado supera el requerimiento mínimo técnico, siendo así un sobredimensionamiento en la red. El desglose de resultados se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 25

Evaluación diámetro mínimo requerido tubería de impulsión

Parámetro	Valor	Unidad
Tiempo de bombeo por día	24	h
Caudal bombeo	0,00056972	m ³ /s

K	1,2
X	1
Diámetro tubería mínimo	0,03 m
Diámetro tubería mínimo	1 in
Diámetro actual de tubería de impulsión	2 in

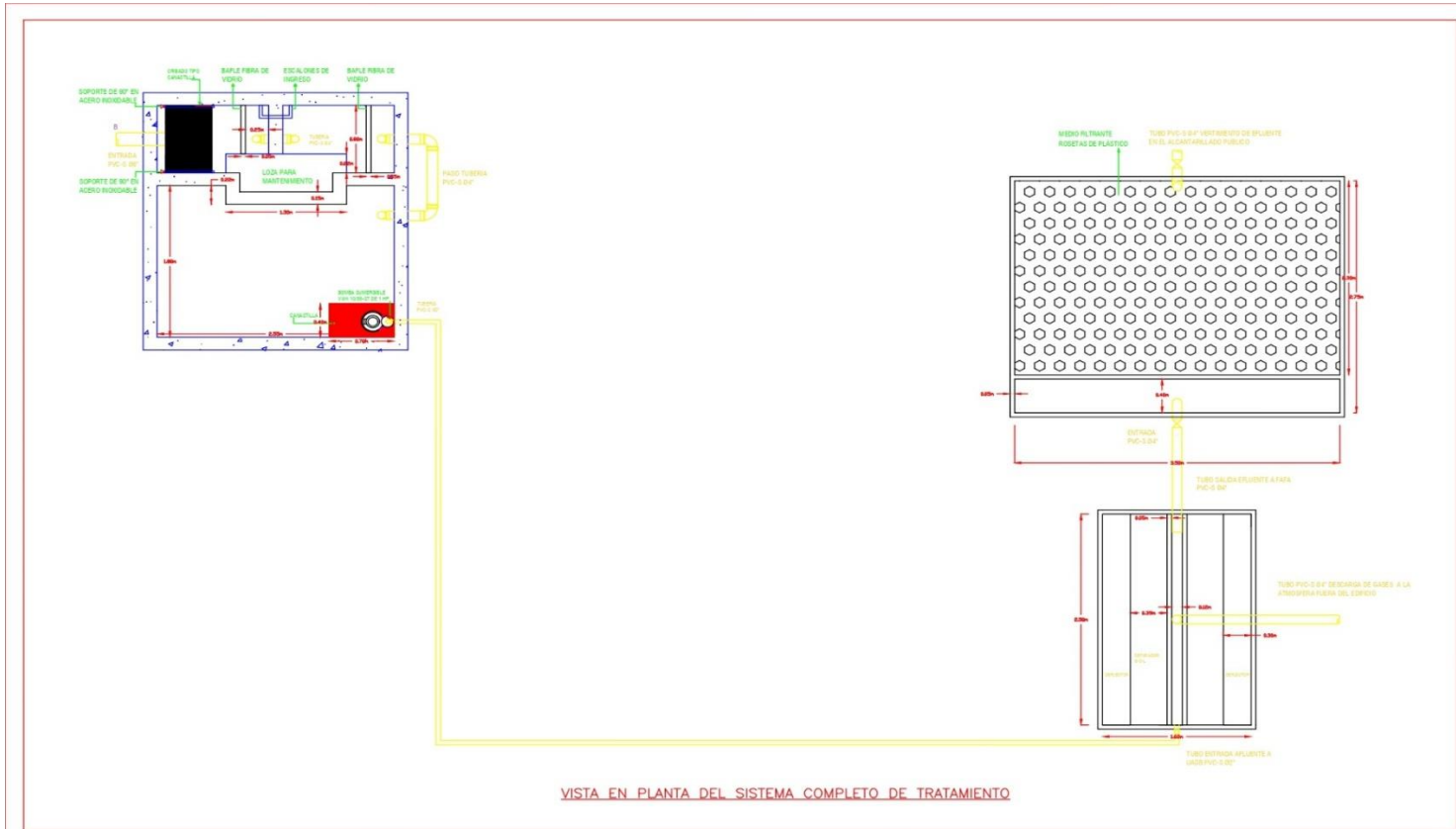
Nota. Elaboración propia.

Planos hidráulicos de las unidades optimizadas de la PTARnD

En la figura 4 se presenta el plano en vista en planta de propuesta de optimización de la planta de tratamiento de agua residual no domestica, diseñada para tratar el afluente generado en la Planta de Desposte y Derivados Cárnicos Quality Beef. Para más detalles de los planos dirigirse al apéndice B.

