

PROPUESTA DE MEJORA DE PROCESOS PARA LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE FUNZA
(CUNDINAMARCA)

ANDRÉS ALBERTO NAVARRETE BENAVIDES

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2020

PROPUESTA DE MEJORA DE PROCESOS PARA LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE FUNZA
(CUNDINAMARCA)

ANDRÉS ALBERTO NAVARRETE BENAVIDES

Proyecto de grado para optar por el título de
INGENIERO AMBIENTAL

Docente
DAVID ANDRÉS ZAMORA ÁVILA
Facultad de Ingeniería Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C. – CUNDINAMARCA
2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá, 30 de Junio de 2020

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
OBJETIVOS	14
OBJETIVO GENERAL.....	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1 MARCO REFERENCIAL.....	15
1.1 MARCO CONTEXTUAL.....	15
1.1.1 GEOGRAFÍA	15
1.1.2 HIDROGRAFÍA:.....	16
1.1.3 PRECIPITACIÓN.....	16
1.1.4 POBLACIÓN.....	17
1.1.5 ALCANTARILLADO	17
1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA Y ESTRUCTURAS DE TRATAMIENTO DE LA PTAR DE FUNZA.....	18
1.2.1 TRATAMIENTO PRELIMINAR:	21
1.2.2 ESTACIÓN DE BOMBEO INICIAL Y TANQUE DE HOMOGENIZACIÓN	22
1.2.3 DESARENADO:.....	25
1.2.4 TRATAMIENTO SECUNDARIO:.....	26
1.2.5 TRATAMIENTO DE LODOS:.....	28
1.2.6 SALIDA EFLUENTE TRATADO:.....	29
1.3 MARCO CONCEPTUAL	30
1.3.1 AGUA RESIDUAL.....	30
1.3.2 AGUA RESIDUAL DOMESTICA:.....	30
1.3.3 AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL:.....	30
1.3.4 ORGANISMOS ANAEROBIOS:.....	30
1.3.5 ORGANISMOS AEROBIOS:.....	30
1.3.6 ORGANISMOS FACULTATIVOS:	31
1.3.7 ORGANISMOS HETERÓTROFOS:.....	31
1.3.8 ORGANISMOS AUTÓTROFOS:.....	31
1.4 MARCO TEORICO	31

1.4.1	SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN COLOMBIA	31
1.4.2	SISTEMAS BIOLÓGICOS AIREADOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	32
1.5	MARCO NORMATIVO	35
2	DESARROLLO DE LA PASANTÍA Y APLICACIÓN DE HABILIDADES ...	38
3	DISEÑO METODOLÓGICO	39
3.1	RUTA METODOLÓGICA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO....	39
3.2	HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS.....	40
3.2.1	DETERMINACIÓN DE GRASAS Y ACEITES.....	40
3.2.2	DETERMINACIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	40
3.2.3	DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO POR EL MÉTODO DE INCUBACIÓN Y ELECTROMETRÍA.....	40
3.2.4	DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO POR REFLUJO CERRADO Y VOLUMETRÍA.....	41
3.3	POSIBLES MEDIDAS DE MEJORA DE PROCESOS PARA LA PTAR DEL MUNICIPIO DE FUNZA.	41
3.3.1	PERIODO DE DISEÑO:.....	41
3.3.2	PROYECCIÓN DE POBLACIÓN	41
3.3.3	POBLACIÓN MÁXIMA SOPORTADA PARA EL ÁREA DE EXPANSIÓN PARA EL MUNICIPIO DE FUNZA.	43
4	RESULTADOS.....	44
4.1	DIAGNÓSTICO DE LA PTAR DEL MUNICIPIO DE FUNZA CUNDINAMARCA	44
4.1.1	CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL AFLUENTE Y AGUA EN PROCESO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL MUNICIPIO DE FUNZA CUNDINAMARCA.....	44
4.1.2	COMPORTAMIENTO MEDIO MENSUAL DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA ANALIZADOS DURANTE EL PERIODO DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO	45
4.1.3	PUNTOS CRÍTICOS DE CONTROL DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO	53
4.1.4	CARACTERIZACIÓN DEL SECTOR INDUSTRIAL DEL MUNICIPIO	58
4.1.5	RED DE ALCANTARILLADO:.....	61

4.1.6	IDENTIFICACIÓN DE CONEXIONES ERRADAS	63
4.2	DISEÑO MEDIDAS DE MEJORA	65
4.2.1	REDISEÑO TANQUE DE BOMBEO	65
4.2.2	REDISEÑO SISTEMA DE CRIBADO GRUESO	65
4.2.3	DISEÑO DE UN DESARENADOR-DESENGRASADOR	65
4.2.4	CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA LAS UNIDADES HIDRÁULICAS DE MEJORA PROPUESTAS.....	66
4.2.5	ÁREAS DE EXPANSIÓN DE VIVIENDAS	68
4.2.6	DENSIDAD DE POBLACIÓN.....	68
4.2.7	POBLACIÓN MÁXIMA SOPORTADA PARA EL ÁREA DE EXPANSIÓN PARA EL MUNICIPIO DE FUNZA.	68
4.2.8	CÁLCULO DE CAUDAL DE DISEÑO Y REDISEÑO DE LAS UNIDADES CRÍTICAS TRATAMIENTO	69
	CONCLUSIONES	85
	RECOMENDACIONES.....	86
	BIBLIOGRAFÍA.....	87
	ANEXOS	90

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros Fisicoquímicos de Diseño PTAR del Municipio Funza - Cundinamarca	18
Tabla 2. Valores máximos permisibles para Aguas Residuales Domésticas y aguas residuales no domésticas -de los prestadores del servicio público de alcantarillado, con una carga mayor a 625 kg/día y menor l a 3000 kg/día DBO5	19
Tabla 3. Valores máximos según Resolución CAR 0736 de 2018.	19
Tabla 4. Los puntos de monitoreo durante la ejecución del proyecto	44
Tabla 5.Caracterización Principales Industrias Funza.....	59
Tabla 6. Censos Poblacionales DANE.....	67
Tabla 7. Clasificación de uso del suelo para el municipio de Funza.....	68
Tabla 8. Densidad de ocupación de Viviendas por hectárea para el municipio de Funza	68
Tabla 9. Población Máxima para el municipio de Funza	69
Tabla 10. Grandes Consumidores Industriales	71
Tabla 11. Sugerencia según velocidad de conducción	74
Tabla 12. Dimensiones tanque de bombeo.....	74
Tabla 13. Dimensiones Sistema de Cribado con espaciamiento de 100 mm	77
Tabla 14. Dimensiones Sistema de Cribado con espaciamiento de 50 mm	78
Tabla 15. Parámetro de diseño Desarenador-Desengrasador	80
Tabla 16. Dimensiones Desarenador – Desengrasador.....	82
Tabla 17. . Proyección de Población por los Métodos Geométrico y Exponencial.	91
Tabla 18. . Arranques por hora en función de la potencia de la Bomba	92
Tabla 19. Sugerencia de Aspiración según velocidad de conducción.	94
Tabla 20. Parámetro de diseño Desarenador-Desengrasador	100
Tabla 21. Características de Sedimentación de Partículas	101
Tabla 22. Velocidades ascensionales de partículas.....	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Proceso PTAR Funza Cundinamarca	20
Figura 2. . Diagrama Proceso de Lodos Activados	33
Figura 3. Proceso Típico de Lodos Activados	34
Figura 4. Etapas del Sistema SBR.....	35
Figura 5. Vista en planta de la PTAR donde se resaltan los puntos de monitoreo Caracterizados en 2019.....	45
Figura 6. Identificación área libre de rejillas en tanque de Bombeo	54
Figura 7. Colectores aferentes a la PTAR del municipio de Funza.	62
Figura 8. Visita Transversal Tanque d Bombeo	75
Figura 9. Vista en Planta Tanque de Bombeo.....	75
Figura 10. Vista Transversal Rejillas de Cribado Grueso	78
Figura 11. Vista de Perfil Tanque de Bombeo y Sistema de Cribado	79
Figura 12. Circulación helicoidal del agua en un desarenador aireado	80
Figura 13. Relaciones dimensionales sección transversal	81
Figura 14. Vista transversal Desarenador - Desengrasador.....	82

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Hietograma de precipitación media mensual multianual (1938-2018). Estación Climatológica La Ramada Funza	17
Gráfica 2. Comportamiento medio mensual del pH durante el periodo de caracterización en el año 2019	46
Gráfica 3. Comportamiento medio mensual de los SST durante el periodo de caracterización en el año 2019	46
Gráfica 4. Comportamiento medio mensual de la DQO durante el periodo de caracterización en el año 2019	47
Gráfica 5. Comportamiento medio mensual de los SSED durante el periodo de caracterización en el año 2019	48
Gráfica 6. Comportamiento medio mensual de la DBO5 durante el periodo de caracterización en el año 2019	49
Gráfica 7. Comportamiento medio mensual de las Grasas y Aceites durante el periodo de caracterización en el año 2019	50
Gráfica 8. Comportamiento medio mensual del Nitrógeno Total durante el periodo de caracterización en el año 2019	51
Gráfica 9. Comportamiento medio mensual de los Nitratos durante el periodo de caracterización en el año 2019	51
Gráfica 10. Comportamiento medio mensual de los Nitritos durante el periodo de caracterización en el año 2019	52
Gráfica 11. Comportamiento medio mensual del Fosforo Total durante el periodo de caracterización en el año 2019	52
Gráfica 12. Proyecciones de Población	67

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Municipio de Funza y ubicación espacial de la PTAR	16
Imagen 2. Visita aérea PTAR Municipio de Funza	21
Imagen 3. Canastilla de Cribado Grueso	21
Imagen 4. Ubicación Canastilla de Cribado Grueso	22
Imagen 5. Sistema de guías Canastilla de Cribado Grueso	22
Imagen 6. Estación de Bombeo PTAR Funza Cundinamarca	23
Imagen 7. Compuerta de entrada de agua residual al Tanque de Homogenización	23
Imagen 8. Tanque de bombeo	24
Imagen 9. Tamices estáticos	24
Imagen 10. Tanque de distribución Tamices Estáticos	25
Imagen 11. Rejillas de cribado fino para partículas mayores a 3 mm y cajón de recolección de sólidos	25
Imagen 12. División de caudal y vertedero de excesos desarenador	26
Imagen 13. Desarenador de canal doble PTAR Municipio de Funza	26
Imagen 14. Sistema SBR, Reactor N° 1 y N° 2	27
Imagen 15. Zona de Reacción Sistema SBR	27
Imagen 16. Zanjón de Oxidación Sistema de Lodos Convencional	28
Imagen 17. Zanjón de Oxidación Sistema de Lodos Convencional	28
Imagen 18. Sistema de espesamiento de Lodo por Hidrociclón	29
Imagen 19. Lechos de secado de lodos	29
Imagen 20. Tubería de Salida Sistema SBR	29
Imagen 21. Canal de Salida Sistema Convencional	30
Imagen 22. Rejilla de cribado	53
Imagen 24. Vertedero de excesos desarenador	55
Imagen 25. Ingreso de grasa al tratamiento secundario a través del desarenador	56
Imagen 26. Capa de grasa en sistema de Reactores Biológicos	57
Imagen 27. Conexiones erradas identificadas en el catastro de redes parte Norte del Municipio de Funza- Cundinamarca	63
Imagen 28.. Conexiones erradas identificadas en el catastro de redes parte Norte del Municipio de Funza- Cundinamarca	64

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados Proyecciones de Población	91
Anexo 2. Memoria de Calculo Medidas de Mejora	92

RESUMEN

En la actualidad en el municipio de Funza Cundinamarca cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). No obstante, presenta algunos problemas que no permiten su óptimo funcionamiento que se ve reflejado en mayores cargas contaminantes vertidas a al Humedal Gualí, el cual es el cuerpo hídrico receptor del efluente de la PTAR y consiga la salud del ecosistema allí presente. En el presente proyecto se realizó una propuesta de mejora en los procesos de la PTAR, basado en el diagnóstico de esta a través de la recopilación de información (diseño y operación) y de la caracterización fisicoquímica del agua en las diferentes etapas del tren de tratamiento con el fin de identificar los puntos críticos de control. Además, no solo se estudiaron las soluciones a final de tubo, es decir mejoras las estructuras de tratamiento existente o nuevas, sino que se evaluaron procesos previos al sistema de tratamiento como lo es la red de alcantarillado y la calidad de los vertimientos entregados a esta red por parte del sector industrial. A partir del diagnóstico se logró identificar la falta de algunas unidades de tratamiento, el no cumplimiento de las especificaciones técnicas de algunas unidades existentes, la existencia de conexiones erradas entre la red pluvial y la red sanitaria, el incumplimiento de la norma nacional de vertimientos por parte de algunas industrias de la zona de influencia, la falta de articulación entre la norma de vertimientos y los parámetros de diseño de la PTAR, y fallas operacionales que impactan negativamente el proceso de tratamiento. Como medidas de mejora se realizó el rediseño del tanque de bombeo junto con el sistema de cribado grueso, así como el diseño y dimensionamiento de una unidad de desarenado y desengrasado. Finalmente, se formuló un plan de buenas prácticas de operación que conlleven a la mejora en el funcionamiento de las unidades de tratamiento y de este modo al cumplimiento de la normativa vigente, Además, se concluyó que los factores externos que impactan negativamente el proceso de tratamiento de la PTAR, como las conexiones erradas, tramos de red combinados y el incumplimiento de algunas industrias, deben ser abordados en conjunto con las medidas de mejora estructurales para dar una solución definitiva y desmontar la creencia que el impacto del humedal Gualí se debe únicamente al mal funciona de la PTAR.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico y la concentración poblacional en áreas urbanas, ha generado un aumento en la presión sobre los recursos naturales, lo que ha conllevado a diversas problemáticas ambientales debido a su afectación. El recurso hídrico por su parte, se ha visto afectado de diversas formas tales como la contaminación de cauces y la reducción de caudales. A nivel urbano, los vertimientos de las aguas residuales domésticas e industriales se han convertido en un problema de contaminación para los cuerpos de agua superficial, ya que estos vertimientos son descargados a estas fuentes. Para contrarrestar esta problemática, las entidades gubernamentales colombianas han implementado diferentes estrategias para mitigar la contaminación, y una de estas estrategias es la construcción de PTAR [1].

En la actualidad en el municipio de Funza Cundinamarca existe un sistema de tratamiento de aguas residuales (PTAR). No obstante, la falta de algunas unidades de tratamiento, el crecimiento demográfico, problemas en la red de alcantarillado y algunas fallas operacionales, no permiten su óptimo funcionamiento afectando de esta manera el cuerpo hídrico receptor del efluente de la PTAR y consigo la salud del ecosistema allí presente. La siguiente es una propuesta de mejora en los procesos de tratamiento para la PTAR del municipio de Funza, en la cual se evalúan cada una de las unidades de tratamiento, así como factores externos que posiblemente impacten al tratamiento que allí se realiza y se presentan propuestas de mejora que incluyen el dimensionamiento de estructuras hidráulicas de tratamiento y un plan de buenas prácticas de operación.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer mejoras en los procesos del sistema de tratamiento de agua residual del municipio de Funza con deficiencias en la remoción de carga contaminante para reducir los efectos del efluente de la PTAR sobre el humedal Gualí y dar cumplimiento a lo establecido en la Resolución CAR 0736 de 2018 [4].

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el afluente en las distintas fases del tratamiento y el efluente de la PTAR, que permitan cuantificar la concentración de los siguientes parámetros de calidad del agua: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Solidos Sedimentables (SSE), Solidos Suspendidos Totales (SST) y Grasas y aceites.
- Elaborar el diagnóstico de funcionamiento de la PTAR en donde se evalúe el porcentaje de remoción de los diferentes parámetros de calidad del agua en las fases de tratamiento de las aguas residuales, a partir de los resultados obtenidos en la caracterización del afluente y el efluente de la PTAR
- Diseñar medidas de mejora, dentro de las cuales se contempla el diseño de estructuras hidráulicas de tratamiento, y un plan de buenas prácticas de operación para los puntos críticos del proceso de tratamiento que conlleven al cumplimiento de la normativa vigente de vertimientos a cuerpos de agua superficial.

1 MARCO REFERENCIAL

1.1 MARCO CONTEXTUAL

La EMPRESA MUNICIPAL DE ACUEDUCTO ALCANTARILLADO Y ASEO DE FUNZA – EMAAF E.S.P., fue constituida por el Acuerdo No. 034 de Diciembre 4 de 1995, emanado del Concejo Municipal del Municipio de Funza, como una Empresa Industrial y Comercial del Estado del orden Municipal, con autonomía administrativa y Financiera propia y de duración indefinida [3].

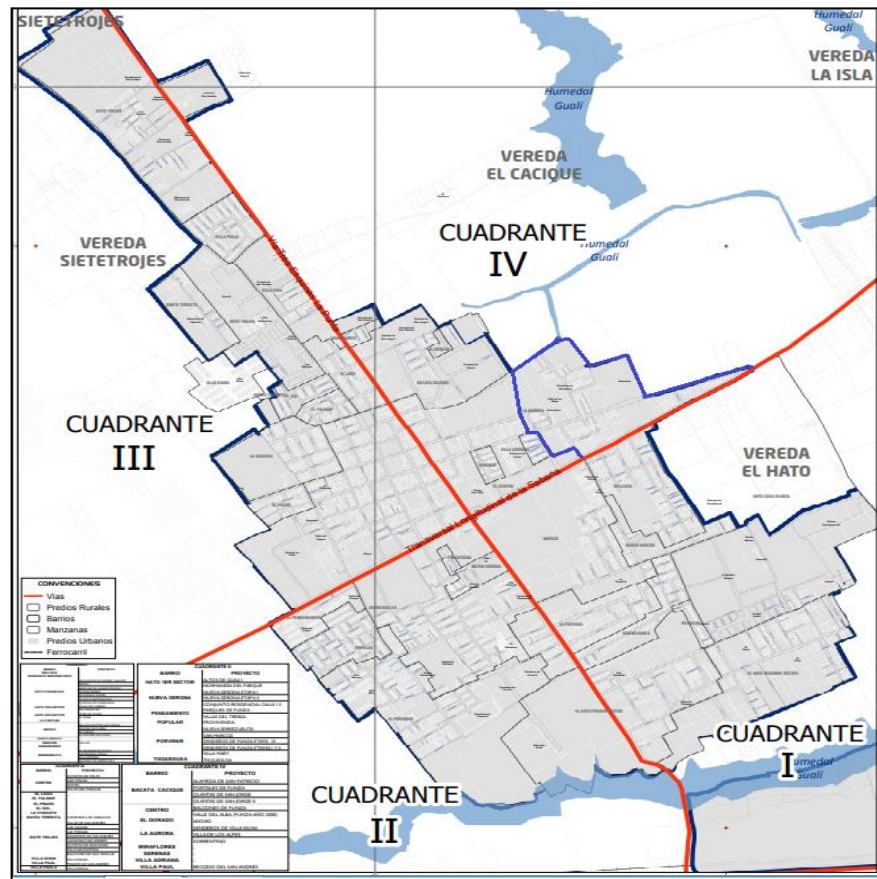
Las principales actividades que desarrolla en función de su gestión en acueducto, están: captación del recurso hídrico, tratamiento, distribución y comercialización del producto (agua potable). En la prestación del servicio de alcantarillado, ejecuta la colección de aguas residuales y lluvias, y tratamiento de las aguas residuales en el Municipio de Funza. En cuanto a Aseo, recoge los residuos domésticos, barre las calles y áreas públicas, realiza el mantenimiento de prados de las áreas públicas y transporta los residuos sólidos al Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo en donde hace la disposición final [3].

1.1.1 GEOGRAFÍA

El municipio de Funza está ubicado en la provincia de sabana de Occidente a 15 Km de la ciudad de Bogotá. Limita al norte con Madrid y Tenjo, al Oriente con Cota y Bogotá, al Sur con Mosquera y al Occidente con Madrid. Tiene una extensión urbana de 4 km² y una extensión rural de 66 km², para un total de 70 kms². Su altura sobre el nivel del mar es de 2.548 m, y su altitud de 4° 43'. La superficie del municipio es plana, presentando las características típicas de las altiplanicies cundinamarqueses con pendientes hasta del 3%; sus suelos, se caracterizan por su relieve plano con pendiente entre 0.1% moderadamente profundo, bien drenados y con una fertilidad moderada, originados a partir de ceniza volcánica. A menudo a partir de los 40 a 50 cm. de profundidad aparecen saturados con agua, o por lo menos húmedos aún en periodos seco [4].

A continuación, se presenta un mapa del Municipio donde se señala el área donde se ubica la PTAR en color morado.

Imagen 1. Municipio de Funza y ubicación espacial de la PTAR



Fuente. Alcaldía Municipal

1.1.2 HIDROGRAFÍA:

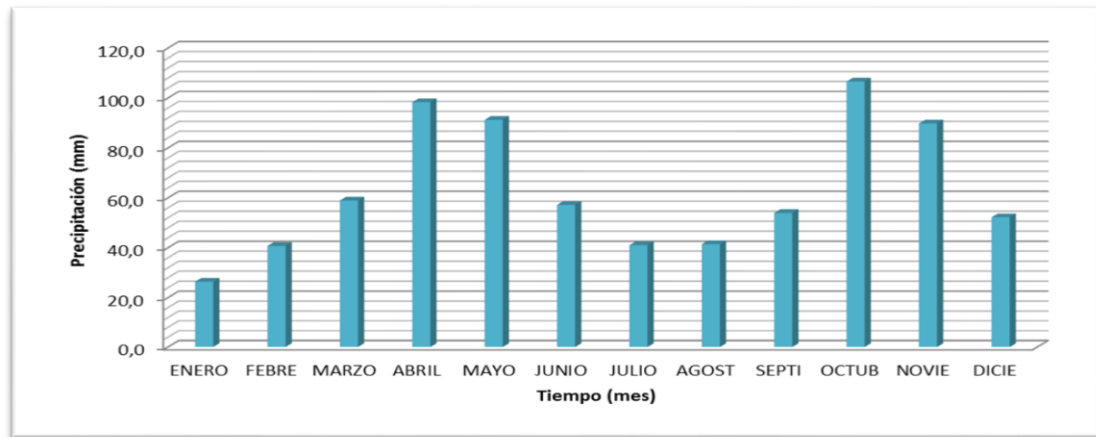
La fuente principal de abastecimiento de agua superficial del municipio, son los ecosistemas de los humedales, los cuales abarcan un área de 186.4 hectáreas del total del área del Municipio, representando el 2.7% de la superficie total. Otra fuente importante es el distrito de riego La Ramada, el cual riega y drena terrenos dedicados a la agricultura y a la ganadería, permitiendo el desarrollo agropecuario en zonas de alto potencial para la producción. Y también se cuenta con un gran porcentaje de agua subterránea, que abastecen la zona rural con más de 200 pozos en uso [4].