Figura 4

Vista en planta propuesta PTARnD



 <p>Unilasallista Corporación Universitaria Vigilada MinEduación</p>	<p>OBSERVACIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> - VISTAS EN PLANTA PTARND. - LAS LINEAS AZULES REPRESENTAN ESTRUCTURAS ACTUALES. 	<p>PROYECTO: OPTIMIZACIÓN PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL NO DOMÉSTICA</p>	
	<p>UBICACIÓN: PLANTA QUALITY BEEF</p>	<p>ESTUDIANTE: JUAN ANDRÉS GÓMEZ FLÓREZ</p> <p>DOCENTE: ALEJANDRO DE JESÚS MOLINA</p>	<p>ESCALA: 1:20</p>

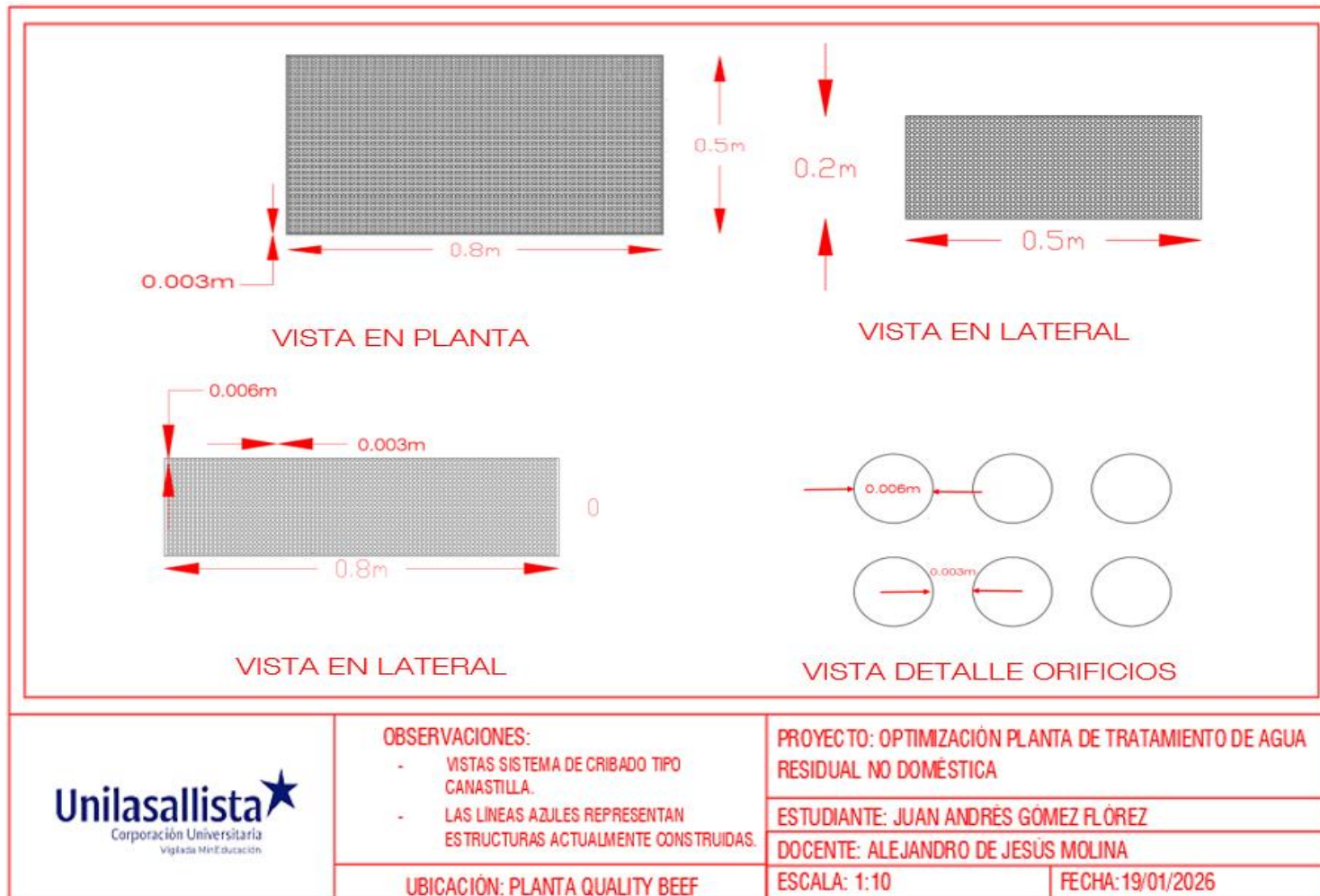
Nota. Elaboración propia.

Tratamiento preliminar

Los planos del sistema de cribado consolidan un resultado visual de una configuración hidráulica y estructural funcional, orientada a la retención eficiente de sólidos, lo suficiente como para no colmatarse al 100% antes de la siguiente jornada de mantenimiento de la unidad. Era prioridad darle a la criba suficiente área de retención para continuar su funcionalidad a medida que se van colmatando sus orificios, pero sin llegar a punto máximo de saturación de sólidos. En las figuras 5 se observan diferentes vistas del sistema de cribado de tipo canastilla diseñado.