1.1.3 PRECIPITACIÓN.

Según los datos recopilados por la Corporación Autónoma de Cundinamarca (CAR) de la estación climatológica principal la Ramada para los años comprendidos entre los años 1938 a 2018 de precipitación total se establece el

comportamiento de dicho parámetro en el municipio de Funza Cundinamarca como se observa en la figura a continuación [5].

Gráfica 1. Hietograma de precipitación media mensual multianual (1938-2018).
Estación Climatológica La Ramada Funza



Fuente:[5]

Se presentan periodos de alta precipitación en los meses de abril, mayo, octubre y noviembre, y lluvias en general por debajo del promedio los demás meses del año. La precipitación anual multianual presenta una media de 757.7 mm, teniendo un máximo el mes de octubre con 106.6 mm y un mínimo en el mes de enero con 26.4 mm de precipitación.

1.1.4 POBLACIÓN

En el censo poblacional realizado por el DANE para el año 2018, se establece una población total para el municipio de Funza de 93.154 habitantes, de los cuales 90.671 corresponden al área urbana y 2.483 al área rural del municipio [6][7]. Sin embargo, debido al alto índice de crecimiento demográfico que ha presentado el municipio y situaciones migratorias debidas a acontecimientos socioeconómicos, se estima que la población real sea aún mayor.

1.1.5 ALCANTARILLADO

El municipio de Funza cuenta con un sistema parcialmente separado de alcantarillado sanitario y pluvial con excepción de los barrios Samarkanda, Fortuna y Hato Sector I, en los que sólo se tiene sistema sanitario, el cual funciona como combinado por la falta de una red pluvial.

La red tiene una cobertura del 75.73 % del total del municipio, en donde cerca del 91% del área urbana lleva las aguas residuales a la PTAR, y el porcentaje restante

drena directamente sus aguas residuales a los humedales Gualí y Tres Esquinas o a vallados del sistema de riego Chicú-La Ramada [8].

1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA Y ESTRUCTURAS DE TRATAMIENTO DE LA PTAR DE FUNZA

La PTAR fue diseñada en 1993 por la firma consultora Estudios Técnicos S.A. y construida en el año de 1997. Originalmente estaba conformada por una estación de bombeo provista a su vez de una rejilla gruesa y una canasta de cribado grueso, seis unidades de micro tamizado, un desarenador y una cámara de distribución de flujo como unidades de tratamiento preliminar y un sedimentador como tratamiento secundario tres zanjones de oxidación con una capacidad de 20,736 m³d⁻¹. Entre 2005 y 2010 la CAR llevó a cabo modificaciones a los procesos de aireación, sedimentación y manejo de lodos, realizados por la empresa Essere–G. Ayala y con la firma ILAM S.A., respectivamente. En el año 2012, la CAR recibió los diseños de ampliación y modificaciones para la transformación de dos zanjones de oxidación a reactores SBR y es la configuración actual con la que cuenta la PTAR. Según las caracterizaciones fisicoquímicas de las concentraciones de entrada a la planta para ese momento la PTAR se dimensionó a partir de las concentraciones de diseño que se muestran en la tabla a continuación [2]:

Tabla 1. Parámetros Fisicoquímicos de Diseño PTAR del Municipio Funza - Cundinamarca

PARÁMETRO	[]
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)	300 mg/L
Sólidos suspendidos totales (SST)	300 mg/L
Demanda Química de oxígeno (DQO)	600 mg/L
Nitrógeno afluente (NTK)	30 mg/L

Fuente. [2]

Desde el año 2012, año en el cual se inicia la fase de ampliación y optimización de la PTAR hacia la tecnología SBR con la cual opera en la actualidad fue tramitado un permiso de vertimiento ante la autoridad ambiental debido a que el cuerpo de agua receptor es un cuerpo lenticó y se deben tener en cuenta otras características diferentes a los cuerpos lóticos como se establece en el acuerdo 043 de 2006 “Por el cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020” [9]. Este permiso fue aprobado solo hasta el año 2018 a través de la Resolución 0736 del mismo año por la

Corporación Autónoma Regional – CAR [10]. Por tanto, previo a su aprobación la norma que regía para la PTAR era la norma nacional de vertimientos Resolución 0631 de 2015 en la cual se establecen los límites máximos permisibles para vertimientos a cuerpos de agua superficial dependiendo de su actividad productiva [11]. Para el caso de la PTAR de Funza los límites aplicables se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2. Valores máximos permisibles para Aguas Residuales Domésticas y aguas residuales no domésticas -de los prestadores del servicio público de alcantarillado, con una carga mayor a 625 kg/día y menor l a 3000 kg/día DBO5

Parámetro	Unidades	Valor
PH	Unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda química de oxígeno DQO	mg/L O _{2r}	180
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	mg/L O ₂	90
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	90
Sólidos Sedimentables (SSED)	ml/L	5
Grasas y Aceites	mg/L	20

Fuente: [11]

Sin embargo, con la entrada en vigencia del permiso de vertimientos en el año 2018 las concentraciones que debe cumplir el efluente tratado son mucho más estrictas como se observa en la tabla a continuación.

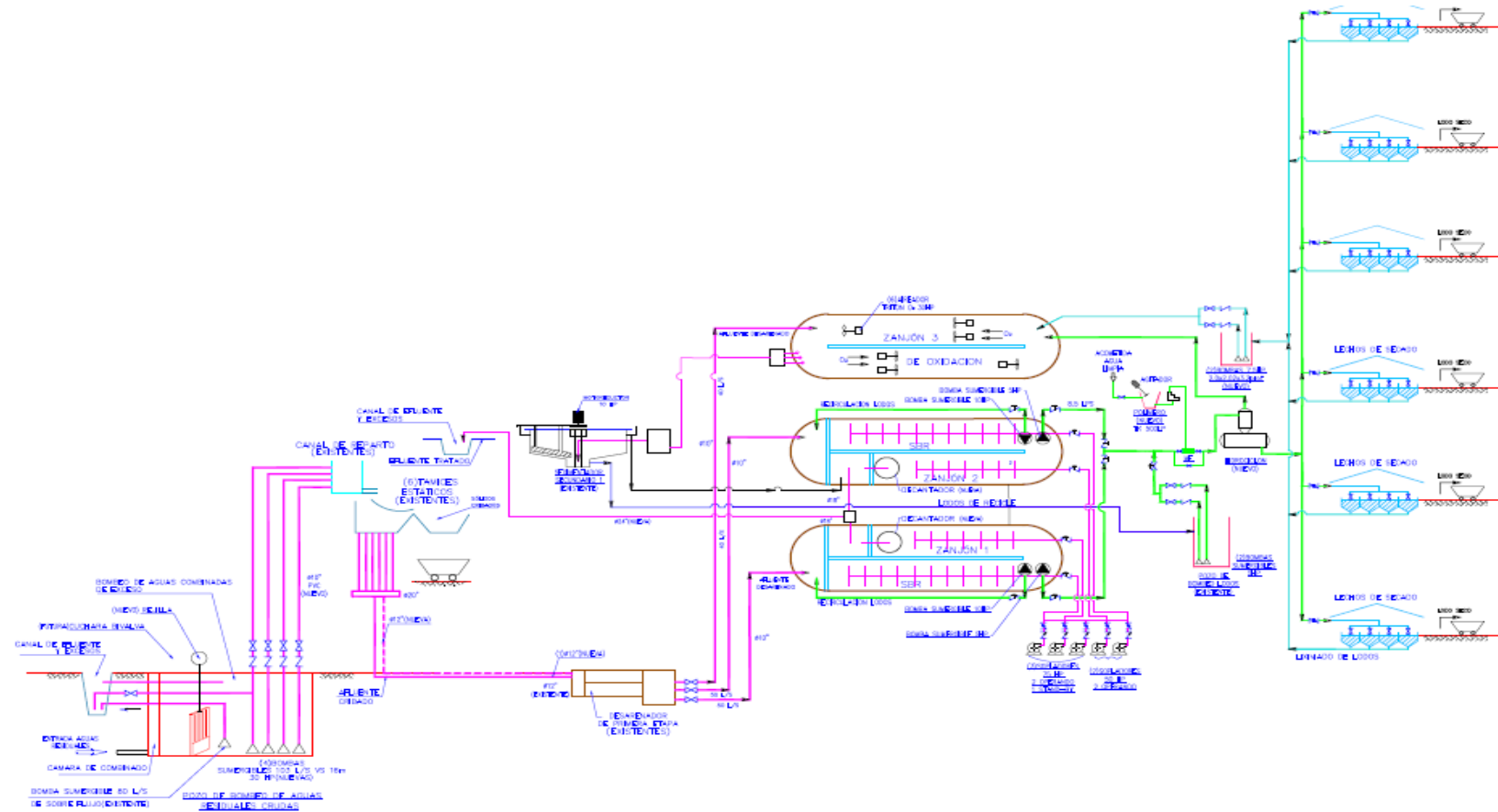
Tabla 3. Valores máximos según Resolución CAR 0736 de 2018.

Parámetro	Unidades	Valor
PH	Unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda química de oxígeno DQO	mg/L O ₂	150
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	mg/L O ₂	36
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	36
Sólidos Sedimentables (SSED)	ml/L	5
Grasas y Aceites	mg/L	10

Fuente:[10].

Para dar cumplimiento a esta normativa la PTAR cuenta con el tres de tratamiento que se describe a continuación:

Figura 1. Diagrama de Proceso PTAR Funza Cundinamarca



Fuente. [12]

A continuación, se describe brevemente cada una de las unidades que constituyen la PTAR a lo largo de todo el tren de tratamiento.

Imagen 2. Visita aérea PTAR Municipio de Funza



Fuente. [12]

1.2.1 TRATAMIENTO PRELIMINAR:

Consta de una canasta de cribado en fibra de vidrio con refuerzos en lámina de acero inoxidable, que tiene como función retener los sólidos gruesos mayores de 2 cm presentes en el agua, los cuales posteriormente son retirados manualmente. La canasta cuenta con un mecanismo de guías, para poder ser extraída fácilmente del fondo del tanque de homogenización la cual está ubicada a 8 metros de profundidad. Así mismo cuenta con una rejilla auxiliar o perejilla que se usa cuando se realiza la limpieza de la canasta de cribado principal.

Imagen 3. Canastilla de Cribado Grueso



Fuente. Autor

Imagen 4. Ubicación Canastilla de Cribado Grueso



Fuente. Autor

Imagen 5. Sistema de guías Canastilla de Cribado Grueso



Fuente. Autor

1.2.2 ESTACIÓN DE BOMBEO INICIAL Y TANQUE DE HOMOGENIZACIÓN

Consta de un tanque rectangular con capacidad de 240 L/s, cuya función es la de minimizar las fluctuaciones en las características del agua tales como pH, caudal y temperatura con el fin de proveer las condiciones óptimas para los tratamientos posteriores. La estación de bombeo cuenta con cuatro (4) bombas sumergibles de ingreso al sistema de tratamiento cada una 80 L/s y con un caudal pico de 101 L/s. Debido al caudal de diseño la planta opera con una única bomba de ingreso al sistema y se alterna con las tres restantes en caso de mantenimiento, falla o

taponamiento. Además de esto, cuenta con tres (3) bombas de emergencia cuyas capacidades son de 80, 120, y 450 L/s respectivamente, las cuales tienen salida directa al canal del humedal Gualí que funcionan en caso de que el caudal de ingreso a la planta sea mayor al caudal de diseño, lo cual ocurre en situaciones de tormentas o fuertes precipitaciones. Sumado a estas situaciones las bombas de emergencia pueden entrar a operar en caso de mantenimiento a la red de alcantarillado donde los niveles de esta deben ser mínimos o en caso que el ingreso de agua al tanque sobrepase su capacidad.

Este tanque de homogenización cuenta además con sistema de rejilla adicional que separan el tanque en dos y que tienen como objetivo evitar que los sólidos que logran ingresar al tanque por efectos de la presión que ejerce el caudal de entrada sobre las rejillas de cribado lleguen al sistema de bombeo y generen daños en las bombas.

Imagen 6. Estación de Bombeo PTAR Funza Cundinamarca



Fuente Autor

Imagen 7. Compuerta de entrada de agua residual al Tanque de Homogenización



Fuente. Autor

Imagen 8. Tanque de bombeo



Fuente: Autor

Cribado Fino: este proceso se realiza a través de seis (6) tamices estáticos con capacidad para 66 L/s, los cuales consisten de una malla de alambre de perfil curvo cóncavo montada en un marco con aberturas de pantalla perpendiculares al flujo. El agua que es bombeada del tanque de homogenización, ingresa por tubería a un tanque ubicado en la parte posterior de los tamices estáticos, de ahí es distribuida a las seis unidades. El agua ingresa a un cajón colector donde por rebose fluye el agua a través del tamiz y por gravedad se desliza por la superficie filtrante. El agua filtrada pasa a un colector de salida donde por tubería es conducida hacia la siguiente etapa de tratamiento, mientras que los sólidos retenidos caen a contenedor donde posteriormente son retirados por el operador de planta.

Imagen 9. Tamices estáticos



Fuente. Autor

Imagen 10. Tanque de distribución Tamices Estáticos



Fuente. Autor

Imagen 11. Rejillas de cribado fino para partículas mayores a 3 mm y cajón de recolección de sólidos



Fuente. Autor

1.2.3 DESARENADO:

Una vez culminado el cribado fino el agua es conducida por tubería al desarenador. La planta cuenta con un desarenador gravitacional con dos canales rectangulares de 1.0m de ancho, 8.0m de longitud y altura total de 1.20m, de los cuales los primeros 0.30m son para depósito de arenas, 0.60m para la decantación y 0.30m de borde libre con un tiempo de retención hidráulica de 77,5 segundos y un caudal de diseño de 120 L/s. En la parte inferior el desarenador cuenta con un sifón que se encarga de evacuar las arenas sedimentadas y conducir las a un tanque de arenas para su posterior deshidratación y disposición final.

Imagen 12. División de caudal y vertedero de excesos desarenador



Fuente. Autor

Imagen 13. Desarenador de canal doble PTAR Municipio de Funza



Fuente. Autor

1.2.4 TRATAMIENTO SECUNDARIO:

El tratamiento biológico o secundario consta de dos reactores biológicos secuenciales (SBR's). Este, es un sistema de lodos activados modificado donde en un solo espacio (reactor) tienen lugar diferentes etapas de tratamiento como lo son: Llenado, Aeración, Sedimentación, y Decantación. Sin embargo, el sistema instalado en la planta no es del todo un sistema SBR debido a que la entrada de agua es continua. Cada reactor tiene una capacidad de diseño de 50 L/s y cuenta con un sistema de aireación sumergido compuesto por 280 difusores tubulares de

burbuja gruesa y 800 difusores circulares de burbuja fina distribuidos a lo largo del cada reactor y un sensor de Oxígeno Disuelto (OD) que permite controlar la concentración de OD dentro del reactor en la etapa de aireación. Cada reactor cuenta con un sistema de evacuación de agua tratada llamado decanter con capacidad de 300 L/s cada uno.

Imagen 14. Sistema SBR, Reactor N° 1 y N° 2.



Fuente. Autor

Imagen 15. Zona de Reacción Sistema SBR



Fuente: Autor

Existe también un sistema de lodos activado convencional conformado por un zanjón de oxidación con capacidad de para tratar 40 L/s, en el cual hay instalados 8 aireadores superficiales tipo tritón. El agua pasa por reboce y gravedad a un sedimentador secundario tipo barre lodos y finalmente es vertida al Humedal Gualí.

Imagen 16. Zanjón de Oxidación Sistema de Lodos Convencional



Fuente: Autor

Imagen 17. Zanjón de Oxidación Sistema de Lodos Convencional



Fuente: Autor

1.2.5 TRATAMIENTO DE LODOS:

El lodo de exceso es bombeado a un tanque de almacenamiento de lodos, de allí es conducido a un hidrociclón, donde el agua es separada del lodo y se realiza la adición de un polímero catiónico que se encarga de coagular y acelerar el proceso de secado. Finalmente, el lodo es transportado por tubería hacia los lechos de secado donde son deshidratados. Los lixiviados generados en el proceso de deshidratación son recirculados al sistema de tratamiento secundario para ser tratados.

Imagen 18. Sistema de espesamiento de Lodo por Hidrociclón



Fuente: Autor

Imagen 19. Lechos de secado de lodos



Fuente Autor

1.2.6 SALIDA EFLUENTE TRATADO:

El agua tratada es conducida por tubería hacia un canal de salida, que comunica a la PTAR con el humedal Gualí, donde son vertidas finalmente las aguas luego de su proceso de tratamiento.

Imagen 20. Tubería de Salida Sistema SBR



Fuente: Autor

Imagen 21. Canal de Salida Sistema Convencional



Fuente: Autor

1.3 MARCO CONCEPTUAL

1.3.1 AGUA RESIDUAL

Las aguas residuales se pueden definir como las aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que contienen impurezas añadidas a través del uso antrópico. Estas impurezas pueden ser constituyentes de humanos, desechos metabólicos animales y residuos de la cocina, limpieza, baños e industrias [13][14].

Clasificación de las aguas residuales

1.3.2 Agua residual domestica:

Aquella procedente de zonas residenciales o instalaciones comerciales, públicas y similares [15][16].

1.3.3 Agua residual Industrial:

En la cual predominan vertidos de procesos industriales. Sus características dependen del tipo de proceso industrial [15][16].

1.3.4 Organismos anaerobios:

Son aquellos que no necesitan oxígeno disuelto o nitrato (NO_3) de oxígeno para sobrevivir [17].

1.3.5 Organismos aerobios:

Que deben tener oxígeno disuelto para sobrevivir [17].

1.3.6 Organismos facultativos:

Aquellos que pueden existir con o sin oxígeno disuelto [17].

1.3.7 Organismos heterótrofos:

Aquellos que consumen productos orgánicos en las aguas residuales [17].

1.3.8 Organismos autótrofos:

Aquellos que pueden usar compuestos inorgánicos como una fuente de comida [17].

1.4 MARCO TEORICO

1.4.1 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN COLOMBIA

1.4.1.1 POR TIPO DE PROCESO

PROCESOS FÍSICOS:

Remoción de Material en suspensión a través de estructuras como rejillas, trituradores, sedimentador primario, espesadores y filtración [18].

PROCESOS QUÍMICOS:

Aplicación de productos químicos para la eliminación o conversión de los contaminantes. Un ejemplo de estos son la adsorción y desinfección [18].

PROCESOS BIOLÓGICOS:

Se llevan a cabo gracias a la actividad biológica de los microorganismos. Por medio de estos procesos se eliminan sustancias orgánicas biodegradables, Nitrógeno, Fosforo y hay producción de gases [18].

1.4.1.2 POR GRADO DE TRATAMIENTO

TRATAMIENTO PRELIMINAR:

Este comprende una serie de operaciones físicas y mecánicas, que tienen por objetivo separar del agua residual la mayor cantidad posible de materias, que, por

su naturaleza o tamaño, pueden dar lugar a problemas en las etapas posteriores del tratamiento, por lo general suelen ser sólidos gruesos y arenas [18]–[20].

TRATAMIENTO PRIMARIO:

Es el tratamiento del agua residual proveniente del tratamiento preliminar mediante un proceso físico o fisicoquímico que incluya la sedimentación de sólidos en suspensión, u otros procesos en los que la DBO₅ de las aguas residuales que entren, se reduzca, y el total de sólidos en suspensión en las aguas residuales de entrada también lo se vean reducidos [18]–[20].

TRATAMIENTO SECUNDARIO:

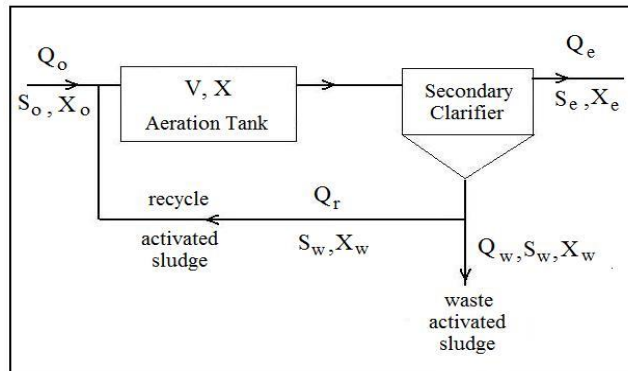
El principal objetivo del tratamiento secundario es la eliminación de la materia orgánica. La materia orgánica puede estar presente en las siguientes formas en agua que ingresa a este tratamiento: Grupo orgánico disuelto (DBO soluble o filtrada), que no se elimina mediante operaciones físicas como la sedimentación; materia orgánica en suspensión (DBO en suspensión o en partículas), que cuyos sólidos con una capacidad de sedimentación más lenta (sólidos finos) permanecen en la masa líquida [19]–[21].

1.4.2 SISTEMAS BIOLÓGICOS AIREADOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

1.4.2.1 LODOS ACTIVADOS

Este proceso se desarrolló en Inglaterra en 1914 por Ardern y Lockett [15]. Consiste en un proceso de tratamiento biológico de aguas residuales en ambiente químico aerobio, donde las aguas residuales son aireadas en un tanque que contiene una alta concentración de microorganismos degradadores, esta alta concentración de microorganismos se logra con un sedimentador que retiene los flóculos biológicos y los retorna al tanque aireado [18]. La degradación de la materia orgánica se produce ya que los diferentes tipos de microorganismos usan esta como fuente de alimento. Es un proceso de crecimiento suspendido, debido a que los organismos se suspenden en las aguas residuales en lugar de unirse a un medio como en el filtro percolador o en procesos rotativos de contactores biológicos [17]. La configuración básica de este tipo de procesos, consta de un de un reactor donde se mantiene en suspensión un cultivo microbiano capaz de asimilar la materia orgánica presente. A continuación, se presenta la configuración general de este tipo de sistemas.

Figura 2. . Diagrama Proceso de Lodos Activados



Fuente: [15]

El proceso del lodo activado se basa en el cultivo de una población de millones de microorganismos de muchos tipos diferentes, en su mayoría aerobios y bacterias heterótrofas facultativas suspendidas en las aguas residuales, a su paso por un reactor (tanque de aireación) [17].