Figura 5

Vistas sistema de cribado tipo canastilla

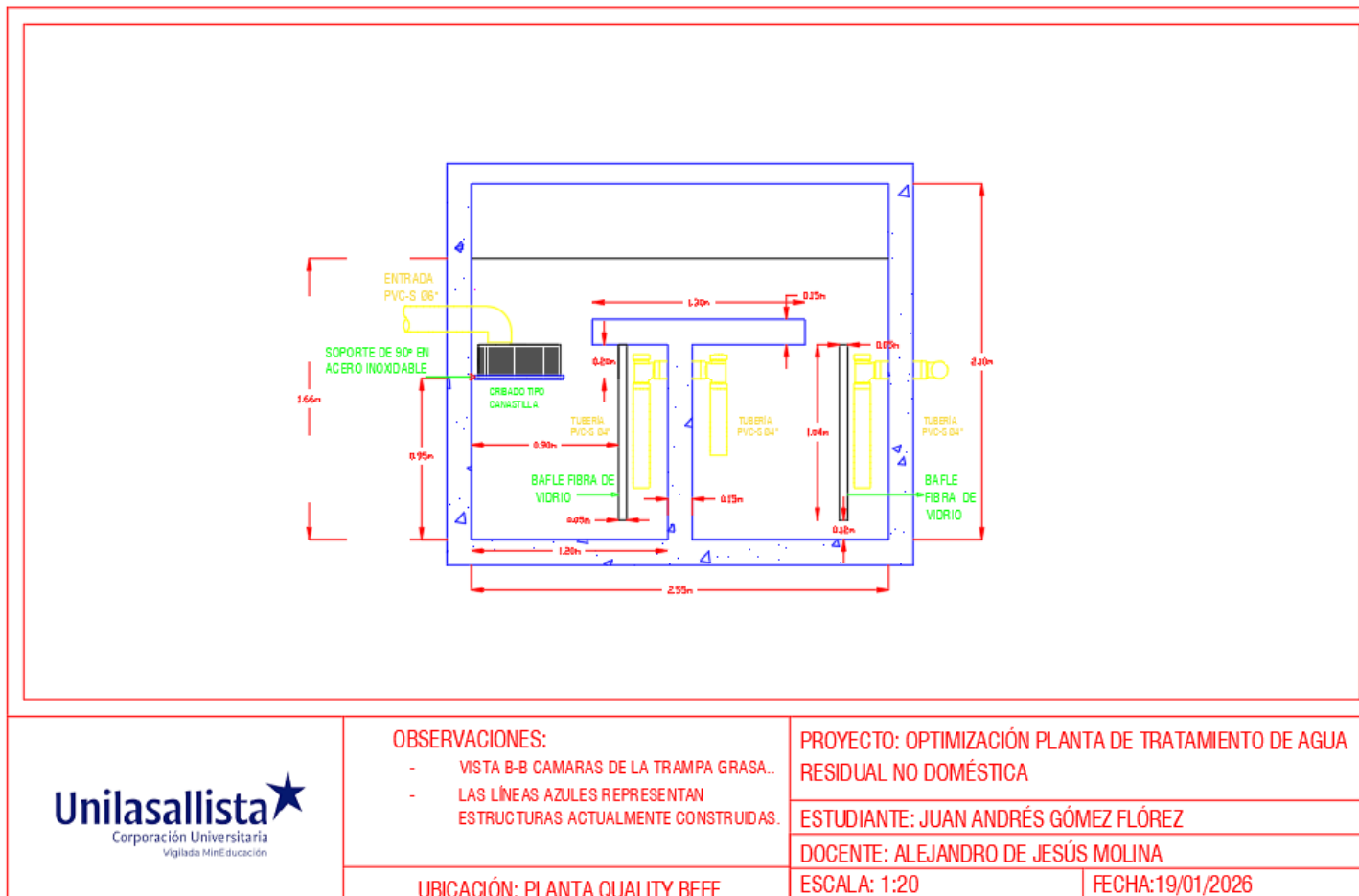


Nota. Elaboración propia.

Tal como ya se ha mencionado, el manejo de grasas, aceites y natas es en específico fundamental su manejo para el presente proyecto, al ser este contaminante el que ha presentado mayor dificultad de ser removido del agua residual de la PTARnD actúa, problemática ya asociada a la incorrecta disposición de equipos en el sistema de bombeo. Y a pesar del buen comportamiento hidráulico que maneja la unidad actual en ámbitos de su competencia, se decide complementarlo con la incorporación de baffles internos quienes optimiza el recorrido hidráulico, reduciendo la velocidad del agua residual y limitando el arrastre de natas hacia la unidad siguiente.

Figura 7

Vista B-B cámaras de la trampa grasa

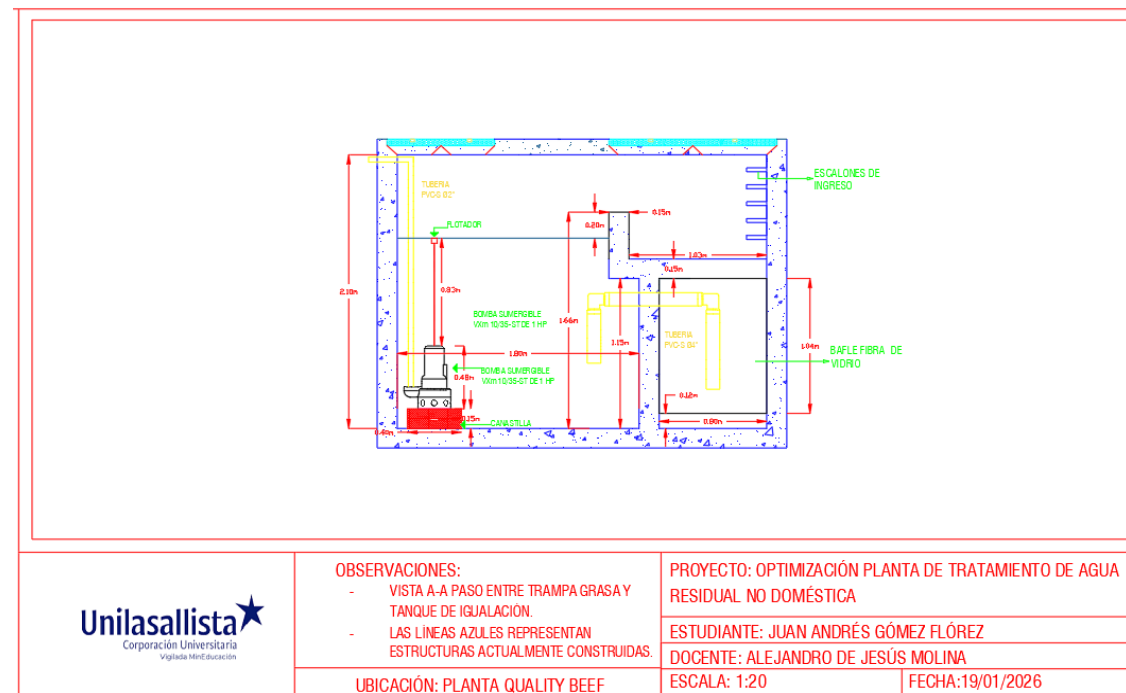


Nota. Elaboración propia.

El plano de la figura 8 en el área correspondiente al tanque de igualación brinda una perspectiva de la unidad donde es posible apreciar la altura máxima al que se puede dejar suelto el flotador.

Figura 8

Vista A-A paso entre trampa grasa y tanque de igualación



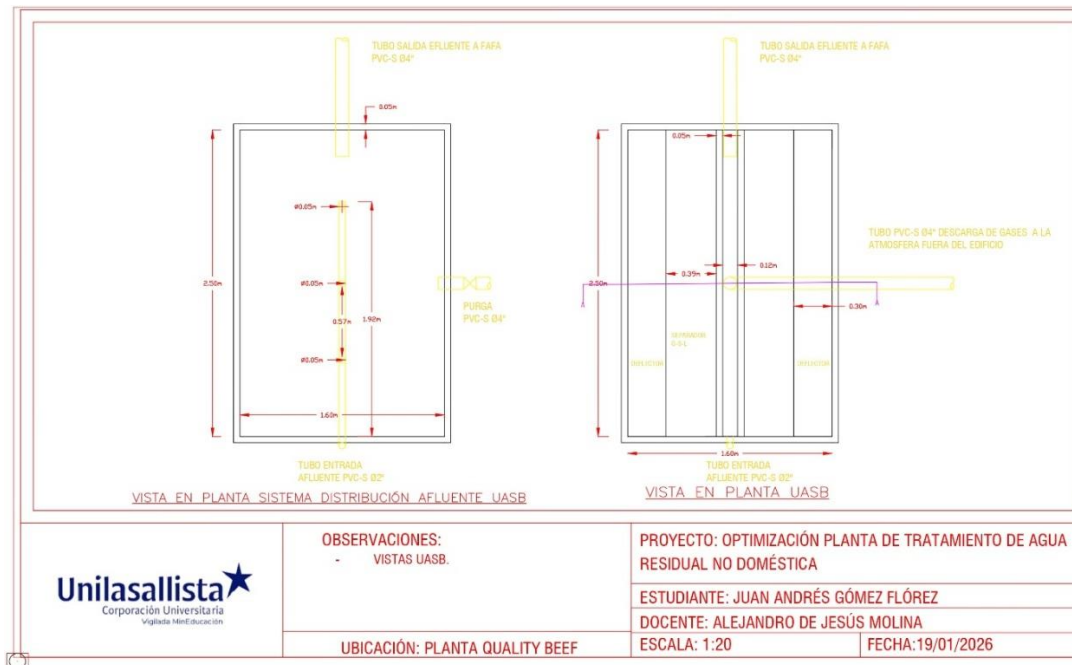
Nota. Elaboración propia.

Reactor anaerobio de flujo ascendente

En las figuras 9 y 10 se encuentran distintas vistas del UASB diseñado, con detalles y especificaciones de sus componentes internos y externos