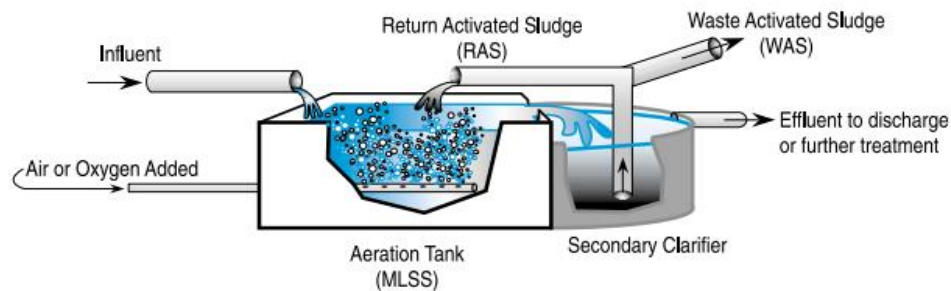
Es importante mencionar algunos conceptos básicos acerca del tipo de microorganismos que intervienen en el proceso de tratamiento con lodos activados.

1.4.2.2 PROCESO BÁSICO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON LODO ACTIVADO

El proceso básico de lodo activado consta de varios componentes interrelacionados. Un tanque de aireación donde las reacciones biológicas ocurren, seguidas de una fuente de aireación que proporciona oxígeno y mezcla. Un tanque clarificador, donde los sólidos se sedimentan y se separan de las aguas residuales tratadas. Un medio para recolectar los sólidos, ya sea para devolverlos al tanque de aireación (recircular el lodo activado) o para eliminarlos del proceso (residuos de lodo activado). Las bacterias aerobias prosperan a medida que viajan a través del tanque de aireación y se multiplican rápidamente con suficiente alimento y oxígeno. De esta manera cuando los desechos llegan al final del tanque (entre cuatro y ocho horas), las bacterias han utilizado la mayor parte de la materia orgánica para producir nuevas células. Los lodos se asientan en el fondo del tanque clarificador, separándose del agua más clara. Este lodo se bombea de vuelta al tanque de aireación donde se mezcla con las aguas residuales entrantes o es eliminado del sistema como exceso. El líquido relativamente claro sobre el lodo o sobrenadante, se envía para un tratamiento adicional según sea necesario [22].

Como se observa en la Figura 3 el afluente ingresa inicialmente al tanque de aireación donde es oxigenado y homogenizado. Es allí donde los microorganismos aerobios utilizan la materia orgánica presente en el agua para reproducirse, generando así su degradación. En este proceso los microorganismos se unen entre sí para formar pequeñas partículas flotantes conocidas como floc. Una vez cumplido en tiempo de aireación el agua pasa posteriormente al clarificador secundario donde el floc se sedimenta y el agua clarificada es descargada o enviada a un tratamiento terciario para su desinfección. Una porción del lodo sedimentado es recirculado nuevamente al tanque de aireación para mantener un volumen constante del mismo y garantizar una buena degradación de la materia orgánica mientras que el lodo de exceso es removido para su posterior deshidratación [17].

Figura 3. Proceso Típico de Lodos Activados

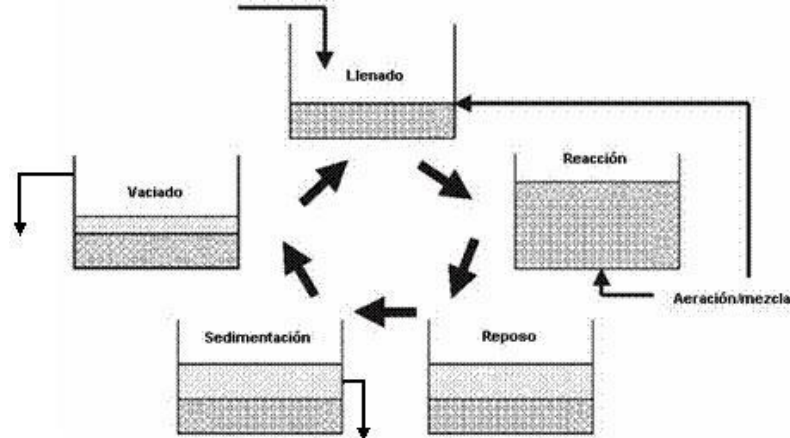


Fuente: [17]

1.4.2.3 BIORREACTORES SECUENCIALES DISCONTINUOS (SBR)

El reactor discontinuo secuencial (SBR) es un sistema de lodos activados por llenado y vaciado para el tratamiento de aguas residuales. En este sistema, el agua ingresa a un único reactor "discontinuo" y se tratan para eliminar los componentes no deseados y luego se descargan. El llenado, la aireación y la clarificación pueden ser todas logradas usando un solo reactor discontinuo [23]. Los procesos unitarios que intervienen son similares a los de un proceso convencional de lodos activados, en ambos sistemas intervienen la mezcla, reacción y sedimentación. Sin embargo existe una diferencia importante entre estos dos procesos, en el caso de los lodos activados convencionales, los procesos se llevan a cabo simultáneamente en tanques separados, mientras que en un sistema SBR los procesos tienen lugar en el mismo tanque [24]

Figura 4. Etapas del Sistema SBR



Fuente: [24]

1.4.2.4 BIORREACTORES SECUENCIALES DE FLUJO CONTINUO (SBRFC)

En esta versión modificada del SBR, el flujo entra en cada reactor de manera continua. El afluente fluye a la cámara de entrada, que tiene entradas al tanque de reacción en el fondo del tanque para controlar la velocidad de entrada para no agitar los sólidos sedimentados. Los sistemas de flujo continuo no son verdaderas reacciones discontinuas porque el afluente está constantemente ingresando al reactor. Las configuraciones de diseño de los sistemas SBR, y de flujo continuo son por lo demás, muy similares. Las plantas que operan bajo flujo continuo deben operar de esta manera como un modo de operación estándar. Idealmente, un SBR de reacción por lotes real debería operar bajo flujo continuo solo en situaciones de emergencia. Se ha demostrado que las plantas que han sido diseñadas como sistemas de entrada continua tienen malas condiciones operativas durante los flujos máximos. Algunos de los principales problemas de los sistemas de flujo continuo han sido desbordamientos y efluentes deficientes [23].

1.5 MARCO NORMATIVO

Las normas nacionales y locales aplicables a los sistemas de tratamiento de aguas residuales son:

- Constitución Política de Colombia, la cual establece el deber del estado de asegurar la prestación eficiente de los servicios públicos domiciliarios a todos los habitantes del territorio nacional, y mediante los artículos 356 y 357, se crea el Sistema General de Participaciones de los Departamentos, Distritos y Municipios, con el fin de atender los servicios a cargo de estas

entidades y proveer los recursos para financiar adecuadamente su prestación.

- Ley 142 de 1994, Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y regula el sistema de saneamiento básico en Colombia, determinando la obligatoriedad de los municipios de asegurar la prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo conforme a las reglas de competencia que trata esta norma.
- Plan Regional de Inversiones en Ambiente y Salud, Análisis del sector de agua potable y saneamiento en Colombia, cuyos objetivos principales de éste sector están encaminados a contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de la población colombiana, mediante: 1). La prestación eficiente y óptima de los servicios de agua potable y saneamiento básico que coadyuve a reducir la morbilidad y mortalidad originadas por enfermedades producidas por consumo de agua no apta y por la contaminación de excretas y 2). La extensión de coberturas y ampliación de la infraestructura física como factor indispensable para el desarrollo urbano, el crecimiento económico, la reducción de la pobreza y el desarrollo ambientalmente sostenible.
- La Resolución 0330 de 2017 expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio La Resolución reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de diseño construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo.
- Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS2000, fija los requisitos técnicos que deben cumplir los diseños, las obras y procedimientos correspondientes al Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico y sus actividades complementarias, así como la supervisión técnica, interventoría, operación y mantenimiento propios de estos sistemas.
- Decreto 1594/84. “Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la ley 09 de 1979, así como el capítulo II del Título VI - Parte III – Libro II y el Título III de la parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto usos del agua y residuos líquidos”.
- Decreto 3930 de octubre 25 de 2000. “por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI-Parte III del Decreto-Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua residual líquidos y se dictan otras disposiciones”.

- Decreto 4728 del 2010. “Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 del 2010”.
- Acuerdo No. 43 del 2006. “Por medio el cual se establece los objetivos de calidad del agua para la cuenca del Rio Bogotá a lograr en el año 2020”.
- Acuerdo 040 de 2009 CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA, CAR, “por el cual se establece las metas de reducción de cargas contaminantes de DBO y SST arrojadas a los cuerpos de agua que conforman la cuenca, tratamos y subtramos del Rio Bogotá, y se adoptan otras disposiciones”
- CONPES 3320 de 2004. “por medio del cual se define la estrategia ambiental para el manejo del Rio Bogotá”. • Ley 388 de 1997. “la ley orgánica de ordenamiento territorial, como instrumento para la integración del ordenamiento territorial y ambiental”.
- Resolución 0631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.
- Resolución CAR 0736 de 2018 por el cual se otorga el permiso de vertimientos a la PTAR del municipio de Funza Cundinamarca y se toman otras determinaciones.

2 DESARROLLO DE LA PASANTÍA Y APLICACIÓN DE HABILIDADES

Mediante la postulación al programa de prácticas laborales en el sector público del Ministerio de Trabajo y el Viceministerio de Empleo y Pensiones, y realizando el correspondiente proceso de selección establecido por los entes regulatorios anteriormente mencionados, en donde se evalúan los conocimientos académicos para el área de desarrollo de la práctica y el desempeño del mismo dentro del ámbito laboral, se logra acceder a las prácticas laborales en la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo del Municipio de Funza Cundinamarca- EMAAF E.SP. en el área de análisis, control y seguimiento al proceso de Potabilización y Tratamiento del agua residual municipal durante un periodo de cinco (5) meses, y a través del cual se desarrolla el presente proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Ambiental.

Una vez culminadas las prácticas laborales en dicha entidad pública se consigue realizar la incorporación laboral en la empresa DAPHNIA LTA, especializada en el muestreo ambiental, estudios ambientales, pruebas de laboratorio y la interpretación de la información relacionada con la calidad del medio ambiente, realizando análisis de calidad en las matrices de agua cruda, agua potable y agua residual por un periodo de ocho (8) meses. Finalizado este periodo la empresa EMAAF E.SP. solicita nuevamente los servicios prestados durante las prácticas profesionales, esta vez en condición de trabajador oficial de la entidad, por tanto se culmina el contrato con la empresa DAPHNIA LTA y se realiza la incorporación laboral en la empresa EMAAF E.SP. para realizar nuevamente el análisis, control y seguimiento al proceso de tratamiento del agua residual municipal. Esta labor se realizó durante nueve (9) meses, sin embargo, debido a procesos internos de la empresa se solicita se realice la supervisión de la PTAR del Municipio, función que se realiza hasta la actualidad.

3 DISEÑO METODOLÓGICO

El diseño metodológico con el cual se llevó a cabo el proyecto es un diseño no experimental, debido a que se recopilaron datos de variables sin ser modificadas. Para el caso de estudio se recopilaron datos de concentraciones de parámetros de calidad de agua en diferentes puntos del tren de tratamiento, y datos teóricos y visuales de las estructuras de tratamiento. A su vez es de tipo transversal ya que la recopilación de los datos se realizó en un único período de tiempo, que en este caso es un periodo de cuatro meses y su enfoque es de tipo correlacional-causal en cuanto a que el proyecto busca encontrar la relación de las variables independientes (datos de concentraciones obtenidos por métodos analíticos de laboratorio y datos teóricos y visuales de las estructuras de tratamiento), con la variable dependiente (capacidad de remoción de contaminantes de la PTAR) y establecer su causa.

Se realizó la medición y recolección de datos de los siguientes parámetros dentro del proceso de tratamiento de las aguas residuales del municipio de Funza: DBO5, DQO, OD, SSE, SST, Caudal, Grasas y aceites.

3.1 RUTA METODOLÓGICA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

Diagnóstico de la PTAR a través del levantamiento de información visual y documental de la misma y por medio de la caracterización fisicoquímica de los determinantes de calidad del agua DBO, DQO, OD, SSE, SST, Caudal, Grasas y aceites en diferentes momentos y puntos del sistema de tratamiento a lo largo de un periodo de tiempo de 4 meses.

Evaluación de la capacidad de remoción de los procesos de tratamiento y determinación de los puntos críticos del tren de tratamiento.

Paralelo entre los datos obtenidos a través de ensayos de laboratorio con la normativa vigente aplicable al caso de estudio (Resolución CAR 0736 de 2018) para la definición del grado de cumplimiento de la misma [10].

Caracterización de la actividad industrial en la zona de influencia del proyecto que intervenga en la calidad del afluente de la PTAR y por ende altere las condiciones de tratamiento.

Diagnóstico de la red de alcantarillado del municipio.

Establecimiento de malas prácticas en la operación de las unidades de tratamiento que incidan en el rendimiento del mismo.

Propuesta y pre-dimensionamiento de medidas tecnológicas de mejoramiento (estructuras hidráulicas de tratamiento) en los procesos con puntos críticos evidenciados basadas en las especificaciones del nuevo Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2017) [25], y literatura especializada en el diseño de este tipo de tecnologías.

Elaboración de un plan de buenas prácticas de operación que permita mantener las condiciones de tratamiento de diseño de la planta conjunto con el pre-dimensionamiento de las estructuras de tratamiento.

3.2 HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS.

Los métodos utilizados para llevar a cabo la caracterización de los determinantes de calidad del agua en el sistema de tratamiento de la PTAR serán los estipulados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) para los parámetros ya mencionados, el cual usa como referencia el “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”, en el que se describen los métodos analíticos estandarizados y validados por el Comité de Métodos Estándar de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) [26].

3.2.1 DETERMINACIÓN DE GRASAS Y ACEITES.

Se hará por el método soxhlet; ésta es una técnica de separación sólido-líquido usada para la determinación del contenido graso en muestras de diferente naturaleza. Los aceites y las grasas sólidas presentes se separan de la muestra líquida por filtración sobre una matriz sólida absorbente (filtro cualitativo). Después de la extracción en un aparato soxhlet con solvente orgánico, se pesa el residuo que queda de la evaporación del solvente para determinar el contenido en grasa y aceite [26], [27].

3.2.2 DETERMINACIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

Se hará por el método gravimétrico, este método gravimétrico que se basa en la retención de las partículas sólidas en un filtro de fibra de vidrio a través del cual se hace pasar una muestra homogénea; el residuo que queda retenido se seca a 103-105°C. El incremento en el peso del filtro representa la cantidad de sólidos suspendidos totales [26], [28]

3.2.3 DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO POR EL MÉTODO DE INCUBACIÓN Y ELECTROMETRÍA.

Es un método electrométrico, en el que se determina el oxígeno disuelto consumido en sus procesos metabólicos por los microorganismos en la degradación de la materia orgánica incubando la muestra en la oscuridad a $20 \pm$

3°C, por cinco días. Para esto se utiliza una cepa de microorganismos, los cuales se encargarán de transformar la materia orgánica en CO₂ Y H₂O. Debe garantizarse una concentración suficiente de Oxígeno Disuelto, así como de nutrientes necesarios para el desarrollo bacteriano. Para esto se adiciona a la muestra soluciones tampón de fosfatos, sulfato de magnesio, cloruro de calcio y cloruro de hierro [26], [29].

3.2.4 DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO POR REFLUJO CERRADO Y VOLUMETRÍA.

Las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en la muestra, se oxidan mediante reflujo cerrado en solución fuertemente ácida (H₂SO₄) con un exceso de dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) en presencia de sulfato de plata (Ag₂SO₄) que actúa como agente catalizador, y de sulfato mercurico (HgSO₄) adicionado para eliminar la interferencia de los cloruros. Después de la digestión, el K₂Cr₂O₇ remanente se titula con sulfato ferroso amoniacal para determinar la cantidad de K₂Cr₂O₇ consumido. La materia orgánica se calcula en términos de oxígeno equivalente [26], [30].

3.3 POSIBLES MEDIDAS DE MEJORA DE PROCESOS PARA LA PTAR DEL MUNICIPIO DE FUNZA.

Para el dimensionamiento de las posibles medidas es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

3.3.1 PERIODO DE DISEÑO:

De acuerdo con el Artículo 40 de la Resolución 0330 de 2017, por la cual se adopta el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009", se establece que, para todos los componentes de acueducto, alcantarillado y aseo se adoptara un periodo de diseño 25 años [25]. Por tanto, el periodo de diseño para las unidades de mejora que se consideren pertinentes será del periodo comprendido entre los años 2018 a 2043.

3.3.2 PROYECCIÓN DE POBLACIÓN

Dado que la estimación de la población es uno de los aspectos para la definición del nivel de complejidad, se establece que esa población debe corresponder a la proyectada al final del periodo de diseño, llamado también horizonte de planeación del proyecto

La proyección de población tendrá como base los datos suministrados por el DANE correspondientes a los censos de los años 1938, 1951, 1964, 1973, 1985, 1993, 2005 y 2018. Para esto se utilizaron los métodos geométrico y exponencial según lo especificado en el “Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS - 2000”. A continuación, se presentan las proyecciones de población realizadas [31].

- **Método Geométrico**

Es útil en poblaciones que muestren una importante actividad económica, que genera un apreciable desarrollo y que poseen importantes áreas de expansión las cuales pueden ser dotadas de servicios públicos sin mayores dificultades [31]. La ecuación que se emplea es:

$$P_f = P_{cu} * (1 + r)^{T_f - T_{cu}}$$

Donde r es la tasa de crecimiento anual en forma decimal y las demás variables se definen igual para el método anterior [31]. La tasa de crecimiento anual se calcula de la siguiente manera:

$$r = \left(\frac{P_{uc}}{P_{ci}} \right)^{1/(T_{uc} - T_{ci})} - 1$$

- **Método Exponencial**

La utilización de este método requiere conocer por lo menos tres censos para poder determinar el promedio de la tasa de crecimiento de la población. Se recomienda su aplicación a poblaciones que muestren apreciable desarrollo y poseen abundantes áreas de expansión [31]. La ecuación empleada por este método es la siguiente:

$$P_f = P_{ci} * e^{k * (T_f - T_{ci})}$$

Donde k es la tasa de crecimiento de la población, la cual se calcula como promedio de las tasas calculadas para cada par de censos así [31].:

$$k = \frac{\ln P_{cp} - \ln P_{ca}}{T_{cp} - T_{ca}}$$

Pcp: población del censo posterior
Pca: población del censo anterior
Tcp: año correspondiente a censo posterior
Tca: año correspondiente a censo anterior
Ln: logaritmo natural o neperiano

3.3.3 POBLACIÓN MÁXIMA SOPORTADA PARA EL ÁREA DE EXPANSIÓN PARA EL MUNICIPIO DE FUNZA.

Los parámetros de evaluación y diseño necesarios para las obras de infraestructura contempladas en el presente proyecto, dependen del cálculo de proyección de población a través de los métodos ya descritos. No obstante, se observó que el área poblada y el número de usuarios de los sistemas de acueducto y alcantarillado crecen rápidamente, por este motivo se debe establecer la población de saturación las áreas actuales de expansión del municipio definidas en el PBOT actualmente y en el año en que ocurrirá esta saturación según las proyecciones poblacionales [32], [33].

El cálculo de la población de saturación sigue la siguiente formula:

Población Saturación = Área expansión X Densidad de Viviendas x índice de Ocupación.

Dotación Neta

Con el fin de determinar el consumo del agua doméstica en el municipio se debe determinar la dotación Neta medida en términos de litros/habitantes*día. Para esto la resolución 0330 de 2017 establece un consumo per cápita según la altura de sobre el nivel del mar de la zona del proyecto como se muestra a continuación.

Tabla. Dotación máxima por altura sobre el nivel del mar

Altura promedio sobre el nivel del mar de la zona atendida	Dotación neta Máxima (l/hab*día)
> 2000 m.s.n.m	120
1000 - 2000 m.s.n.	130
< 1000 m..n.m	140

Fuente. [25]

4 RESULTADOS

4.1 DIAGNÓSTICO DE LA PTAR DEL MUNICIPIO DE FUNZA CUNDINAMARCA

4.1.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL AFLUENTE Y AGUA EN PROCESO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DEL MUNICIPIO DE FUNZA CUNDINAMARCA

El monitoreo y caracterización de las aguas residuales domesticas tratadas en la PTAR del municipio de Funza se realizó a través del muestreo y análisis fisicoquímico en seis (6) puntos de la planta, el afluente, agua en proceso de tratamiento y el efluente tratado durante los meses de abril, mayo, junio y julio del año 2019, como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Los puntos de monitoreo durante la ejecución del proyecto

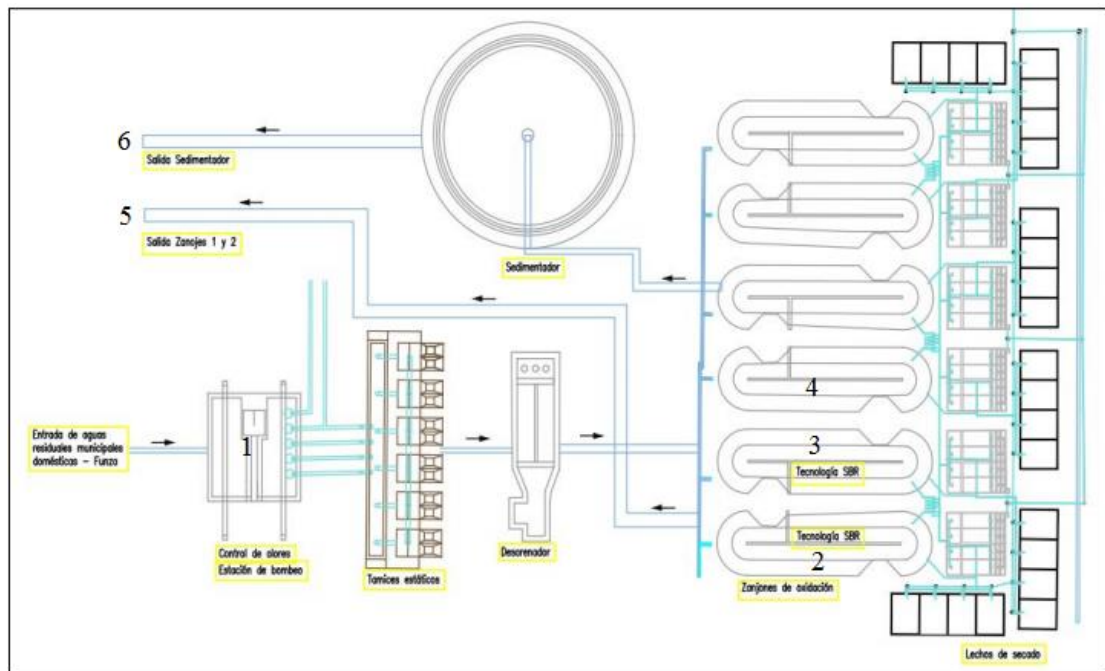
Puntos de Monitoreo PTAR Funza	
Afluente	Tanque de Homogenización
Agua en proceso de tratamiento	Reactores biológicos Secuenciales uno y dos en etapa de aireación
Efluente	Salida del sistema SBR

Fuente Autor

Es importante mencionar que debido a una falla en los rodamientos del sedimentador secundario este sale de operación por tanto también sale de funcionamiento el zanjón de oxidación con aireación extendida. Por esta razón la caracterización fisicoquímica del proyecto se realizó únicamente para el sistema con tecnología SBR debido a que estas unidades de tratamiento no vuelven a entrar en operación durante el resto del año debido a la complejidad del mantenimiento requerido.

En la siguiente imagen se presenta la vista en planta de la PTAR y se ubican espacialmente los puntos de monitoreo establecidos para el desarrollo del proyecto.

Figura 5. Vista en planta de la PTAR donde se resaltan los puntos de monitoreo Caracterizados en 2019



Fuente: EMAAF ESP

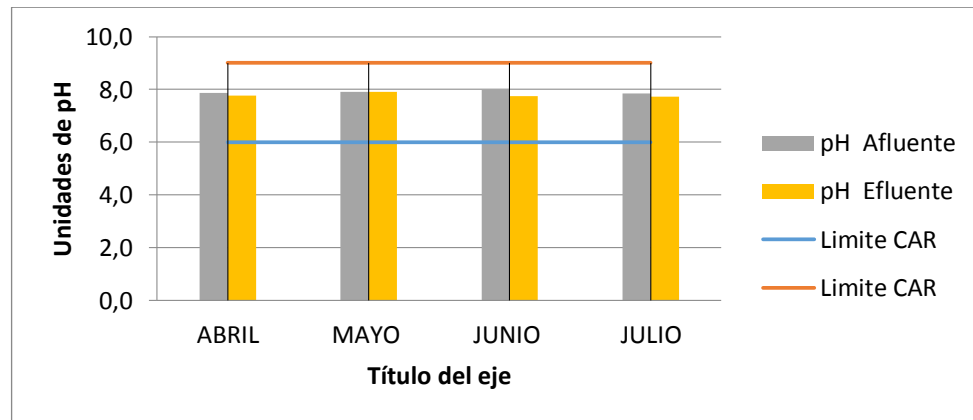
4.1.2 COMPORTAMIENTO MEDIO MENSUAL DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA ANALIZADOS DURANTE EL PERIODO DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO

A continuación, se presenta el análisis y la representación gráfica del comportamiento de los parámetros caracterizados durante los meses de abril, mayo, junio y julio del año 2019.

pH:

Se observa un comportamiento del pH sin mucha variación a lo largo de los cuatro meses de evaluación con una fluctuación que va desde las 7.7 unidades de pH, hasta las 8.0 unidades de pH, es decir se encuentra en un rango óptimo para el tratamiento biológico debido a que el rango en el cual crecen los microorganismos en un sistema biológico es de 6.5 – 8.0 unidades de pH [34] (ver Gráfica 2).

Gráfica 2. Comportamiento medio mensual del pH durante el periodo de caracterización en el año 2019

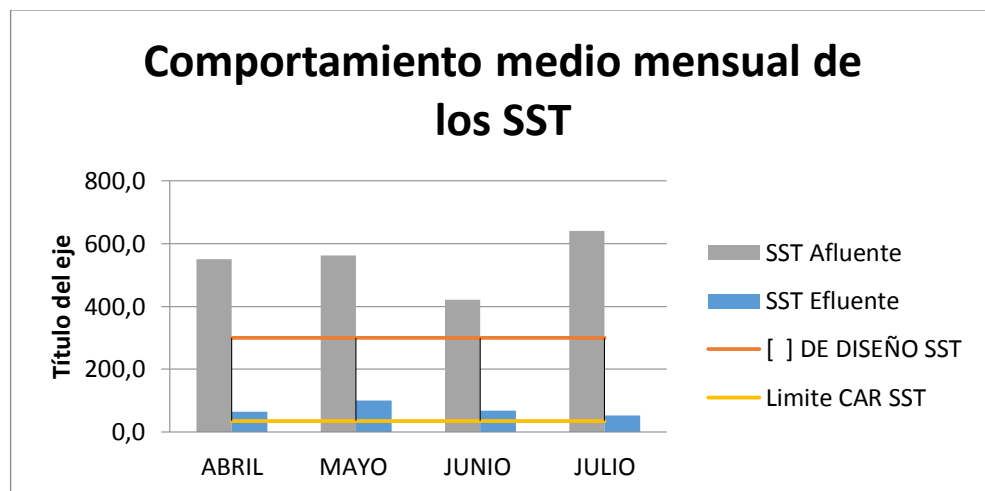


Fuente: Autor

Solidos Suspendidos Totales:

Los SST presentan un porcentaje de remoción media del 87% a lo largo del proyecto, no siendo este porcentaje suficiente para dar cumplimiento a lo que se establece para este parámetro en el permiso de vertimiento. Sin embargo, es importante resaltar que la concentración de diseño es de 300. mg/l y la concentración media de ingreso a la PTAR es de 544.3 mg/l, lo que genera un impacto sobre la eficiencia de remoción ya que la planta no fue diseñada para dichas concentraciones, siendo esta la razón principal del incumplimiento de la normativa.

Gráfica 3. Comportamiento medio mensual de los SST durante el periodo de caracterización en el año 2019

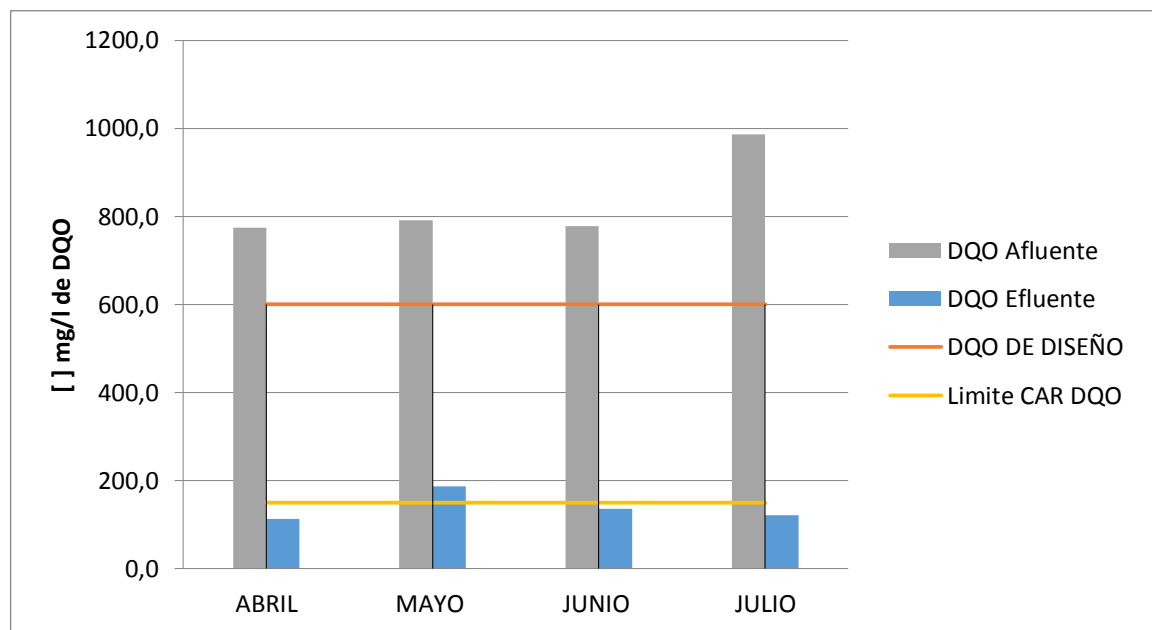


Fuente. Autor

Demanda Química de Oxígeno:

Con respecto a la DQO, tal vez uno de los parámetros más relevantes en el tratamiento de las aguas residuales se reporta una remoción media del 83%. Dando cumplimiento a lo reglamentado en el permiso de vertimientos para este parámetro tres de los cuatro meses evaluados como se muestra en la Gráfica 4. De igual manera las concentraciones de entrada reportadas se encuentran muy por encima de la concentración de diseño, como lo evidencia la concentración promedio del mes de Julio la cual es de 986.6 mg/L, que supero en 386.6 mg/l el valor de diseño, convirtiéndose en un factor determinante para el cumplimiento o no del permiso de vertimientos.

Gráfica 4. Comportamiento medio mensual de la DQO durante el periodo de caracterización en el año 2019

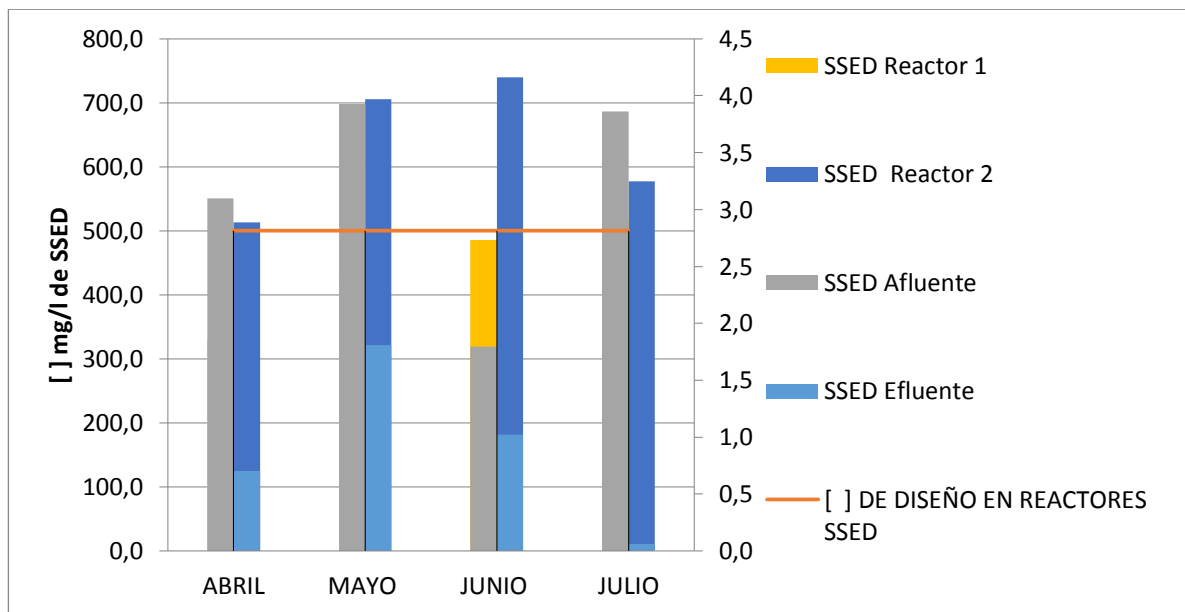


Fuente. Autor

Solidos Sedimentables:

Se evidencia una relación entre la concentración de los SSED de salida y los SSED en los reactores biológicos como se observa en la Gráfica 5, en donde la probabilidad de que haya presencia de SSED en el efluente aumenta con concentraciones por encima de 500 ml/l en los reactores biológicos, aumentando además las concentraciones en otros parámetros como lo es el caso de los SST, la DQO y la DBO. Por ende, el control de este parámetro a través de las purgas periódicas es de vital importancia para el proceso de tratamiento.

Gráfica 5. Comportamiento medio mensual de los SSED durante el periodo de caracterización en el año 2019



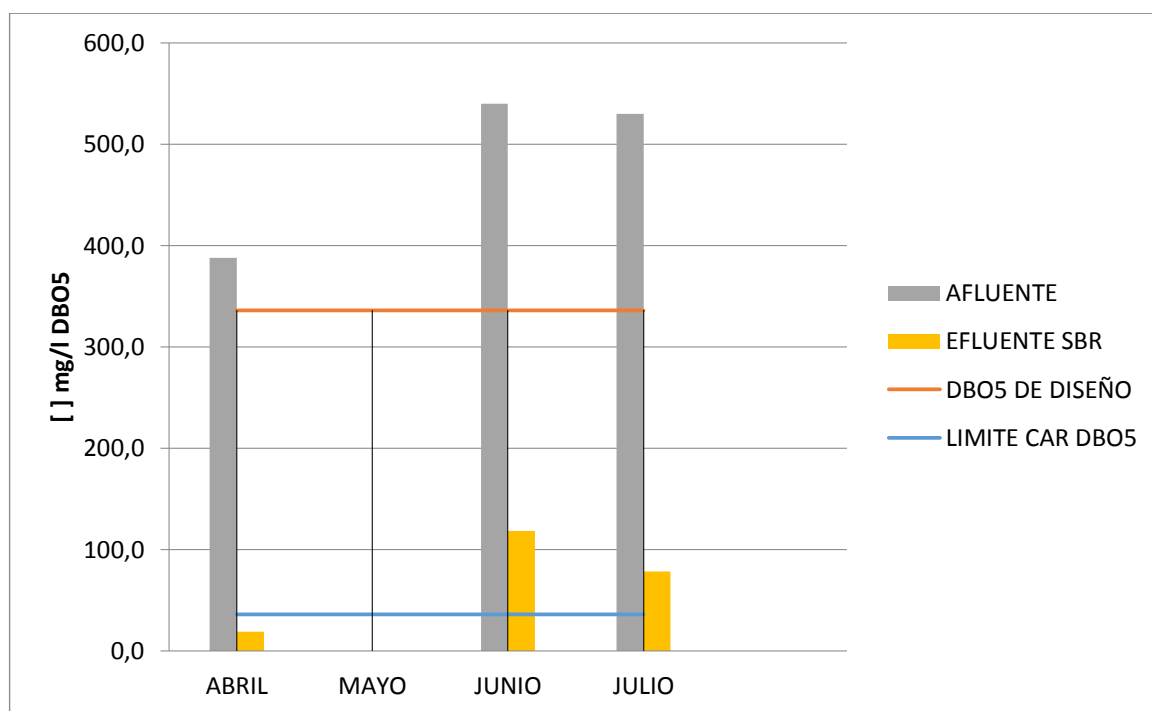
Fuente. Autor

Demanda Biológica de Oxígeno:

La DBO la cual es un indicador de la materia orgánica presente el agua. La concentración límite de la DBO es bastante restrictiva teniendo en cuenta el valor límite de la resolución 631 de 2015 donde se establece un límite de 90 mg/l para este parámetro mientras que la resolución CAR 0736 de 2018 establece un límite máximo de 36 mg/l, haciendo su cumplimiento bastante difícil. Una observación importante frente a este parámetro es la relación que tiene la DQO y la DBO en las diferentes normativas. Para el caso de la resolución 0631 la DQO y la DBO tiene una relación del 50%, es decir, que el valor límite de DQO en el efluente es de 180 mg/l y el de la DBO es de la mitad. (90 mg/l). Sin embargo, esta relación en la resolución CAR 0736 es mucho más baja ya que mientras el valor límite de DQO de 150 mg/l, la DBO es de 36 mg/l, es decir el 24% de la DQO, convirtiendo la DBO en un parámetro bastante restrictivo.

Por lo anterior la DBO únicamente reporta cumplimiento a al permiso de vertimiento el mes de abril, siendo este un mes húmedo donde las concentraciones de entrada se diluyen y favorecen así el proceso de tratamiento. El porcentaje de remoción medio mensual fue del 84%, siendo un porcentaje bastante bueno, pero no el suficiente para lo exigido en el permiso de vertimientos

Gráfica 6. Comportamiento medio mensual de la DBO5 durante el periodo de caracterización en el año 2019



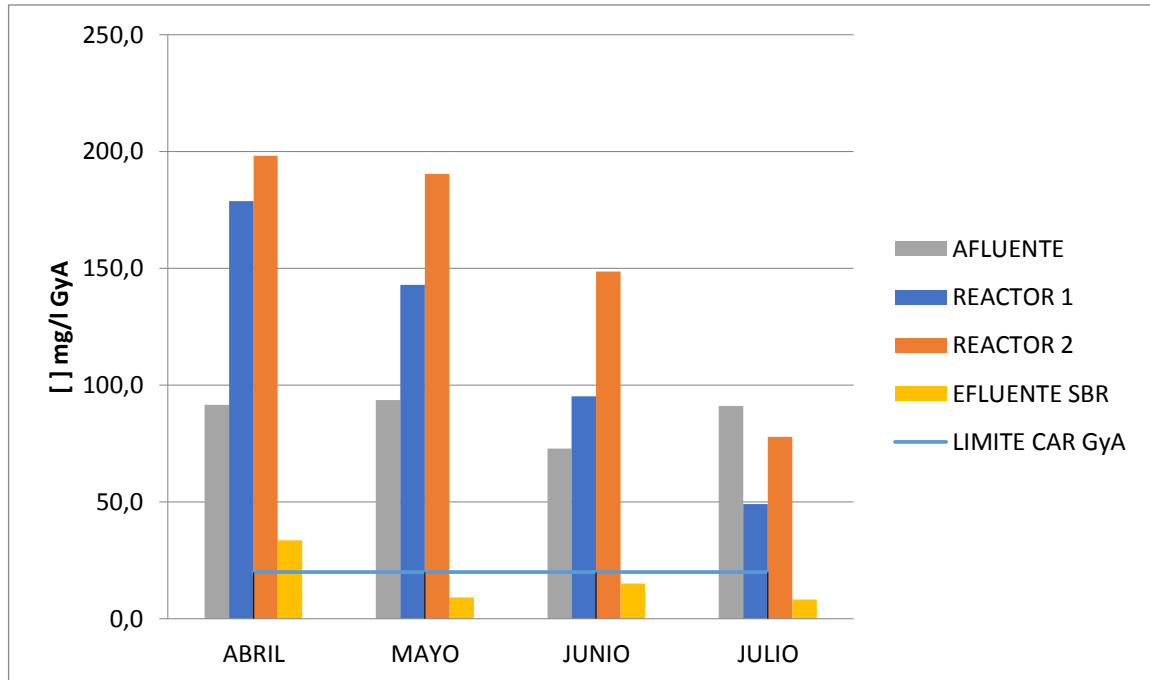
Fuente. Autor

Grasas y Aceites:

Las grasas y aceites son uno de los parámetros más críticos para el proceso de tratamiento en la PTAR debido a que no cuenta con una unidad de remoción de este contaminante, generando de esta manera que se concentre en los reactores biológicos como se observa en el gráfico, y donde se reportan las concentraciones más altas registradas en la PTAR. Esto representa un impacto sobre la eficiencia del tratamiento biológico debido a la interferencia que presenta este tipo de compuestos con el metabolismo bacteriano. Además, el exceso de grasas y aceites se convierte un factor determinante en la generación de espumas en los reactores gracias debido a crecimiento de bacterias filamentosas.

A pesar de esto las concentraciones en el efluente son bajas y dan cumplimiento al permiso de vertimientos tres de los cuatro meses evaluados. Esto se debe a que el equipo encargado de realizar la descarga del agua tratada se encuentra en una pequeña porción sumergido, y debido a la diferencia de densidad las grasas y aceites permanecen en la superficie, acumulándose de esta manera en los reactores biológicos.

Gráfica 7. Comportamiento medio mensual de las Grasas y Aceites durante el periodo de caracterización en el año 2019



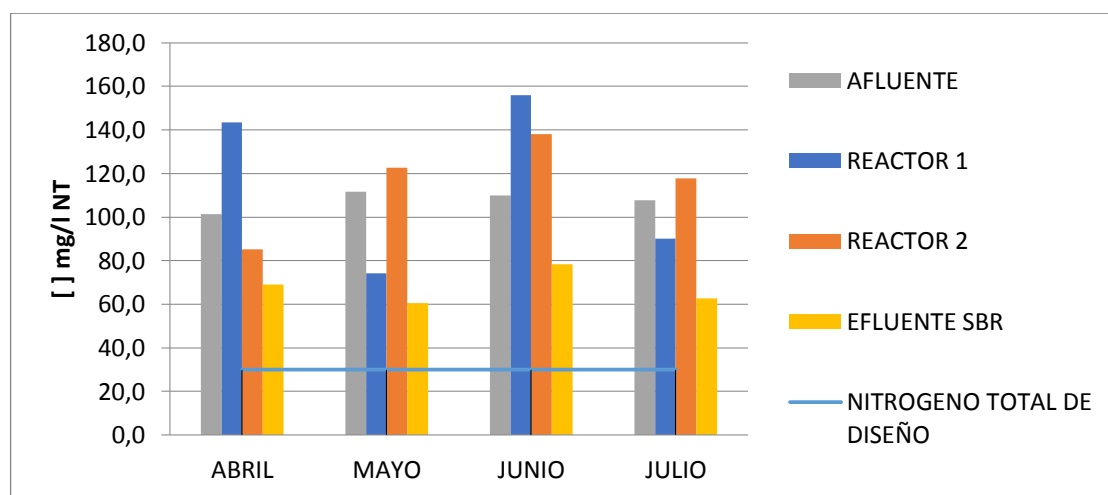
Fuente. Autor

Nitrógeno Total:

Si bien el Nitrógeno total no se encuentra definido dentro de los límites máximos del permiso de vertimientos, es un compuesto determinante en la calidad del agua del cuerpo receptor ya que en altas concentraciones puede llegar a generar eutrofización. En la gráfica se observa como las concentraciones en el afluente sobrepasan altamente la concentración de diseño, dando como resultado valores significativamente elevados en el efluente y por ende impactando negativamente el cuerpo receptor. La eficiencia en el proceso de remoción de nitrógeno está directamente relacionada con la operación correcta de las bombas de recirculación de lodo, las cuales están diseñadas únicamente con el propósito de eliminar el nitrógeno a través del proceso de desnitrificación que se lleva a cabo en la zona anoxia de los reactores.

Este parámetro registra un porcentaje de remoción del 37% únicamente, teniendo esta remoción una relación directa con la correcta operación de las bombas de recirculación de lodos en los reactores Biológicos.