Figura 9

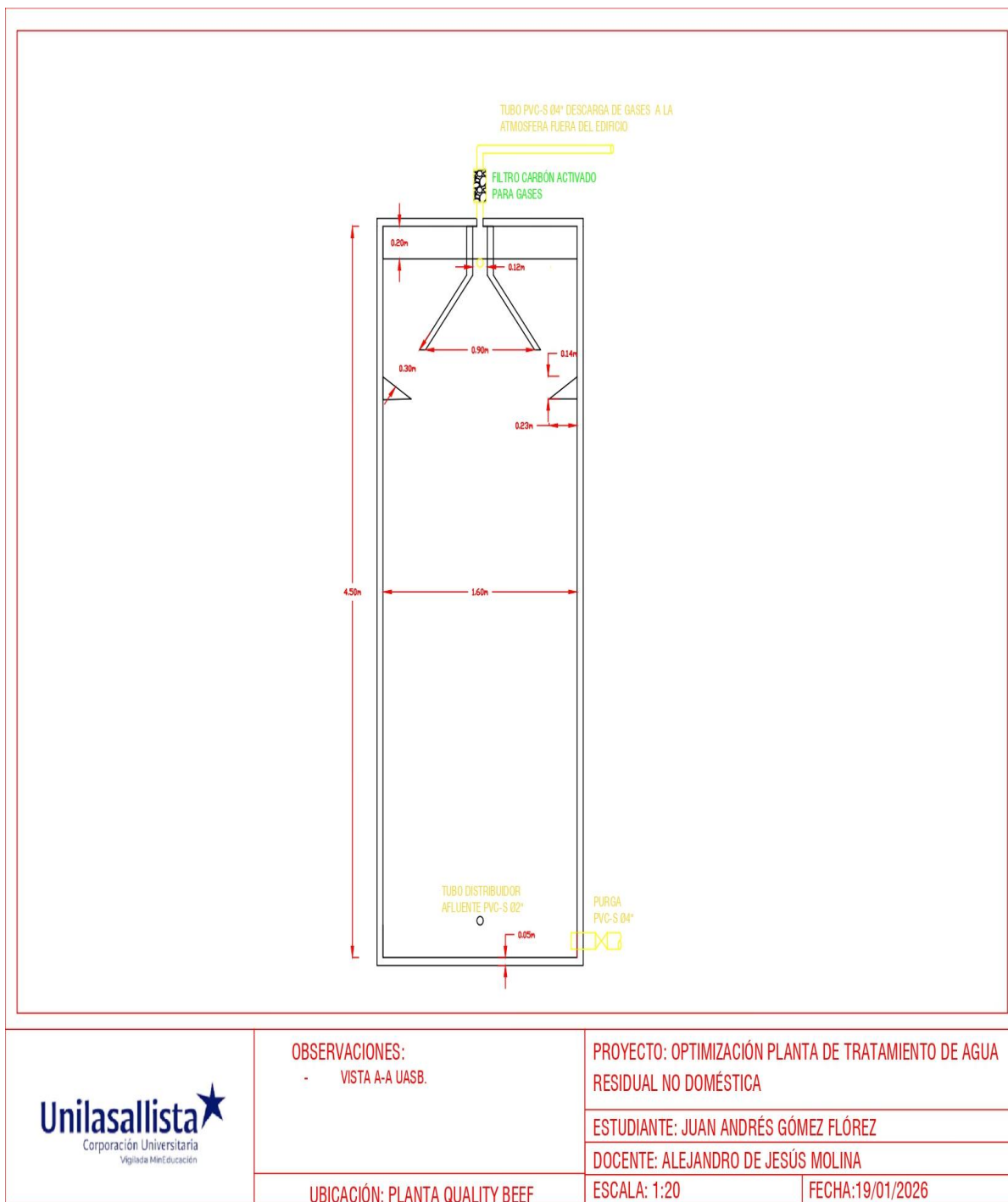
Vistas en planta UASB



Nota. Elaboración propia.

Figura 10

Vista A-A UASB



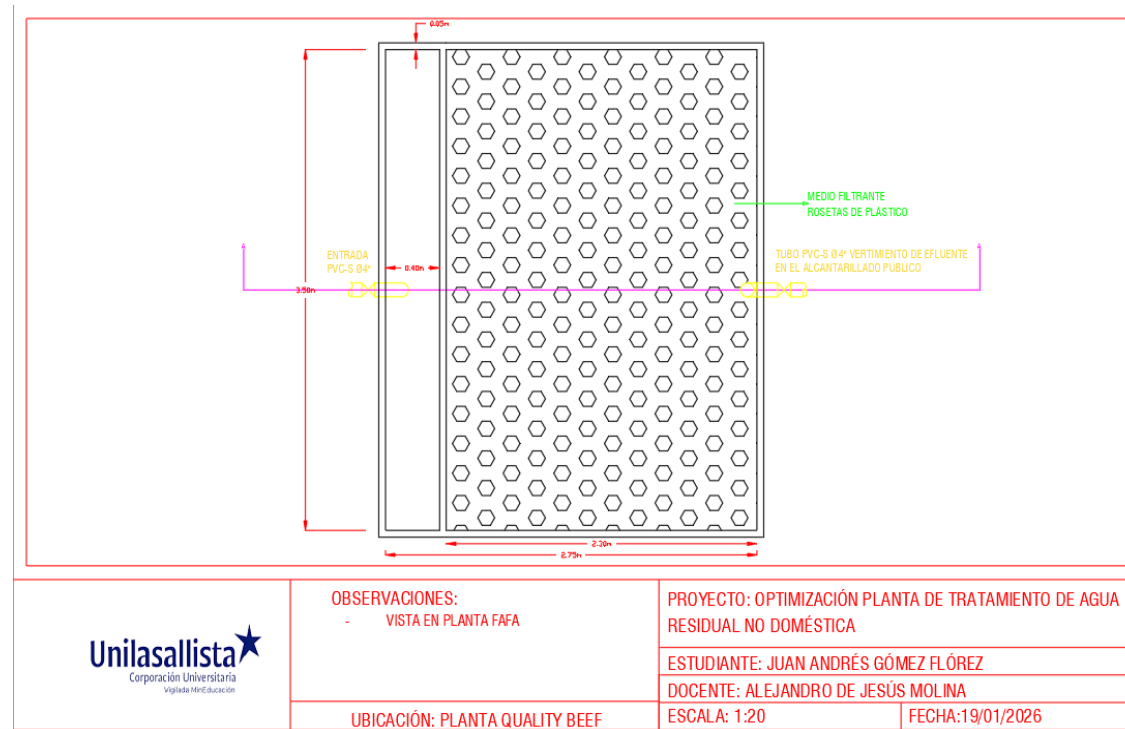
Nota. Elaboración propia.

Filtro anaerobio de flujo ascendente

Los planos en referencia a la unidad del FAFA se hallan desde la figura 11 a la 13.