Gráfica 8. Comportamiento medio mensual del Nitrógeno Total durante el periodo de caracterización en el año 2019

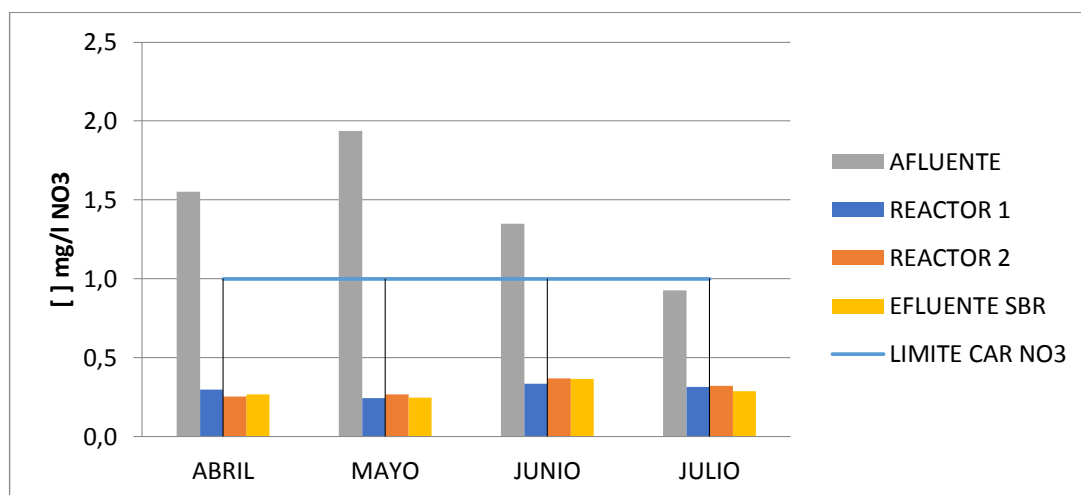


Fuente. Autor

Nitratos y Nitritos:

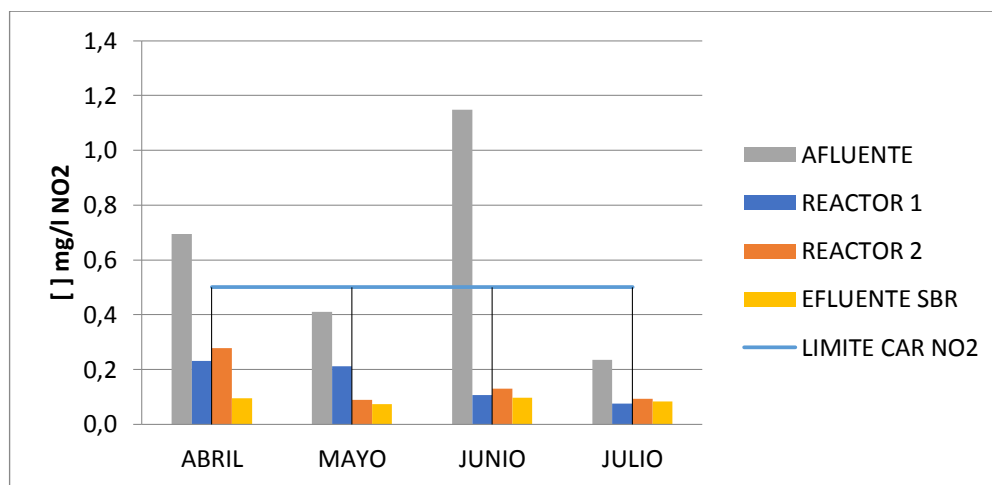
Las concentraciones de nitratos y nitritos en la entrada a la PTAR son del orden de 1.9 mg/l y 1.1 mg/l respectivamente, como se evidencia en las Gráfica 9 y 10. Sin embargo, a lo largo del proceso de tratamiento estas disminuyen notablemente dando cumplimiento a la normativa vigente sin ningún inconveniente. No obstante, como se menciona anteriormente el nitrógeno total sigue siendo considerablemente alto. Para estos parámetros se registró una remoción media del 66% para los nitratos y un 68% para los nitritos.

Gráfica 9. Comportamiento medio mensual de los Nitratos durante el periodo de caracterización en el año 2019



Fuente. Autor

Gráfica 10. Comportamiento medio mensual de los Nitritos durante el periodo de caracterización en el año 2019

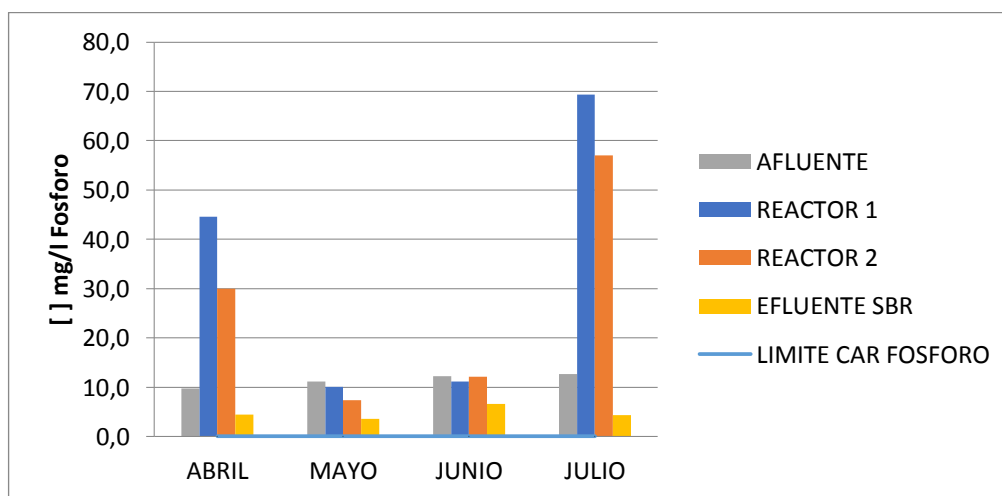


Fuente. Autor

Fosforo Total:

En cuanto al fósforo, este es el parámetro más crítico en lo que respecta a cumplimiento de norma, ya que el límite máximo permisible es extremadamente bajo convirtiéndolo en un parámetro crítico, ya que al igual que el nitrógeno es uno de los nutrientes que más interviene en los procesos de eutrofización. Este parámetro presenta una media mensual de remoción del 69%, siendo esta insuficiente para lo exigido por el permiso de vertimientos.

Gráfica 11. Comportamiento medio mensual del Fosforo Total durante el periodo de caracterización en el año 2019



Fuente. Autor

4.1.3 PUNTOS CRÍTICOS DE CONTROL DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

Conforme a la evaluación del funcionamiento hidráulico de las unidades de tratamiento realizada durante recorridos periódicos a las instalaciones de la PTAR, y la caracterización fisicoquímica de sus aguas se determinaron los siguientes puntos críticos en el tren de tratamiento:

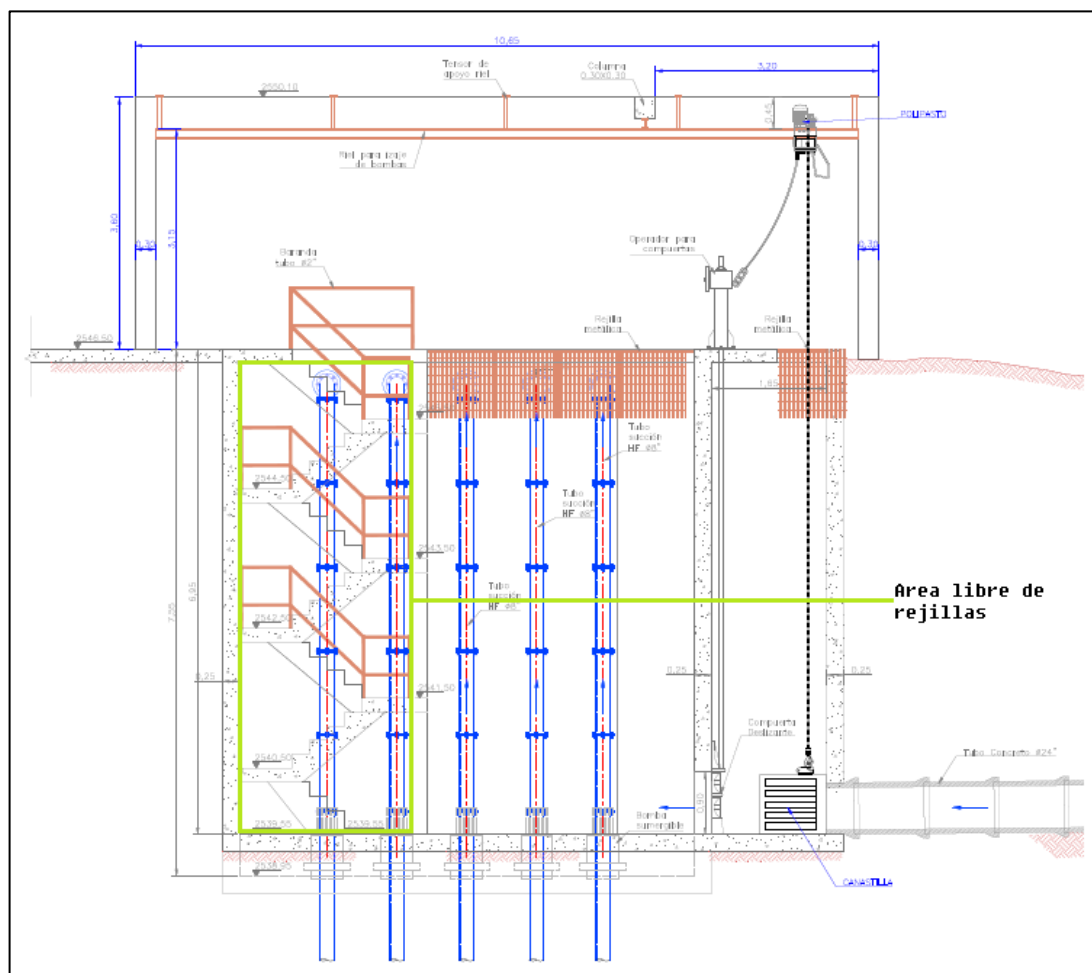
1. Junto con la canastilla de cribado grueso, el tanque de bombeo cuenta con una segunda rejilla para retener los sólidos que debido a la fuerza ejercida por el caudal de llegada a la planta logran ingresar al tanque como se observa en Imagen 22. A pesar de esto, existe una zona libre de rejillas por donde estos sólidos consiguen ingresar, llegando así a la zona de bombeo, que aumenta las probabilidades de falla por taponamiento de las bombas (Figura 6) y de esta manera aumentando la periodicidad de los mantenimientos y los costos de operación.

Imagen 22. Rejilla de cribado



Fuente. Autor

Figura 6. Identificación área libre de rejillas en tanque de Bombeo



Fuente.[35]

2. Un punto crítico importante en la PTAR, es la falta de capacidad del tanque de bombeo, ya que en situaciones de tormenta o fuertes precipitaciones parte del agua de la red pluvial es conducida hasta al fluente debido a los tramos de la red sanitaria combinados. Esta condición, no permite almacenar el agua cruda de exceso, impidiendo de esta manera tratar la totalidad del agua residual que ingresa a la planta durante este tipo de eventos, y por tanto debe ser evacuada sin tratar a través de las bombas de emergencia hacia el Humedal Gualí para evitar inundaciones y el colapso del sistema de alcantarillado. Como consecuencia de la evacuación del exceso de agua lluvias, se generan fuertes impactos no solo en la calidad del cuerpo hídrico, sino también en el ecosistema circundante como lo son la pérdida de biodiversidad, generación de olores ofensivos, detrimento en la calidad del recurso hídrico, pérdida del potencial turístico y recreativo del humedal.

Además de los periodos de lluvia, en caso de mantenimientos preventivos o fallas en el sistema de bombeo o de las estructuras del tanque de bombeo, deben entrar en operación las bombas de emergencia para permitir que se lleve a cabo el mantenimiento ya que este tanque no cuenta con secciones independientes que le permita que mientras una de ellas se encuentra en mantenimiento la otra opere normalmente, lo que implica grandes afectaciones al cuerpo de agua receptor ya anteriormente mencionadas.

3. Otro punto crítico evidenciado es el desarenador, el cual es la única unidad de ingreso de agua al sistema de tratamiento biológico y cuyo caudal de diseño es de 120 L/s, lo que genera que solo tenga capacidad para operar con una de las cuatro (4) bombas de 101 L/s de la estación bombeo. Esto debido a que, si operan dos bombas el caudal enviado al sistema de tratamiento sería mayor al caudal de diseño, por lo que parte del agua sería enviada al canal de salida que conduce al humedal Gualí a través del vertedero de excesos de esta unidad como se parecía en Imagen 23. Como consecuencia el nivel en el tanque de homogenización se incrementa rápidamente en periodos de lluvia o en horas pico y las bombas de emergencia deban entrar en operación para evacuar el exceso de agua.

Imagen 23. Vertedero de excesos desarenador



Fuente. Autor

4. El sistema de tratamiento no cuenta con una unidad de retención de grasas y aceites ver Imagen 24, convirtiéndose de este modo en el principal problema de la PTAR debido a los inconvenientes operacionales que generan este tipo de compuestos en las estructuras y sistemas biológicos de tratamiento. Las grasas tienen una gran tendencia a oxidarse, lo que genera una alta demanda de oxígeno en los reactores biológicos solo para

degradar estos compuestos, dejando de esta manera un porcentaje bajo de oxígeno para degradar la materia orgánica y en ocasiones pudiendo generar situaciones de anoxia puntuales que podrían propiciar la proliferación de microorganismos filamentosos y con esto la generación de espumas dentro de los reactores [36].

Además, estos compuestos tienen tendencia a flotar debido a su baja densidad, lo que crea una capa en la superficie de los reactores biológicos como se parecía en, dificultando también la transferencia de oxígeno como puede observarse en la Imagen 25. Además de esto, la unidad que realiza la descarga del agua tratada de los reactores biológicos no extrae el agua completamente de la superficie, lo que genera que muy poca cantidad de grasas y aceites salga de estos, como se evidencia en los resultados de laboratorio, en donde a pesar de las altas concentraciones de grasas y aceites presentes en los reactores, la muestra de salida del sistema tiene bajas concentraciones de este parámetro, evidenciando de este modo que la mayor parte de las grasas y aceites se acumulan en los reactores, aumentando así los problemas operacionales anteriormente mencionados.

Imagen 24. Ingreso de grasa al tratamiento secundario a través del desarenador



Fuente. Autor

Imagen 25. Capa de grasa en sistema de Reactores Biológicos



Fuente. Autor

5. El sistema SBR fue diseñado para ser controlado a través de un controlador lógico programables (PLC) que controla el funcionamiento de cada uno de los equipos que conforman el sistema SBR, como los turbosopladores encargados de la inyección de oxígeno, las bombas sumergibles de recirculación y evacuación de lodos, bombas para recirculación de lixiviados, decaners de los dos reactores, bomba dosificadora de polímero, agitador de polímero, válvulas de aireación, válvulas de evacuación de lodos, válvulas de control de hidrociclón y válvulas de evacuación de arenas. Además, controla los tiempos de cada bache del ciclo de tratamiento, pero ha presentado algunas fallas en su configuración haciendo que se encuentre fuera de servicio, por tanto, el control de los equipos y tiempos de tratamiento anteriormente mencionados es completamente manual. Esto conlleva a que la responsabilidad en la operación de todo el sistema SBR recaiga sobre los operadores de la PTAR, generando que se presenten errores en la operación, como el aumento o disminución en los tiempos de las diferentes etapas de tratamiento, la ausencia de purgas periódicas de lodos, déficit en la aireación debido a que los turbosopladores no regulan la inyección de oxígeno conforme aumenta o disminuye la concentración de OD y la no recirculación de lodos en la etapa de descarga como lo establece el manual de funcionamiento
6. El sistema SBR integrado en la PTAR cuenta con un sistema de eliminación de nitrógeno a través de la recirculación de los lodos nitrificados en la fase de aireación a la zona anóxica de los reactores, permitiendo transformar los nitritos y nitratos en Nitrógeno gaseoso en condiciones anaerobias. Sin

embargo, los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio, indicaron una baja eficiencia en la remoción de este elemento principalmente causada por la usencia de esta recirculación debida a desconfiguración del PLC, lo que trasmite la responsabilidad a los operadores, generado que su funcionamiento este supeditada al criterio de este personal.

7. Se evidencio la importancia del control de los niveles de lodos en los reactores biológicos a través de la medición en cono imhoff, ya que en los resultados de las mediciones realizadas a la PTAR fueron observados valores de SSED en los reactores que no garantizan una buena sedimentación, y que influye directamente en la descarga final. Bajo esta condición parte del lodo sale en el efluente, aumentando de esta manera las concentraciones de los parámetros analizados, lo que se ve reflejado en el incumplimiento de la normativa vigente. De igual manera bajas concentraciones de este parámetro son indicio de un déficit de aireación o un cambio violento en las condiciones de los reactores que interviene en la tasa de crecimiento bacteriano y por consiguiente genere una baja degradación de materia orgánica lo que conlleva a su vez a un incumplimiento de la normativa.
8. Además de los puntos críticos ya mencionados, a través de los análisis de laboratorio se evidencio que las concentraciones del afluente son mayores a las concentraciones para cuales fue diseñada la PTAR. Este aumento se debe a un crecimiento sociodemográfico e industrial superior al proyectado en el momento del diseño, lo que genera que, incluso operando con la eficiencia de remoción de diseño, el cumplimiento de la normativa legal vigente este condicionado por la carga de entrada.

4.1.4 CARACTERIZACIÓN DEL SECTOR INDUSTRIAL DEL MUNICIPIO

En el municipio de Funza dentro de las principales actividades económicas en los últimos años, se han incrementado las actividades comerciales e industriales, siendo con la actividad agropecuaria los principales sectores económicos del municipio. La distribución de la tierra inicialmente presentaba una fuerte vocación agropecuaria, pero por su cercanía con la capital del país y especialmente en la última década se ha visto un crecimiento urbanístico e industrial fuerte.

El municipio cuenta con la presencia de una planta de transformación de COLANTA, y empresas procesadoras de alimentos, que tienen su producción en los parques industriales del municipio. La infraestructura de desarrollo económico también se refleja en los procesos de crecimiento industrial, ya que tiene 19 parques industriales y se tiene licenciamiento para seis más [32]

Debido a este crecimiento comercial e industrial que experimenta el municipio se evaluó la carga contaminante vertida por las principales industrias de la zona a la red de alcantarillado que conduce las aguas servidas a la PTAR del municipio que pueden o no intervenir en la eficiencia de los procesos de tratamiento dependiendo de las concentraciones de estas cargas contaminantes. Por tal razón, a continuación, se relaciona la caracterización de los vertimientos de las 28 industrias y locales comerciales del municipio y su comparación con la normativa vigente de vertimientos, resolución 0631 de 2015.

De esta caracterización se evidencia el cumplimiento a la normativa en los parámetros allí señalados por parte de 15 industrias del sector y su incumplimiento por parte de las 13 empresas restantes, que sobrepasaron el límite permisible sobre todo en lo referente a la DBO₅ y la DQO, siendo la de mayor incumplimiento la INDUSTRIA BRUS REFRIGERATION OF COLOMBIA LTDA sobrepasando la norma nacional de vertimientos en 694 mg/l de DQO ver Tabla 5. Caracterización Principales Industrias Funza.

A pesar de que más del 50% de las empresas caracterizadas cumplieron con la normativa vigente de vertimientos, es importante mencionar que los límites establecidos por la resolución 0631 de 2015 para algunos sectores industriales superan altamente los parámetros de diseño con los que opera actualmente la PTAR del municipio como es el caso de las industrias que elaboran productos lácteos, industrias de elaboración de productos de panadería y el sector de servicios funerarios. A pesar del cumplimiento a la resolución 0631 por parte de algunas industrias, sus cargas contaminantes (es decir su relación caudal-concentración) sus vertimientos generan un impacto negativo sobre el tratamiento biológico que realiza la PTAR, sin contar los vertimientos de las industrias que incumplen con la normativa.

Tabla 5. Caracterización Principales Industrias Funza

N°	NOMBRE USUARIO O SUScriptor	TIPO DE USUARIO	DESCRIPCIÓN ACTIVIDAD PRODUCTIVA	NORMA DE VERTIMIENTO AL ALCANTARILLADO Decreto N° 3930 de 2010 Resolución N° 631 del 2015			CARACTERÍSTICAS DEL VERTIMIENTO	
				Parámetros	valor	Unidad	valor	Unidad
1	Andina de vidrios SA	industrial	Fabricación de vidrio y productos de vidrio	DQO	195	mg/L O ₂	105	mg/L O ₂
				DBO ₅	75	mg/L O ₂	38,2	mg/L O ₂

N°	NOMBRE USUARIO O SUScriptor	TIPO DE USUARIO	DESCRIPCIÓN ACTIVIDAD PRODUCTIVA	NORMA DE VERTIMIENTO AL ALCANTARILLADO Decreto N° 3930 de 2010 Resolución N° 631 del 2015			CARACTERÍSTICAS DEL VERTIMIENTO	
				Parámetros	valor	Unidad	valor	Unidad
				SST	75	mL/L	109	mL/L
				GYA	30	mg/L	<10	mg/L
2	Brus refrigeration of Colombia Ltda	industrial	Otras industrias manufactureras	DQO	300	mg/L	994	mg/L
				DBO ₅	150	mg/L	663	mg/L
				SST	75	mg/L	37	mg/L
				GYA	15	mg/L	<5	mg/L
3	CD systems de Colombia S.A	industrial	1. Producción de copias a partir de grabaciones originales 2. Actividades de impresión 3. otras actividades de telecomunicaciones	DQO	300	mg/L	1003	mg/L
				DBO ₅	150	mg/L	668	mg/L
				SST	75	mg/L	<10	mg/L
				GYA	15	mg/L	39,1	mg/L
4	Industrias Goya S.A	industrial	fabricación de artículos de cuchillería, herramientas de mano y artículos de ferretería	DQO	375	mg/L O ₂	720	mg/L O ₂
				DBO ₅	75	mg/L O ₂	417	mg/L O ₂
				SST	75	mg/L	277	mg/L
				GYA	15	mg/L	17	mg/L
5	Prolac S.A.S	industrial	Elaboración de comidas y platos preparados	DQO	900	mg/L	39	mg/L
				DBO ₅	600	mg/L	27	mg/L
				SST	300	mg/L	88	mg/L
				GYA	30	mg/L	<5	mg/L

N°	NOMBRE USUARIO O SUScriptor	TIPO DE USUARIO	DESCRIPCIÓN ACTIVIDAD PRODUCTIVA	NORMA DE VERTIMIENTO AL ALCANTARILLADO Decreto N° 3930 de 2010 Resolución N° 631 del 2015			CARACTERÍSTICAS DEL VERTIMIENTO	
				Parámetros	valor	Unidad	valor	Unidad
6	Roseta industrial	industrial	Otras industrias manufactureras N.C.P.	DQO	225	mg/L O ₂	762	mg/L O ₂
				DBO ₅	75	mg/L O ₂	61,2	mg/L O ₂
				SST	75	mg/L	56	mg/L
				GYA	15	mg/L	<LCM	mg/L
7	Texpon S.A	industrial	Fabricación de otros artículos textiles N.C.P.	DQO	600	mg/L	749	mg/L
				DBO ₅	300	mg/L	93	mg/L
				SST	75	mg/L	<2.5	mg/L
				GYA	20	mg/L	<10	mg/L
				CAUDAL	NA	L/S	3,435	L/S
				GYA	22,5	mg/L	<6	mg/L

Fuente.[37]

4.1.5 RED DE ALCANTARILLADO:

El municipio de Funza cuenta con un sistema parcialmente separado de alcantarillado sanitario y pluvial con excepción de los barrios Samarkanda, Fortuna y Hato Sector I, en los cuales la red es combinada por la falta de una red pluvial.

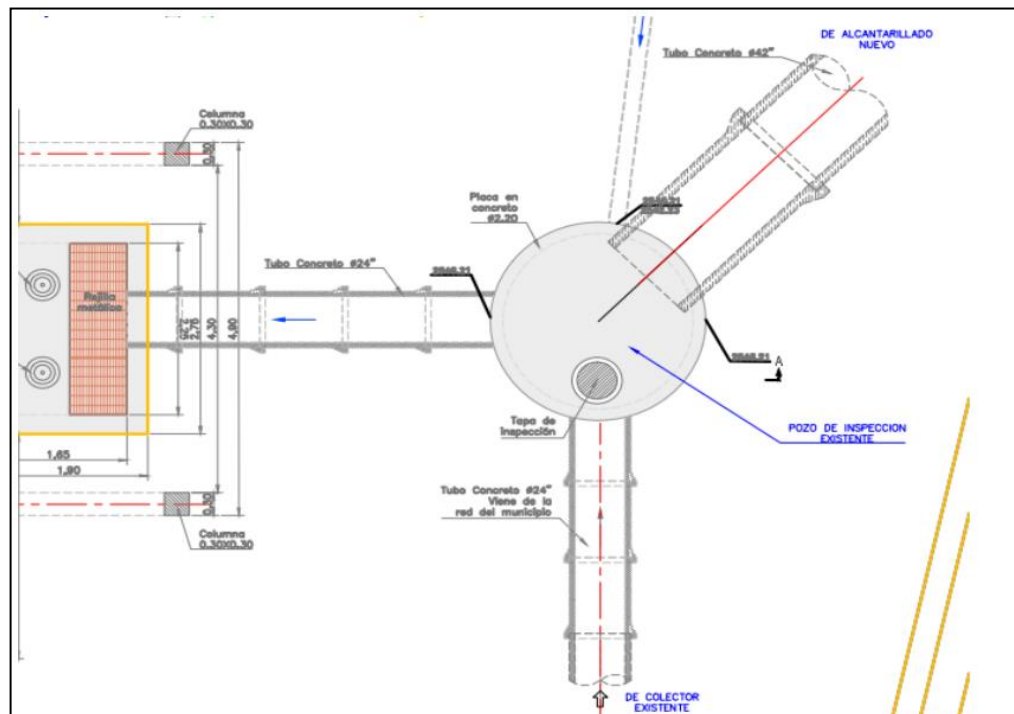
La red tiene una cobertura del 75.73 % del total del municipio [8], en donde cerca del 91% del área urbana lleva las aguas residuales a la PTAR, y el porcentaje restante drena directamente sus aguas residuales a los humedales Gualí y Tres Esquinas o a vallados del sistema de riego Chicú-La Ramada. Los diámetros de las tuberías oscilan entre 6 y 45 pulgadas. La red está compuesta por 8,7 kilómetros lineales de red sanitaria, de los cuales 0,589 corresponden a red combinada y 5,9 kilómetros de red pluvial aproximadamente [8].. Esta red sanitaria

evacua las aguas residuales a un colector ubicado en el barrio la aurora donde se encuentra la PTAR y son finalmente vertidas al humedal Gualí.

El sistema de drenaje de aguas lluvias del municipio por otra parte, es un sistema que trabaja por gravedad y descarga sus aguas al humedal Gualí y al río Bogotá [EMAAF]. Las aguas residuales del sector sur del municipio que no se descargan directamente al Humeda Gualí, son conducidas a la estación de bombeo ubicada en el barrio México, para luego continuar por gravedad hasta la PTAR. La red de alcantarillado sanitario se caracteriza por operar a velocidades muy bajas de flujo, debido a las bajas pendientes de los colectores y presenta conexiones erradas de aguas lluvias de algunas viviendas como se menciona previamente. El alcantarillado pluvial presenta deficiente capacidad hidráulica y genera inundaciones durante aguaceros de alta intensidad.

El alcantarillado del casco urbano entra al predio de la planta por el costado suroriental mediante dos (2) colectores predominantemente sanitarios que ingresan por los costados oriental y occidental de la PTAR como se muestra a continuación:

Figura 7. Colectores aferentes a la PTAR del municipio de Funza.



Fuente. [38]

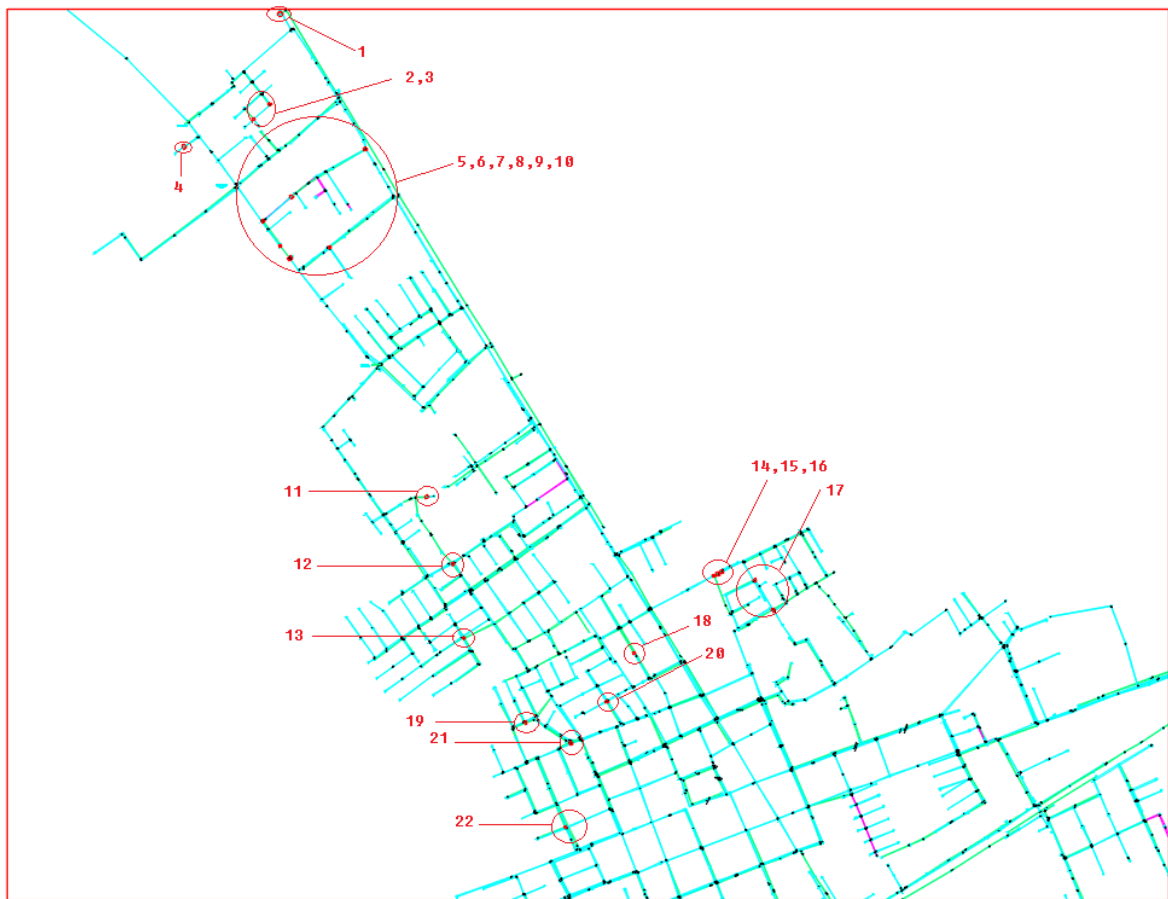
4.1.6 IDENTIFICACIÓN DE CONEXIONES ERRADAS

Se realizó un análisis del catastro de redes del municipio, información brindada por la empresa de acueducto, alcantarillado y aseo de Funza – EMAAF ESP. A través de este se analizaron tanto la red pluvial como la red sanitaria con el fin de identificar conexiones erradas no definidas dentro del catastro de redes que puedan tener relación con el aumento del caudal de ingreso a la PTAR en periodos de lluvia diferentes a los tramos de red combinados de los cuales se tiene información.

Para esto se dividió el catastro en dos secciones, la parte norte y la parte sur del municipio como se evidencia en las imágenes 26 y 27 respectivamente.

Una vez realizado el análisis se logró identificar la existencia de 29 conexiones erradas a lo largo del municipio distribuidas de la siguiente manera: 22 conexiones erradas en la parte norte del municipio como se observa en la Imagen 26 y en la parte sur como se evidencia en la Imagen 27.

Imagen 26. Conexiones erradas identificadas en el catastro de redes parte Norte del Municipio de Funza- Cundinamarca

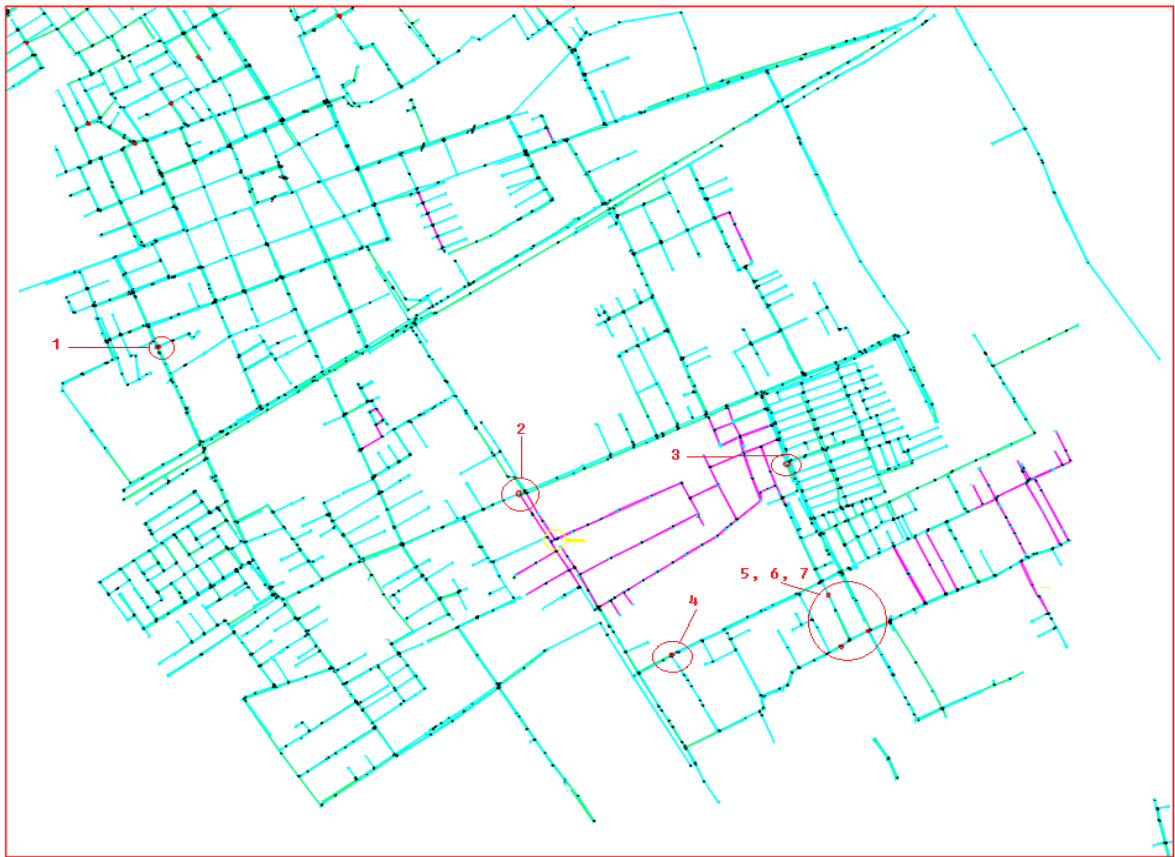


Fuente. [39]

En la zona norte de la Imagen 27 se tienen identificados dos tramos de la red que son combinados, lo cuales están señalados de color violeta. Además de estos tramos existen 22 conexiones erradas de la red pluvial a la red sanitaria, las cuales se encuentran encerradas con círculos de color rojo, inyectando caudal a la red sanitaria en condiciones de lluvia que se suma al caudal que ingresa desde los tramos de red combinad. Esta condición en la red sanitaria genera un aumento en el caudal de ingresa a la PTAR y que bajo diferentes magnitudes de precipitación el tanque de bombeo sobrepase su capacidad y deba enviar el agua de exceso al humedal Gualí sin ser tratada.

A continuación, se muestra la parte sur del municipio donde se identifican las siete (7) conexiones erradas

Imagen 27.. Conexiones erradas identificadas en el catastro de redes parte Norte del Municipio de Funza- Cundinamarca



Fuente. [39]

4.2 DISEÑO MEDIDAS DE MEJORA

4.2.1 REDISEÑO TANQUE DE BOMBEO

Conforme al diagnóstico realizado se establece que el tanque de bombeo no cuenta con las especificaciones técnicas necesarias para garantizar un tratamiento de las aguas residuales sin interrupción como se establece en la Resolución 0330 de 2017. Por tal motivo se consideró pertinente realizar el rediseño del mismo.

4.2.2 REDISEÑO SISTEMA DE CRIBADO GRUESO

Debido a que el sistema de cribado grueso instalado previo al sistema de bombeo tampoco cuenta con las especificaciones técnicas actuales del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS versión 2017, se decidió realizar el redimensionamiento de este sistema.

4.2.3 DISEÑO DE UN DESARENADOR-DESENGRASADOR

Teniendo en cuenta los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados durante los meses de abril a julio del año 2019 y en el análisis estructural de la PTAR desarrollados dentro de diagnóstico del presente proyecto, el principal problema operacional de la planta es la falta de un sistema de remoción de grasas y aceites dentro del pretratamiento, convirtiendo este contaminante en un inhibidor del tratamiento biológico; sumado a un sistema de desarenado con una capacidad insuficiente para tratar el caudal actual de la planta. Por tal razón se decidió diseñar un Desarenador-Desengrasador que permita conducir el caudal necesario para mantener un nivel adecuado en tanque de bombeo, así como en el sistema de alcantarillado; y una remoción de arenas, grasas y aceites eficiente que mejore en gran proporción el proceso de pretratamiento y de esta manera una mejora en el tratamiento biológico.

4.2.4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA LAS UNIDADES HIDRÁULICAS DE MEJORA PROPUESTAS

- Periodo de Diseño:

De acuerdo con el Artículo 40 de la Resolución 0330 de 2017, “por la cual se adopta el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009”. se establece que, para todos los componentes de acueducto, alcantarillado y aseo se adopta un periodo de diseño 25 años. Por tanto, el periodo de diseño para la unidad de desarenado y desengrasado será del periodo comprendido entre los años 2018 a 2043.

- Proyección de Población:

Con el fin de establecer los caudales de diseño para el periodo comprendido entre los años 2020 a 2045 se realizó la proyección de población con base en datos suministrados por el DANE correspondientes a los censos de los años 1938, 1951, 1964, 1973, 1985, 1993, 2005 y 2018. Para esto se utilizaron los métodos geométrico y exponencial según lo especificado en el “Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS - 2000”.

Dado que la estimación de la población es uno de los aspectos para la definición del nivel de complejidad, se establece que esa población debe corresponder a la proyectada al final del periodo de diseño, llamado también horizonte de planeación del proyecto. A continuación, se presentan la información utilizada para realizar dichas proyecciones.

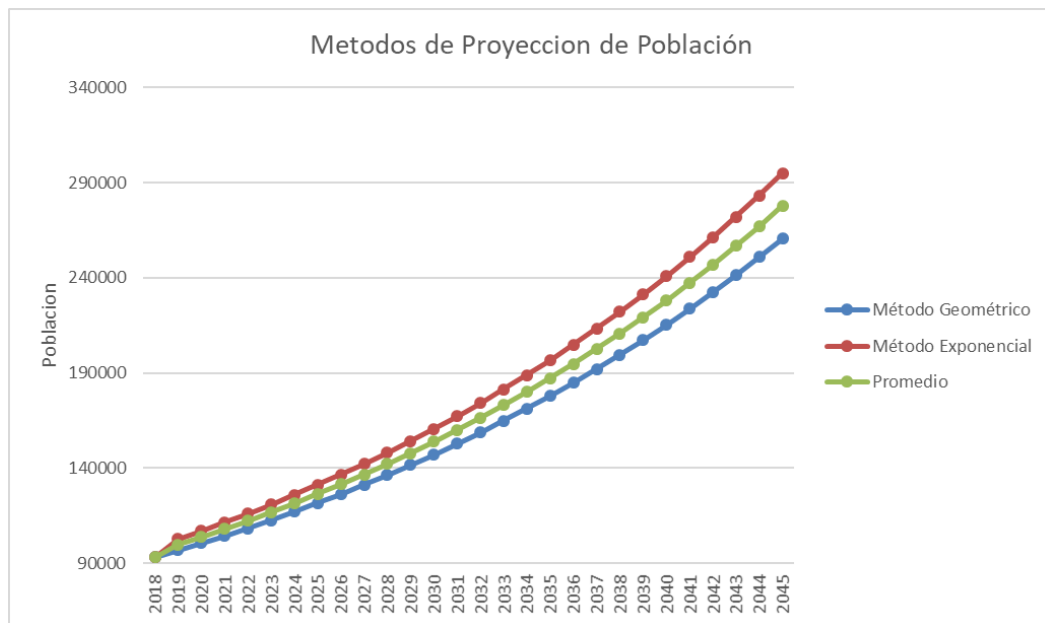
Tabla 6. Censos Poblacionales DANE

Año Censo	Población
1938	3857
1951	5346
1964	10659
1973	17660
1985	27229
1993	37774
2005	60571
2018	93153

Fuente. [7]

Dados los lineamientos mencionados el diseño metodológico para el cálculo de la proyección, de población a continuación se presentan los resultados obtenidos para los métodos geométrico y exponencial.

Gráfica 12. Proyecciones de Población



Fuente. Autor

Teniendo en cuenta los resultados anteriormente relacionados la población final para el periodo de diseño de las estructuras hidráulicas de mejora para el proceso de tratamiento de la PTAR del municipio de Funza – Cundinamarca es de 256817 habitantes proyectados para el año 2043.

4.2.5 ÁREAS DE EXPANSIÓN DE VIVIENDAS

Según lo establece el plan básico de ordenamiento territorial del municipio de Funza, el área de expansión para uso de vivienda que cuenta con un total disponible de 73.51 Ha y el área de expansión de uso Industrial con un total de 110.86 Ha, estos datos se presentan a continuación.

Tabla 7. Clasificación de uso del suelo para el municipio de Funza

Codificación	Zona	Clasificación	Área (Ha)
SU-Z1	Casco Principal	Suelo urbano	413.37
SU-Z2	Siete Trojes	Suelo urbano	35.83
SU-Z3	Martínez Rico-Itacol	Suelo urbano	6.55
SU-Z4	Industrias San Carlos	Suelo Urbano	25.50
Total Suelo Urbano			481.25
SE-Z1	Santa Teresita	Suelo de Expansión	45.83
SE-Z2A/B	Bacatá	Suelo de Expansión	2.31
SE-Z3A/C	El Hato	Suelo de Expansión	25.37
Total Expansión de Vivienda			73.51

Fuente. [32], [33]

4.2.6 DENSIDAD DE POBLACIÓN

Con el fin de establecer la población máxima que puede soportar el área de expansión del municipio de Funza, se tomaron como base los datos definidos por el Plan básico de ordenamiento territorial PBOT en su mapa de densidades en donde se define la máxima cantidad de viviendas por hectárea que puede soportar cada una de las zonas del municipio [32], [33].

Tabla 8. Densidad de ocupación de Viviendas por hectárea para el municipio de Funza

Tipo densidad de viviendas	Valor
Densidad baja	30 viv/HA
Densidad Alta	100-120 viv/HA

Fuente. [32], [33]

Para efectos de calcular la población de saturación, se tomó como punto de partida el número de viviendas en el área de expansión así: La densidad a considerar, corresponde a la clasificación alta con un valor de 120 viviendas/hectárea.

4.2.7 POBLACIÓN MÁXIMA SOPORTADA PARA EL ÁREA DE EXPANSIÓN PARA EL MUNICIPIO DE FUNZA.

Los parámetros de evaluación y diseño necesarios para las obras de infraestructura contempladas en el presente proyecto, dependen de la población que se calculó con anterioridad a través de métodos de proyección de población. No obstante, se observó que el área poblada y el número de usuarios de los sistemas de acueducto y alcantarillado crecen rápidamente, por este motivo se debe establecer la población de saturación las áreas actuales de expansión del municipio definidas en el PBOT actualmente y en el año en que ocurrirá esta saturación según las proyecciones poblacionales [32], [33].

El cálculo de la población de saturación sigue la siguiente formula:

Población Saturación = Área expansión X Densidad de Viviendas x índice de Ocupación.

Para el índice de ocupación, se toma el dato de habitantes promedio por vivienda según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE determinado a través del censo poblacional del año 2018, que fue de 3.1 habitantes/vivienda [6]. Sin embargo, para efectos de diseño se tomó un valor de 4 habitantes/vivienda dando un porcentaje de amortiguación del 30%.

Desarrollando la ecuación se tiene:

$$\text{Población saturación} = 74 \text{ Ha} \times 120 \text{ viv/Ha} \times 4 \text{ Hab/viv} = 41736 \text{ habitantes}$$

Tabla 9. Población Máxima para el municipio de Funza

Municipio	Población año 2019	Población área de Expansión	Población soportada en el área de expansión
Funza	93.153	41.736	135.185

Fuente. Autor

Con base en la información anterior y en las proyecciones de población realizadas, se estima que en el año 2027 el municipio de Funza alcanzará la saturación de población como se establece la Tabla 9 de proyecciones de población donde la población proyectada para este año es de 136720 habitantes, es decir la población máxima que puede soportar el territorio según las áreas de expansión descritas en el PBOT. Teniendo en cuenta esto, para el cálculo del caudal residencial de diseño se tendrá como punto máximo considerado la población de saturación.