Figura 11

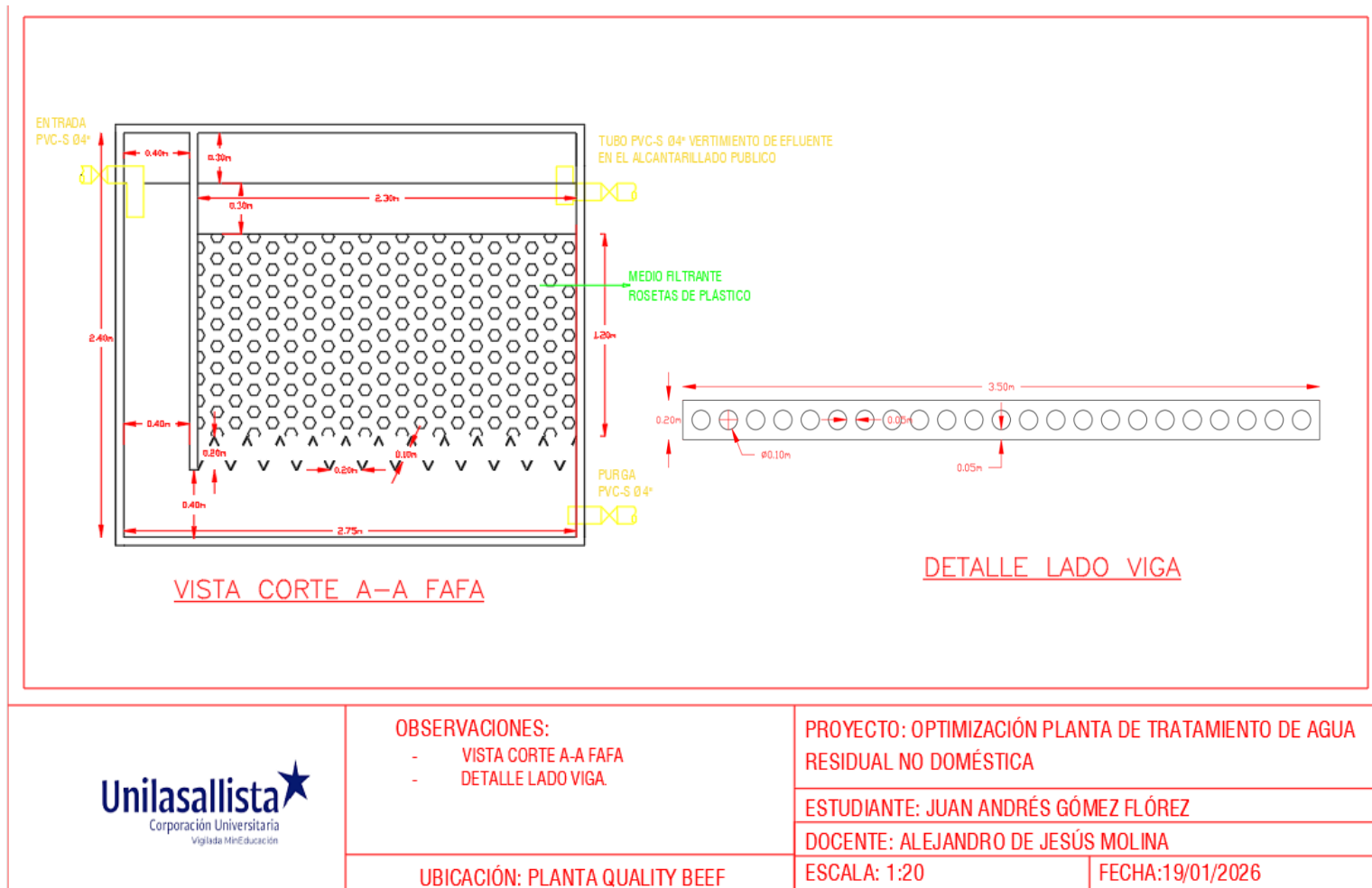
Vista en planta FAFA



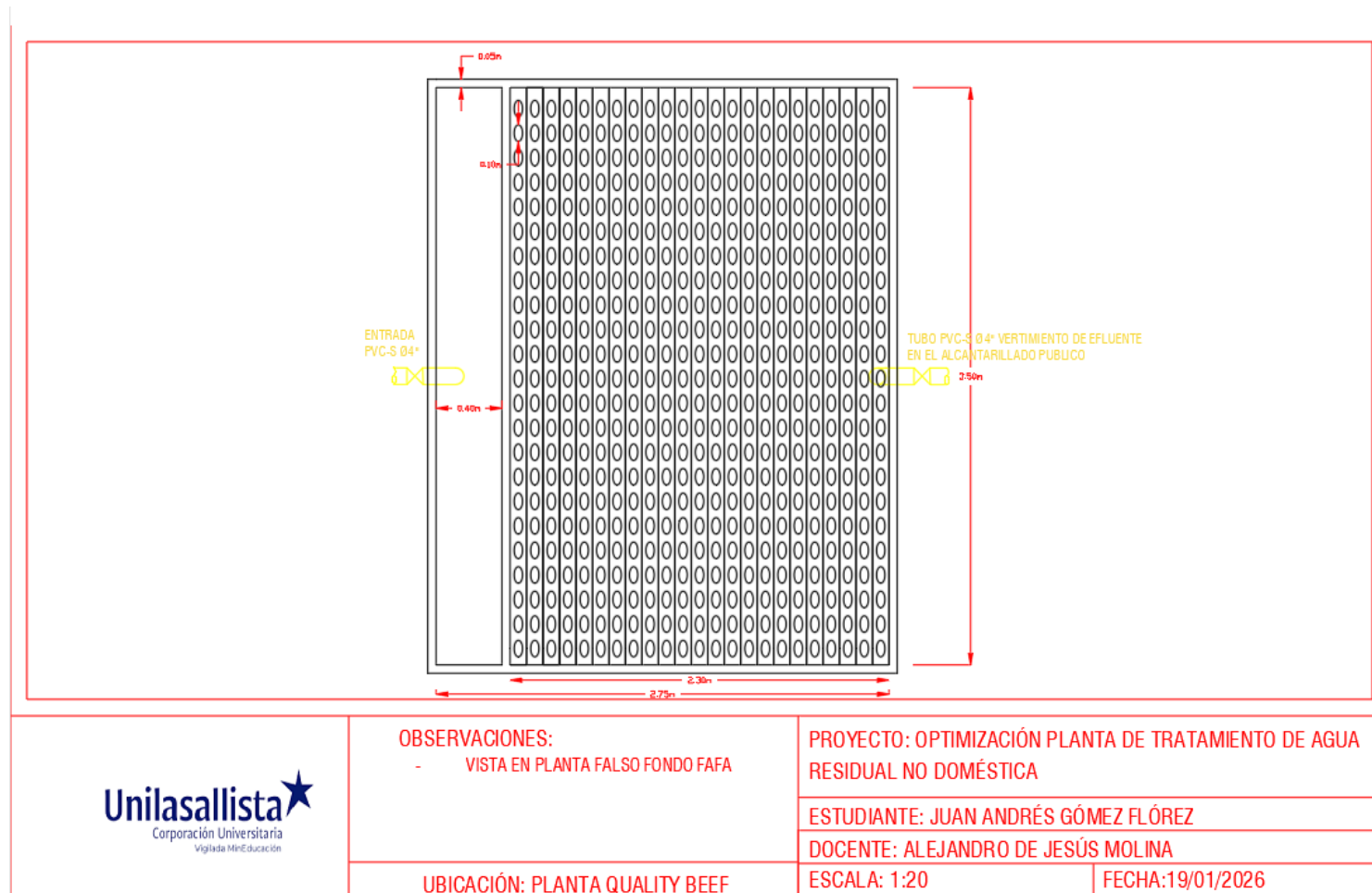
Nota. Elaboración propia.

Figura 12

Vista A-A Fafa y detalle lado de viga



Nota. Elaboración propia.

Figura 13*Vista en planta del falso fondo FAFA**Nota.* Elaboración propia.

Conclusiones

El comportamiento hidráulico de la PTARnD evidencia una operación fuera de las condiciones de diseño, dado que los caudales reales superan de forma recurrente el valor de 0,17 L/s establecido de diseño. Esta sobrecarga reduce los tiempos de retención en las unidades de tratamiento, afectando la estabilidad de los procesos biológicos, conllevando a una disminución de eficiencia de remoción de contaminantes en estas unidades y siendo la condición responsable de los eventos de desborde de múltiples unidades de tratamiento.

Las unidades de cribado actual se colmatan sus orificios en un 100% alrededor del día 5 y 6, lo que se manifiesta en desbordes y en el paso de contaminantes a las etapas posteriores. Esta condición está poniendo en riesgo y deterioro a los equipos de bombeo.

El reactor UASB presenta un tiempo de retención hidráulica (TRH) inferior al requerido por la Resolución 0330 de 2017, lo que limita la eficiencia de la degradación anaerobia de la materia orgánica y favorece el arrastre de biomasa activa, considerándose un diseño por