4.2.8 CÁLCULO DE CAUDAL DE DISEÑO Y REDISEÑO DE LAS UNIDADES CRÍTICAS TRATAMIENTO

4.2.8.1 DETERMINACIÓN CAUDALES DE DISEÑO

El caudal de aguas residuales se estima a través de los diferentes aportes a la red de alcantarillado, tales como agua residual doméstica, caudal de infiltración, agua

residual no doméstica, y caudal por conexiones erradas. Para el caso práctico del proyecto solo se tuvo en cuenta el agua residual doméstica, caudal de infiltración, y caudal por conexiones erradas ya que no se cuenta con información precisa sobre los aportes no domésticos, como los son caudales del sector industrial, comercial e institucional [25].

A continuación, se presenta el cálculo de los caudales necesarios para el diseño de la unidad de mejora del tratamiento propuesta para la PTAR del municipio de Funza Cundinamarca.

Caudal de agua residual Domestica:

Para el cálculo del agua residual doméstica es necesario conocer el coeficiente de retorno [25]. Teniendo en cuenta que en la PTAR no se cuenta con un dispositivo de medición de caudal a la entrada que permita determinar el coeficiente de retorno se tomó un coeficiente de retorno del 85% debido a que no se cuenta con un cálculo real de este coeficiente, y una dotación neta de 121 L/hab*Día.

$$QD = \frac{CR * Poblacion(hab) * Dneta}{86400}$$

$$QD = \frac{0,85 * 136720 \text{ hab} * 121 \frac{l}{\text{hab} * \text{dia}}}{86400}$$

$$QD = 162,76 \frac{L}{s}$$

$$QD = 0,162 \frac{m^3}{s}$$

Caudal de infiltración:

Debido a las condiciones topográficas del municipio de Funza, donde formaciones de acuíferos cuaternarios ocupan el 95% del área del municipio a una profundidad media de 37 metros y acuíferos superficiales cubren el 5% del territorio a una profundidad de 10 metros [40]. Por tanto, se estableció un caudal de infiltración de 0.1 L/s*ha debido a las condiciones de nivel freático y a que la red de alcantarillado tiene cuanta aun con tuberías antiguas en muchos de sus tramos.

$$QI = 0,1 \frac{L}{s} \times 400 \text{ ha}$$

$$QI = 40 \frac{L}{s}$$

$$QI = 0,04 \frac{m^3}{s}$$

Caudal de conexiones erradas:

Teniendo en cuenta que la información existente en el catastro de redes no es muy precisa acerca del aporte de caudal por conexiones erradas y que a través del diagnóstico a la red de alcantarillado se lograron identificar un número importante de conexiones erradas en la red pluvial se tomó un valor de 0.2 L/s*ha como se establece en la resolución 0330 de 2017.

$$QE = 0,2 \frac{L}{s} \times 400 \text{ ha}$$

$$QE = 80 \frac{L}{s}$$

$$QE = 0,08 \frac{m^3}{s}$$

Caudal industrial

Al igual que con la dotación residencial, el caudal industrial se calculó a partir de la información de la empresa prestadora del servicio de acueducto EMAAF ESP, que cuenta con los registros de consumo de los principales consumidores industriales del municipio. Los principales consumidores industriales del municipio de Funza se presentan a continuación:

El caudal industrial se estimó a partir del consumo de agua de los principales consumidores industriales ver Tabla 10 multiplicado por un coeficiente del 85%. Por tanto, le caudal industrial será de 26.94 L/s.

Tabla 10. Grandes Consumidores Industriales

Nombre Usuario	Consumo m3/mes	Dotación l/usuario-día	Q medio l/s
Itacol	3746	913989	31.7
Colanta	16.209		
Aje	62304		
Total	82.259		

Fuente. [41]

Caudal Medio de Diseño

El caudal medio de diseño es la suma de los caudales de agua residual doméstico, infiltración, caudal industrial y por conexiones erradas.

$$Q_M = 162,76 \frac{L}{s} + 26,95 \frac{L}{s} + 40 \frac{L}{s} + 80 \frac{L}{s}$$

$$Q_M = 309,71 \frac{L}{s}$$

$$Q_M = 0,30971 \frac{m^3}{s}$$

Caudal Máximo Horario

Para el cálculo del caudal máximo horario se realizó por medio del factor de mayoración estimada a través de las ecuaciones propuestas por Ángeles y Tchobanoglous que se presentan a continuación.

- Ecuación de Ángeles:

$$F = \frac{3,53}{QMD^{0,0914}}$$

- Ecuación de Tchobanoglous:

$$F = \frac{3,70}{QMD^{0,0733}}$$

Se obtiene como resultado un valor de F de 2.0087 y 2.430 para cada ecuación respectivamente, sin embargo, para efectos de diseño se determina tomar el valor de 2.430.

Por tanto:

$$Q_{mh} = QMD \times F$$

$$Q_{mh} = 309.71 \text{ l/s} \times 2,43$$

$$Q_{mh} = 0.75259 \frac{m^3}{s}$$

4.2.8.2 REDISEÑO TANQUE DE BOMBEO:

Teniendo en cuenta que el tanque de bombeo actual no cuenta con una sección de respaldo que permita contener el agua residual en caso de que se requiera realizar un mantenimiento en el mismo. Frente a esta condición se propuso rediseñar esta estructura para que cumpla con las especificaciones técnicas de la Resolución 0330 de 2017, permitiendo así la ejecución de mantenimientos preventivos y correctivos según sea el caso sin realizar vertimientos de agua cruda al cuerpo receptor.

La formulación matemática para el diseño de tanque de bombeo se presenta a continuación:

- El volumen del Tanque de Bombeo se define como [42]:

$$V = \frac{T}{4} \times Q_{max}$$

Dónde:

V= Volumen

Qmax= Caudal máximo horario (l/s)

Mientras T será;

$$T = \frac{3600 \text{ s}}{n}$$

Donde n = número de arranque de la bomba sumergible según su potencia.

- El tiempo de operación de las bombas sumergibles t, quien estará determinado por la siguiente ecuación [42]:

$$t = \frac{Q_{med} \times T}{L}$$

Dónde:

L= Capacidad de la bomba.

- Sugerencia de Aspiración:

La sumergencia no es otra cosa sino la profundidad a la cual deberá operar la bomba para garantizar su adecuado funcionamiento. Para determinar este parámetro es necesario la velocidad interna de conducción la cual se define como [42]:

$$V = \frac{4 \times Q}{(D_{in})^2 \times \pi}$$

A partir de ésta, se estimará la sumergencia de la bomba según la información contenida en la tabla a continuación:

Tabla 11. Sugerencia según velocidad de conducción

Velocidad (m/s)	Sumergencia (m)
0,6	0,3
1,5	0,6
2,1	0,9
3,3	2,1
4,5	4,2

Fuente. [42]

Se establece entonces que el tanque de bombeo tendrá entonces las siguientes dimensiones:

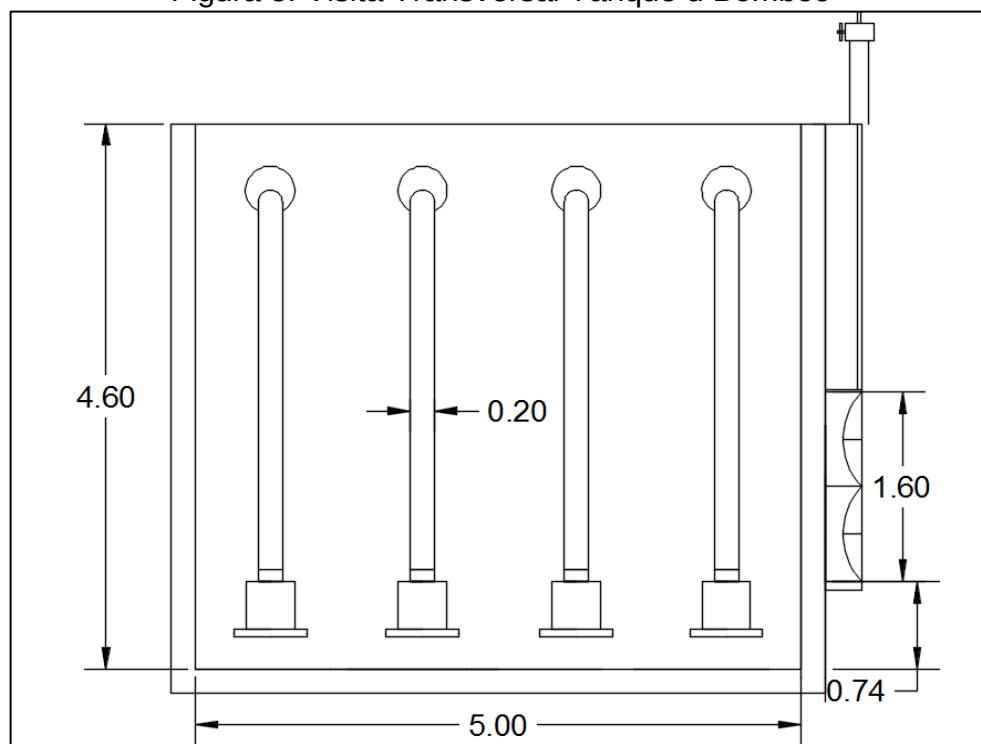
Tabla 12. Dimensiones tanque de bombeo

Dimensión	Valor	Unidad
Altura	4.6	metros
Longitud	5.0	metros
Ancho	3.8	metros

Fuente: Autor

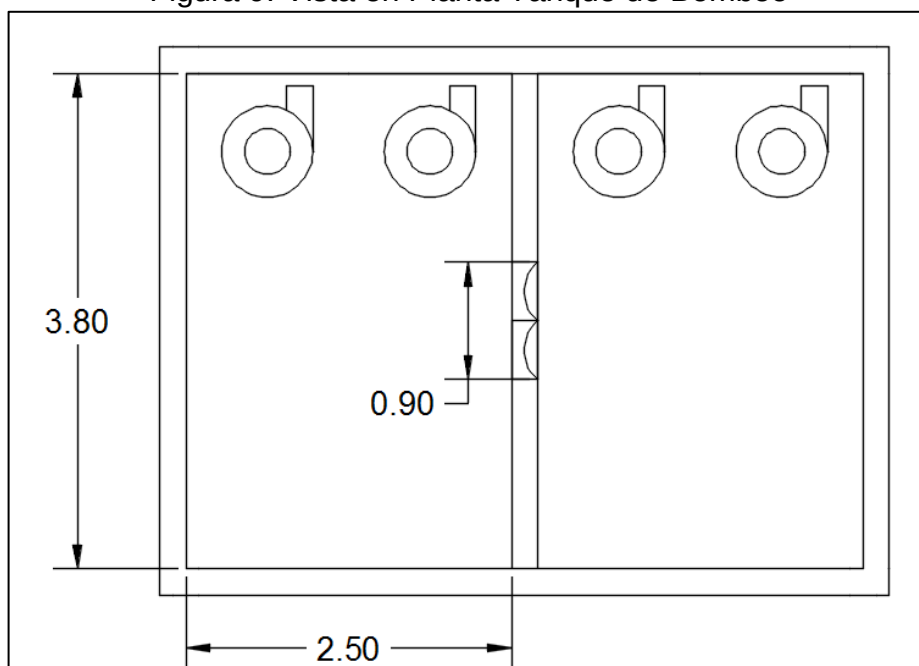
El tanque de bombeo este estará dividido en dos secciones iguales separado por una compuerta que permitirá su aislamiento en caso de que se deba realizar mantenimiento en una de las secciones del tanque como se establece en Resolución 0330 de 2017.

Figura 8. Vista Transversal Tanque d Bombeo



Fuente. Autor

Figura 9. Vista en Planta Tanque de Bombeo



Fuente. Autor

4.2.8.3 REDISEÑO SISTEMA DE CRIBADO GRUESO

Debido a que el sistema de cribado actual de la PTAR no cumple con las especificaciones técnicas necesaria y no presenta la eficiencia requerida en retención de sólidos necesaria para una correcta operación del sistema de bombeo, se decidió realizar el diseño de un nuevo sistema de cribado grueso para esta unidad.

Según la Resolución 0330 de 2017 el pozo de bombeo debe contar con dos sistemas de cribado en serie, uno con un espaciamiento entre barras de 100 mm y otro con un espaciamiento de 50 mm. Además, la inclinación máxima no debe ser mayor a los 45° para limpieza manual [25].

A continuación, se presentan las ecuaciones necesarias para su dimensionamiento

- Cálculo velocidad de llegada al pozo de bombeo [42]:

$$V_e = \frac{Q_{\max}}{S}$$

Dónde:

V_e = Velocidad de entrada del afluente

$Q_{\max}$ = Caudal Máximo

S = Área transversal de la Tubería de ingreso

Calculo de la Velocidad de paso a través de la reja [42]

$$V = V_e \times \frac{100 - G}{100}$$

Dónde:

G = Grado de colmatación.

- Calculo del ancho del canal en la zona de rejas [42]:

$$b = \left(\frac{c}{s} - 1 \right) \times (s + a) + s$$

Dónde:

b = Ancho del canal en la zona de rejas

a = Ancho de las barras.

c = Ancho del canal de entrada

s = Separación entre barras

- Determinación de Numero de barras necesarias [42]:

$$n = \frac{b - s}{a + s}$$

- Determinación de la Profundidad Útil de las barras de la reja [42]:

$$H = \frac{Q_{med}}{n^{\circ} \text{ lineas}} \times \frac{s + a}{s} \times \frac{1}{(1 - \frac{G}{100})} \times \frac{1}{b \times V}$$

- Cálculo de la Sección Útil del Canal [42]:

$$S = b \times H \times \text{sen}\theta$$

- Cálculo de velocidad de aproximación [42]:

$$V_{aprox} = \frac{Q_{med}}{S}$$

- Finalmente se determina la pérdida de Carga den la reja de cribado grueso [14]

$$h = \frac{1}{0.7} \times \left(\frac{V^2 - V_{aprox}^2}{2g} \right)$$

Aplicando cada una de estas ecuaciones obtenemos que el sistema de cribado tendrá las siguientes dimensiones:

Tabla 13. Dimensiones Sistema de Cribado con espaciamiento de 100 mm

PARÁMETRO	VALOR
Ancho	0.70 m
Altura	0.72 m
Área Útil	0.21 m
Espacio entre Barras	10 cm
Inclinación de la Reja	45°
Velocidad de paso	1.8 m
Grosor de las barras	0.02 m
Numero de barras	5

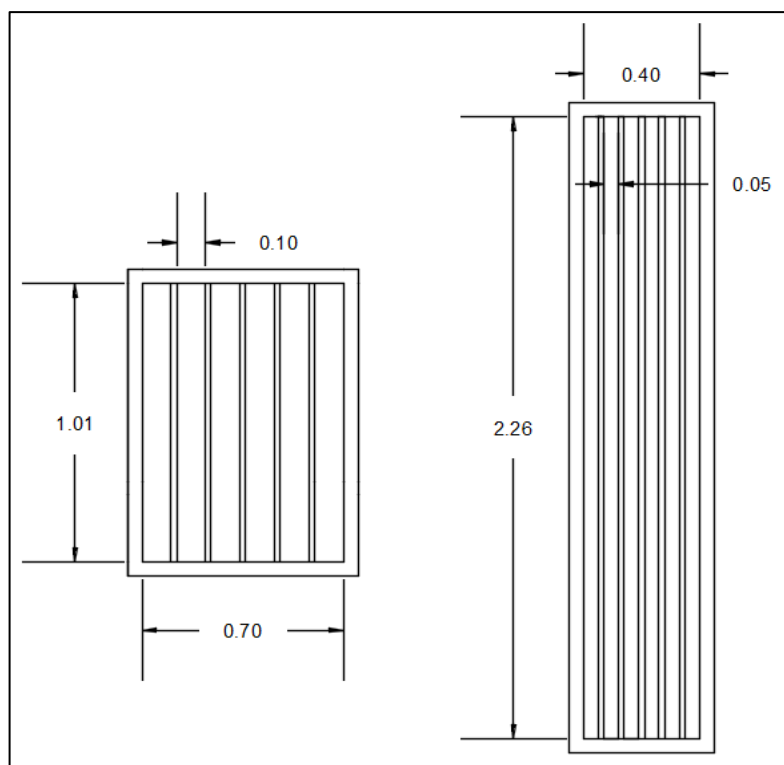
Fuente. Autor

Tabla 14. Dimensiones Sistema de Cribado con espaciamiento de 50 mm

PARÁMETRO	VALOR
Ancho	0.40 m
Altura	1.6 m
Área Útil	0.452 m
Espacio entre Barras	5 cm
Inclinación de la Reja	45°
Velocidad de paso	1.26 m
Grosor de las barras	0.02 m
Numero de barras	5

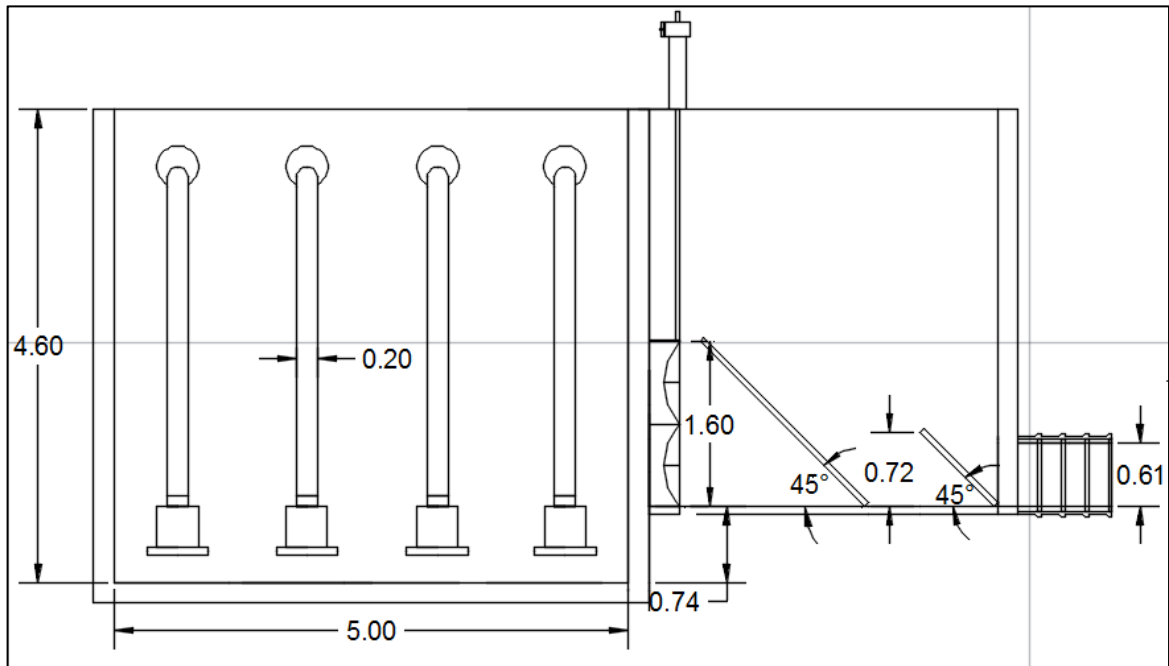
Fuente. Autor

Figura 10. Vista Transversal Rejillas de Cribado Grueso



Fuente. Autor

Figura 11. Vista de Perfil Tanque de Bombeo y Sistema de Cribado



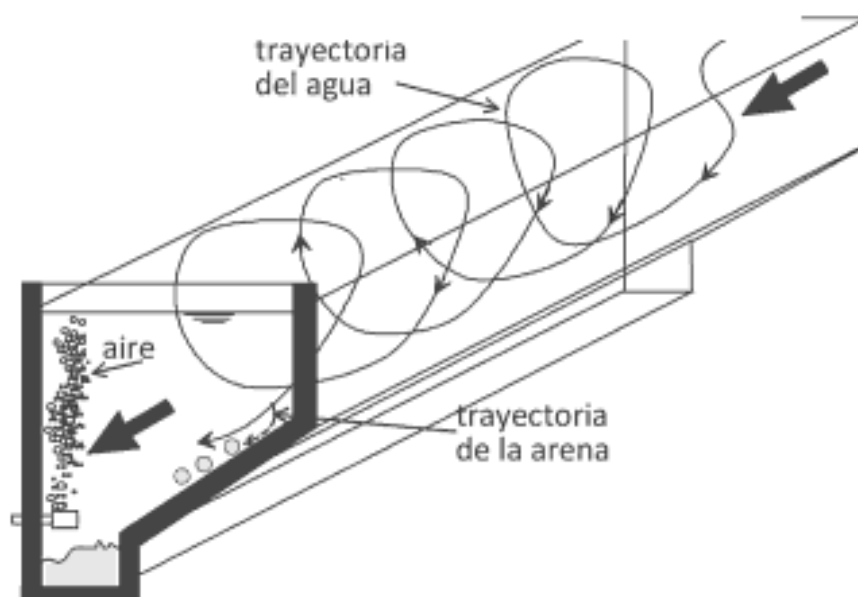
Fuente. Autor

4.2.8.4 DISEÑO DEL DESARENADOR – DESENGRASADOR

El proceso de eliminación de arenas es fundamental en el proceso de tratamiento de las aguas residuales ya que evita que se produzcan sedimentos en las unidades de tratamiento posteriores y reduce su frecuencia de limpieza y protege bombas y otros equipos contra la abrasión.

En los desarenadores desengrasadores o desarenadores aireados se inyecta aire con el fin de generar un movimiento helicoidal del agua respecto a su eje longitudinal, de manera tal que las partículas de arena más pesadas son sedimentadas y las partículas más ligeras se mantienen en suspensión y son arrastradas fuera de la unidad. Esta inyección de aire se realiza a través de difusores ubicados en el fondo de la unidad, que en conjunto con la forma del tanque condicionan la intensidad del flujo helicoidal, la aireación también provoca la ruptura de la emulsión agua-aceite, lo que permite el retiro de las grasas y aceites acumuladas en la zona tranquila separada de la zona de agitación por una barrera deflectora instalada a lo largo de la unidad a través de un puente móvil o barredor superficial [42].

Figura 12. Circulación helicoidal del agua en un desarenador aireado



Fuente. [42].