fuera de las especificaciones de la Resolución 0330 del 2017 y aún más crítico, hace que se reduzca la capacidad y eficiencia del tratamiento del sistema, de modo que a futuro no se garantiza que la PTARnD genere un efluente dentro de los parámetros establecidos en la Resolución 0631 del 2015.

Aunque el efluente tratado cumple en general con los límites de la Resolución 0631 de 2015, el antecedente de incumplimiento en grasas y aceites, junto con los eventos de rebose registrados, indican que la PTARnD opera en un estado de vulnerabilidad técnica frente a aumentos de carga hidráulica.

Recomendaciones

Aumentar los mantenimientos del cribado y trampa de grasa a dos por semana en épocas pico de producción.

Redimensionar el reactor UASB para cumplir con el TRH mínimo exigido por la Resolución 0330 de 2017, garantizando condiciones adecuadas para la degradación anaerobia de la materia orgánica y la retención de biomasa.

Optimizar las unidades de pretratamiento mediante el rediseño del sistema de cribado y la trampa de grasas, asegurando una mayor capacidad de retención y almacenamiento de contaminantes entre los intervalos de mantenimiento.

Ajustar la ubicación y configuración de la bomba del tanque homogeneizador para permitir una activación a niveles sugeridos, reduciendo el riesgo de desbordes y el ingreso de grasas a las unidades posteriores.

Referencias

- Ayquipa Conde, N. Z. (2021). *Evaluación de la eficiencia de una trampa de grasa (interceptor de grasa hidromecánico) para el pretratamiento de aguas residuales grises en viviendas unifamiliares del distrito de Lares – Cusco* [Trabajo de Grado, Universidad Continental]. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11474/1/IV_FIN_107_TE_Ayquipa_Conde_2021.pdf
- Bases y subbases granulares para vías terciarias: casos de estudio y su posible aplicación en Colombia [Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/739f3de2-d9e3-4f64-883d-47acb91a6510/content>
- Callata Chura, R. A., Manani Ccama, N. T., Chavez Molina, R. D., & Vigo Rivera, J. E. (2021). Depuración de aguas residuales domésticas con Microorganismos Eficientes en condiciones altiplánicas en sistema mixto (anaerobio-aeróbico). *UNACIENCIA, Revista de Estudios e Investigaciones*, 14(26), 60–67. <https://share.google/4r0436Bge6VW2lgJq>
- Carbotecnia. (20 de marzo de 2025). Tratamiento terciario de aguas residuales con carbón activado para cumplir la norma NOM-001-SEMARNAT-2021. <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/aplicaciones-carbon/tratamiento-terciario-de-aguas-residuales-con-carbon-activado-biologico/>
- De Lemos Chernicharo, C. A., & Sánchez Ortiz, I. A. (2022). Reactores anaerobios [Anaerobic reactors] (2ª ed.). Editorial Universidad de Nariño. Repositorio Institucional Universidad de Nariño. <https://sired.udenar.edu.co/7458/1/REACTORES%20ANAEROBIOS%20DIGITAL%20Publicaci%C3%B3n%20Junio%202022.pdf>

Díaz Amaya, E. F. & Gelvez Peña, D. F. (2023). Pretratamiento de aguas residuales mediante la construcción de un cribado autolimpiante [Trabajo de grado, Universidad de Santander]. <https://metaflip.metabiblioteca.com/?pdf=https://repositorio.udes.edu.co/server/api/core/bitstreams/1b812f79-7d59-4ef3-b8ad-8f1e7c901d50/content?authentication-token=null>

Echeverry Romero, C. A. (2021). Estado del conocimiento de lodos residuales de PTAR aplicado en

Fernández González, J., Beascochea, E., Muñoz, J., & Curt Fernández de la Mora, M. D. (2020). Manual de fitodepuración: Filtros de macrofitas (Manual técnico). Fundación Global Nature. https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2020/01/manual_fitodepuracion.pdf

Galeano Orozco, P. A. (2020). Gestión del agua en la industria alimentaria como estrategia empresarial para disminuir la huella hídrica generada en el desarrollo de su actividad económica [Trabajo de Grado, Universidad de Antioquia]. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/9496cb7a-f81c-45df-94a1-4e909260e96f/content>

Ibarra Rodriguez, D. (2020). Análisis integral y optimización de un proceso de floculación-coagulación empleando pectina de nopal para el tratamiento de aguas contaminadas con metales de la industria galvanoplastia [Tesis de Doctorado, Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica, s.c]. Repositorio CIDETEQ. <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1021/453>

Jacobo, A., Esparza Soto, M., Lucero Chávez, M., & Fall, C. (2019). Tratamiento de un agua residual industrial a temperatura psicrófila con un reactor UASB. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(4), 905–915. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992019000400905

Londoño Vélez, S. (2023). Guía de diseño conceptual y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en pequeñas comunidades (Guía PTAR). Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare – CORNARE. https://www.cornare.gov.co/documentos/Guia_PTAR.pdf

Lukashenko, S., Syrovatsky, O., & Karahiaur, A. (2025). Application of elastic foampolyurethane for the treatment of meat industry wastewater. *Municipal Economy of Cities*, 1(189), 243–251. <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/en/article/view/6472/6392>

Mariño Molina, J. V. (2022). Tratamiento de aguas residuales: Evaluación de alternativas para el tratamiento de aguas residuales de la industria galvánica [Artículo académico]. Repositorio Institucional, Universidad Militar Nueva Granada. <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/e02df6f0-be27-43e7-9934-7a88dcd9c30e/content>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Colombia). (2015). Resolución 631 de 17 de marzo de 2015: Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2021). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000): Título E – Sistemas de tratamiento de aguas residuales. <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulo-e-28122021-final-limpio-rev.pdf>

Pilonieta, G. (2023). Evaluación de una tecnología alternativa de desinfección física de aguas residuales domésticas urbanas de San Gil [Trabajo de grado, Universidad de Santander].

<https://repositorio.udes.edu.co/server/api/core/bitstreams/6a3b98c0-8a40-4763-b2b6-d14e3c2fd264/content>

Ramirez, W. (s. f.). Cálculo del índice volumétrico de lodos [Documento en línea]. Scribd.
<https://es.scribd.com/document/359388211/Calculo-Del-Indice-Volumetrico-de-Lodos>

Rosales Intriago, C. E. (2019). Diseño de un Tanque UASB para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Universidad Estatal del Sur de Manabí del Cantón Jipijapa [Trabajo de Grado, Universidad Estatal Del Sur De Manabí].
<https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/2003/1/UNESUM-ECUADOR-ING.CIVIL-2019-86.pdf>

Torres, M. (2021). Diagnóstico, estandarización y evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales generadas en la industria maderera ubicada en el municipio de Barbosa-Antioquia [Trabajo de grado, Universidad de Antioquia].
<https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/3835734b-005d-40ba-b889-98d607d6ee26/content>

Apéndice

Apéndice A: Memoria de calculo

Apéndice B: Planos hidráulicos