Tabla 15. Parámetro de diseño Desarenador-Desengrasador

PARÁMETRO		VALOR
Vasc a Q _{max}		< 25 m/h
V _{paso} a Q _{max}		< 0.15 m/s
TRH		> 5 min
Profundidad (h)		2 a 5 m
Longitud		7.5 – 20 m
Anchura		2.5 – 7.0
Relación longitud: anchura (L:B)		3:1 a 5:1 (4:1 típica)
Relación anchura: Profundidad (A:P)		1:1 a 5:1 (1.5:1 típica)
Caudal específico de aire (Ge) m ³ /(min*m L)		$12 \frac{m^3}{h \times m}$
Capacidad sistema de extracción de arena-agua	Separativa	5 L/m ³
	Unitaria	50 L/m ³

Fuente. [14], [42],[44]

Sumado a estos parámetros de diseño, el dimensionamiento deberá contemplar las siguientes relaciones:

The diagram shows a stepped profile with the following dimensions and constraints:

- Top width: a_{des}
- Left height: h_{des}
- Bottom width: f
- Right height: h_2
- Left height (excluding bottom step): h_1
- Bottom step width: f
- Right step height: h_2
- Left step angle: 50°
- Right step angle: 45°

Constraints:

- $1 < \frac{h}{a} < 5$
- $0,3 < h_1 < 0,8 \text{ m}$
- $0,3 < f < 0,5 \text{ m}$
- $h_2 = 0,75 \cdot h_1$

A continuación, se presentan las ecuaciones necesarias para realizar el dimensionamiento de esta unidad de tratamiento:

- $$TRH = \frac{H_{des}}{VS'}$$

- $$V_{\min} = T_{RH} \times Q_{\max}$$

- $$Q_{\max} = S_{\min} \times VS'$$

$$S_{min} = \frac{Q_{max}}{VS'}$$

- $$Garie = Ge \times L$$

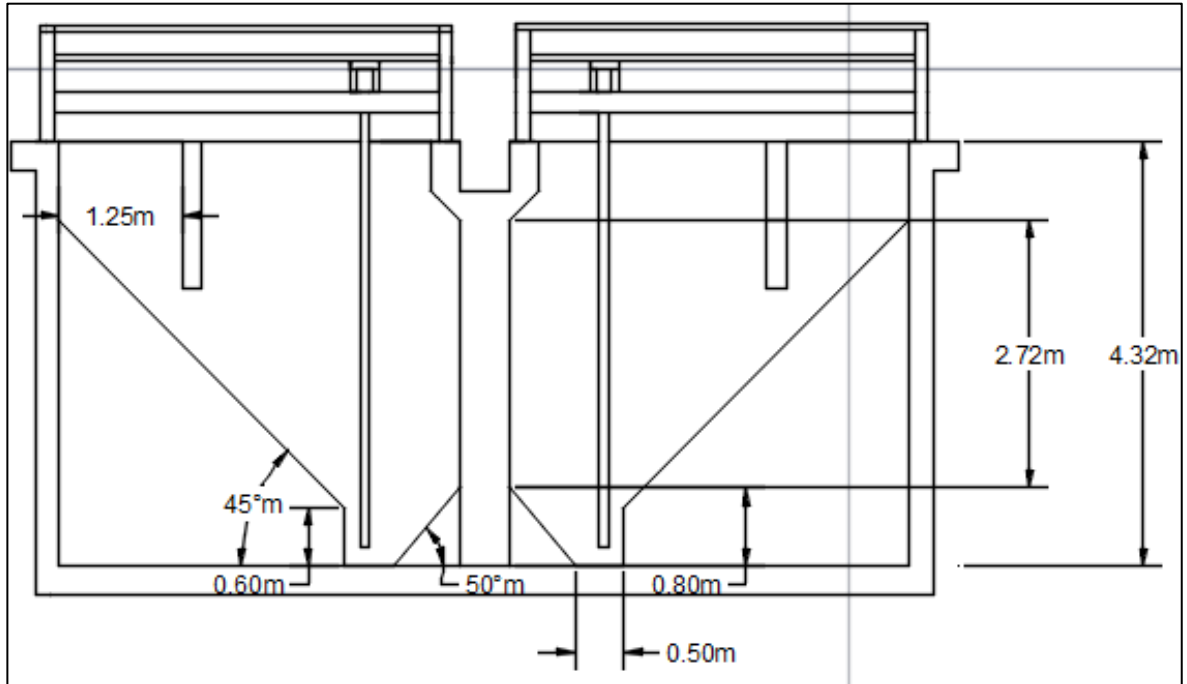
81

Tabla 16. Dimensiones Desarenador – Desengrasador

PARÁMETRO	VALOR
Vasc a Q _{max}	28 m/h
TRH	16 min
Profundidad (h)	2.72 m
Longitud	25 m
Anchura	4.08 m
Relación longitud: anchura (L:B)	4:1
Relación anchura: Profundidad (A:P)	1.5:1
H1	0.4 m
H2	0.3 m
F	0.3 m
Caudal específico de aire (Ge)	$294 \frac{m^3}{h}$

Fuente: Autor

Figura 14. Vista transversal Desarenador - Desengrasador



Fuente: Autor

4.2.8.5 PLAN DE BUENAS PRACTICAS DE OPERACIÓN:

Teniendo en cuenta los resultados del diagnóstico se determinan las siguientes acciones encaminadas a las buenas prácticas de operación del sistema de tratamiento de la PTAR del municipio de Funza:

- Verificar el correcto funcionamiento de cada uno de los componentes del sistema SBR, es decir que las bombas, válvulas, tuberías y demás equipos que componen el sistema de tratamiento estén en óptimas condiciones de operación, de manera que el sistema SBR en su conjunto opere óptimamente.
- El nivel en el Tanque de Bombeo debe ser monitoreado periódicamente para impedir que las bombas sumergibles trabajen en vacío y puedan llegar a quemarse.
- Los tiempos de cada fase de tratamiento del sistema SBR deben ser estrictamente controlados. Estos tiempos varía dependiendo si es tiempo seco o tiempo húmedo. Los tiempos de operación de cada etapa de tratamiento tanto para tiempo seco como para tiempo húmedo se describen a continuación:

Par tiempo seco:

- a) Aireación: 180 min
- b) Sedimentación: 45 min
- c) Decantación: 60 min

Tiempo húmedo:

- a) Aireación: 150 min
- b) Sedimentación: 35 min
- c) Decantación: 45 min

- El Oxígeno Disuelto en los reactores SBR durante la fase de aireación debe ser constantemente monitoreado por el operador de turno con el fin de determinar si es necesario aumentar o disminuir las revoluciones por minuto de los turbosopladores, o de ser necesario encender un turbosoplador adicional. Las concentraciones en este parámetro deben ser mayores 0.2 mg/l y menores a 3.0 mg/l para garantizar una eficiente degradación de materia orgánica.
- De igual manera el pH dentro de los reactores debe ser monitoreado regularmente para garantizar que permanezca dentro de las 6.5 y las 8.5 unidades [34].
- La purga de lodos debe llevarse a cabo cuando el valor de los SSED dentro de los reactores sea >500 ml/l [47].
- La recirculación de lodo nitrificado en la zona de reacción de los reactores SBR hacia la zona anóxica, debe realizarse únicamente en la fase de decantación y detenerse una vez culmine esta fase [47].

CONCLUSIONES

Con la ejecución del presente proyecto se infiere que existen factores externos a la PTAR del municipio de Funza, como lo son vertimientos industriales que incumplen la norma de vertimientos nacional y la no articulación entre dicha norma de vertimientos y los parámetros de diseño de la planta; los cuales son críticos para su buen funcionamiento, y por ende determinan el grado de cumplimiento de la normativa más allá de las falencias en el tren de tratamiento. Así mismo la desconfiguración del controlador lógico programable PLC conlleva a que aumenten la probabilidad de fallas humanas debidas a que las operaciones controladas por el sistema ya mencionado fueron asumidas por el personal operativo de la PTAR, conllevando a que existan problemas tales como falta de control sobre el volumen de lodo dentro de los reactores SBR, una inadecuada operación de las bombas de recirculación de lodos, variación en los tiempos de cada una de las fases de tratamiento y falencias en los demás procesos que deberían ser automáticos dentro del sistema SBR. Por otra parte, las conexiones erradas en la red de alcantarillado son una de las causas principales de la contaminación al cuerpo de agua receptor puesto que generan que es situaciones de lluvia se deba verter el agua cruda de exceso sin tratar.

Si bien los factores externos anteriormente mencionados determinan en un gran porcentaje el cumplimiento o no del permiso de vertimientos otorgado a la PTAR por la autoridad ambiental competente, las falencias evidenciadas a través del diagnóstico de funcionamiento y de la caracterización fisicoquímica del agua residual en sus diferentes etapas de tratamiento, como la falta de eficiencia en el sistema de cribado grueso, la falta de una unidad de remoción de grasas y aceites, y un sistema de desarenado sin la capacidad suficiente para tratar el caudal actual de ingreso a la planta, también son factores determinantes a la hora de dar cumplimiento a la normativa por lo cual deben ser intervenidos de manera inmediata. Por tanto, la implementación de las medidas de mejora, así como del plan de buenas prácticas de operación propuestos en el presente proyecto darían como resultado el aumento en la eficiencia de tratamiento del sistema SBR y que abordadas en conjunto con los factores externos ya mencionados darían una solución definitiva al incumplimiento de la normativa vigente.

RECOMENDACIONES

Es de suma importancia restablecer la configuración del PLC que controla cada una de los equipos y unidades que conforman el sistema SBR, con el fin de eliminar las fallas humanas y dar un óptimo control sobre cada uno de los factores que intervienen en el tratamiento biológico, así como un programa de capacitaciones para el personal operativo de la PTAR que permita la mejora sobre los procesos de operación de la PTAR. Por otra parte, se debe establecer el mantenimiento preventivo periódico tanto para equipos electromecánicos como para cada una de las unidades de tratamiento que permita garantizar el óptimo desempeño de cada una de las partes que componen el tren de tratamiento.

De igual manera es indispensable realizar la separación de los tramos de red combinada, así como la corrección de las conexiones erradas evidenciadas para eliminar el problema de sobrecarga de caudal en periodos de lluvia de manera que no solo se ataque la solución a final de tubo para el problema de contaminación por las aguas residuales municipales que termina siendo la PTAR sino también los problemas subyacentes a la planta.

Se recomienda a su vez la concertación entre el sector industrial y la EMAAF ESP. que permita la articulación de la norma nacional de vertimientos con los parámetros de diseño de la PTAR, para garantizar así que el afluente será el propicio para garantizar el cumplimiento de la resolución CAR 0736 de 2018.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. S. Pérez, J. P. Bonilla, G. I. A. Arias, and Básico, “Plan nacional de manejo de aguas residuales en Colombia.,” *Vasa*, pp. 1–36, 2004.
- [2] I. Gomez IHM, “INFORME FINAL DE DISEÑO OPTIMIZACION DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE FUNZA – CUNDINAMARCA,” no. 0469, pp. 1–129, 2013.
- [3] “Información Corporativa - EMAAF ESP Empresa Municipal de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Funza.” [Online]. Available: <https://www.emaafesp.gov.co/la-empresa/informacion-corporativa.html>. [Accessed: 17-May-2020].
- [4] E. L. M. D. E. Funza *et al.*, “ABASTECIMIENTO DE LA EMPRESA MUNICIPAL DE ACUEDUCTO , ALCANTARILLADO Y ASEO DE FUNZA — EMAAF ESP , EN EL MUNICIPIO DE FUNZA , CUNDINAMARCA , PARA UN Número del informe Dirección Localidad CONTROL DE CALIDAD DE INFORME Elaborado por Cargo : Fecha Revisado ,” 2015.
- [5] “Histórico de series hidrometeorológicas | CAR.” [Online]. Available: <https://www.car.gov.co/vercontenido/2524>. [Accessed: 17-May-2020].
- [6] “Información técnica.” [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018/informacion-tecnica>. [Accessed: 17-May-2020].
- [7] Departamento Nacional de Planeación, “Terridata (Sistema de Estadísticas Territoriales),” vol. 796, p. 23, 2014.
- [8] Superintendencia De Servicios, “Evaluación Integral de prestadores Empresa de Acueducto y alcantarillado,” pp. 1–38, 2015.
- [9] “CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA-CAR ACUERDO NÚMERO.”
- [10] Corporacion Autonoma Regional de Cundinamarca, “PERMISO DE VERTIMIENTOS RESOLUCIÓN 0736 (1). 26-03-2018.pdf.” Corporacion Autonoma Regional de Cundinamarca, Funza, pp. 1–58, 2018.
- [11] Minambiente, “Resolución 631 De 2015,” vol. 2015, no. 49, 2015.
- [12] Empresa Municipal de Acueducto Alcantarillado y Aseo de Funza, “PTAR Funza.” [Online]. Available: <https://www.emaafesp.gov.co/servicios/ptar.html>. [Accessed: 17-Mar-2019].
- [13] J. R. Buchanan and D. Ph, “Wastewater Basics 101,” 2015.
- [14] Eddy y Metcalf, *INGENIERIA DE AGUAS RESIDUALES*, 3rd ed., vol. 1. Madrid: MacGraw Hill, 1995.
- [15] I. and G. T. and H. D. S. and R. T. and F. B. Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 2014.
- [16] M. I. Orjuela Gutierrez and J. M. Lizarazo Becerra, “Sistemas De Plantas De

- Tratamiento De Aguas Residuales En Colombia,” p. 82, 2013.
- [17] Nesc, “Explaining the Activated Sludge Process,” *Pipeline*, vol. 14, no. 2, pp. 1–8, 2003.
 - [18] R. . Crites and G. . Tchobanoglous, *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. 1998.
 - [19] C. Lorena, J. Rodríguez, and P. Torres, “Tratamiento De Aguas Residuales Municipales En El Valle Del Cauca,” 2011.
 - [20] CENTA, “Manual de depuración de aguas residuales urbanas,” *Centa, Secr. Alianza por el agua, Ecol. y Desarro.*, p. 264, 2008.
 - [21] State of Michigan, “Department of Environmental Quality ACTIVATED SLUDGE PROCESS CONTROL TRAINING MANUAL FOR WASTEWATER.”
 - [22] El Agua, “Reactores biológicos secuenciales (SBR): una tecnología versátil para el tratamiento de aguas residuales industriales,” 2006. [Online]. Available: <https://www.mendeley.com/newsfeed/>. [Accessed: 11-Jan-2018].
 - [23] R. F. Poltak, “Sequencing Batch Reactor Design and Operational Considerations Manual,” *New Engl. Interstate Water Pollut. Control Comm. Massachusetts, USA*, no. September, p. 27, 2005.
 - [24] U.S.Environmental Protection Agency, “Wastewater Technology Fact Sheet: Sequencing Batch Reactors,” (*Epa 832-F-99-073*), pp. 1–9, 1999.
 - [25] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, “Resolucion 0330 "Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y seneamiento básico - RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009 ".” p. 182, 2017.
 - [26] A. P. Health and W. P. C. F. Association, American Water Works Association, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.*, 22nd ed. 2012.
 - [27] A. M. Hernandez, R. del P. Bojaca, and M. E. Duque, “Determinación de grasas y aceites en aguas por el método soxhlet,” *Ideam*, pp. 1–8, 2007.
 - [28] M. De Ambiente, “Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales,” no. 0062, pp. 1–202, 2005.
 - [29] R. Hernán, “Demanda química de oxígeno por reflujo cerrado y voluntaria,” *Inst. Hidrol. Meteorol. y Estud. Ambient.*, p. 11, 2007.
 - [30] D. B. O. Medici, “Medición de DBO Agotamiento,” vol. 49, no. 0, pp. 62–79, 1899.
 - [31] L. Orden, *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico Sistemas de Acueducto.* .
 - [32] C. I. El, M. Hoy, E. N. Día, and F. Y. Debilidades, “Plan Básico De Ordenamiento Territorial . Documento Técnico De Soporte . Consultor:,” 1999.
 - [33] M. De Funza, “PROPUESTA PARA LA REVISIÓN AJUSTE Y MODIFICACIÓN DEL PLAN BÁSICO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL (PBOT) FUNZA Volumen I: Documento Técnico de Soporte-DTS-Fase de Formulación del PBOT y del Proyecto Urbano del Centro Histórico-PUCH: 1)

- Documento Técnico de Soporte-DTS-Fase de Formulación del PBOT a) Libro 1: Componente General ENTIDAD CONTRATANTE,” 2019.
- [34] S. José *et al.*, “EFICIENCIA DE UN REACTOR BIOLÓGICO SECUENCIAL EFFICIENCY OF A SEQUENTIAL BIOLOGICAL REACTOR FOR THE TREATMENT,” vol. 14, no. 1, pp. 23–33, 2018.
 - [35] I. Gomez IHM, “Plano Tanque de Bombeo,” Funza.
 - [36] “La importancia de la separación de aceites y grasas en el tratamiento del agua residual urbana | iAgua.” [Online]. Available: <https://www.iagua.es/noticias/teqma/importancia-separacion-aceites-y-grasas-tratamiento-agua-residual-urbana>. [Accessed: 25-May-2020].
 - [37] Empresa Municipal de Acueducto Alcantarillado y Aseo de Funza, “Caracterizacion Industrias con Vertimientos no Domesticos,” Funza, 2018.
 - [38] Empresa Municipal de Acueducto Alcantarillado y Aseo de Funza, “Colector Aferente PTAR Funza Cundinamarca,” Funza, 2018.
 - [39] Empresa Municipal de Acueducto Alcantarillado y Aseo de Funza, “Catastro de Redes Municipio de Funza Cundinamarca,” Funza, 2017.
 - [40] L. M. B. VALLEJO, “ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS EN EL MUNICIPIO DE FUNZA, CUNDINAMARCA,” *Int. J. Soil Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–14, 2015.
 - [41] E. M. D. E. Acueducto, “Grandes Consumidores Industriales Municipio de Funza Cundinamarca.” Funza, 2018.
 - [42] J. M. DIAZ FERNANDEZ, *Ecuaciones y Calculos para el Tratamiento de Aguas*. Ediciones Paraninfo, S.A, 2018.
 - [43] G. Rocio and M. Benavides, “Evaluación de la Estabilidad de un sistema de Lodos Activados mediante Indicadores Fisicoquímicos y Biológicos,” *Cent. ciencias Ambient.*, p. 83, 2014.
 - [44] Joaquín Suárez López, A. J. Burgos, and P. U. Rodríguez, “FICHAS TÉCNICAS DE ETAPAS DE PROCESO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES,” vol. 53, no. 9. Universidad de la Coruña, pp. 1689–1699, 2014.
 - [45] Aurelio Hernández Lehmann, *Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas*. España: Garceta Grupo Editorial, 2015.
 - [46] A. Iguña Lopes, “Diseño y Calculo de una Estacion Depuradora de aguas residuales en la Base Naval de Rota,” Universidad de Cadiz, 2017.
 - [47] M. D. E. O. Y. Mantenimiento, “MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA S . B . R BATCH REACTOR (S . B . R .) – 309 LPS ETAPA 1 140 LPS,” 2015.

ANEXOS

ANEXO 1. RESULTADO PROYECCIONES DE POBLACIÓN

Tabla 17. . Proyección de Población por los Métodos Geométrico y Exponencial.

Año	Método Geométrico	Método Exponencial	Promedio
2018	93153	93153	93153
2019	96762	102853	99807
2020	100512	107108	103810
2021	104407	111539	107973
2022	108455	116153	112304
2023	112661	120958	116809
2024	117030	125962	121496
2025	121570	131173	126372
2026	126288	136599	131444
2027	131189	142250	136720
2028	136282	148135	142209
2029	141574	154263	147918
2030	147072	160645	153859
2031	152785	167291	160038
2032	158722	174211	166467
2033	164891	181418	173154
2034	171300	188923	180112
2035	177961	196739	187350
2036	184882	204877	194879
2037	192073	213353	202713
2038	199546	222179	210863
2039	207312	231370	219341
2040	215381	240942	228162
2041	223767	250909	237338
2042	232481	261289	246885
2043	241536	272098	256817

Fuente. Autor

ANEXO 2. MEMORIA DE CALCULO MEDIDAS DE MEJORA

Redimensionamiento Tanque de Bombeo

Debido a que las bombas del tanque actual son bombas centrifugas sumergibles, el tanque debe contar con un nivel mínimo para evitar que las bombas trabajen en vacío y puedan llegar a quemarse. Por tal razón se debe tener en cuenta el número de veces que una bomba sumergible debe encenderse en función de la potencia de la misma.

Tabla 18. . Arranques por hora en función de la potencia de la Bomba

Potencia (kW)	< 11	11 - 37	37 - 110	110 - 160	>160
n:Arranques (h ⁻¹)	12-20	10-17	8-14	7-12	5-10

Fuente. [42]

Las bombas sumergibles del sistema de bombeo actual tienen una capacidad de 103 l/s y una potencia de 41.3 kW. Debido al caudal máximo proyectado el diseño del tanque se hará pensando en la operación de dos bombas en paralelo.

Calculo del volumen del Tanque de Bombeo [42]:

$$V = \frac{T}{4} \times Q_{max}$$

Dónde:

V= Volumen

T= Tiempo de operación de la bomba (s)

Q_{max}= Caudal máximo horario (l/s)

$$T = \frac{3600 \text{ s}}{n}$$

Donde n = número de arranque de la bomba sumergible según su potencia descrita en la tabla. Para este caso el número de arranques promedio para una bomba con potencia de 41.3 kW es 10.

Desarrollando esta ecuación se tiene:

$$T = \frac{3600 \text{ s}}{10}$$

$$T = \frac{3600 \text{ s}}{10}$$

$$T = 360$$

Po tanto

$$V = \frac{360}{4} \times 752.6 \text{ l/s}$$

$$V = 67.73 \text{ m}^3$$

Debido a que operar dos bombas sumergibles en paralelo el volumen del tanque v será la mitad del volumen calculado. Sin embargo, por especificaciones de diseño descritas RAS 0330, este tanque de bombeo contara con dos secciones completamente iguales con capacidad para soportar el caudal máximo diario, permitiendo de este modo, que, en caso de mantenimiento en una de las secciones del tanque, el bombeo hacia el sistema de tratamiento continuara sin interrupción evitando de este modo que haya un vertimiento de agua cruda hacia el cuerpo de agua receptor.

A su vez, el tiempo de operación de las bombas sumergibles t está determinado por la ecuación a continuación [42]:

$$t = \frac{Q_{med} \times T}{L}$$

Dónde:

L= Capacidad de la bomba.

Entonces.

$$t = \frac{752.6 \text{ l/s} \times 360}{103 \text{ l/s}}$$

$$t = 2630.44 \text{ s}$$

Debido a que operar dos bombas sumergibles en paralelo como se menciona anteriormente este valor t será la mitad.

$$t = \frac{2630.44 \text{ s}}{2}$$

$$t = 1315.22 \text{ s}$$

Sugerencia de Aspiración:

Para determinar este parámetro es necesario conocer el diámetro interno de conducción que permitirá a su vez calcular la velocidad interna de conducción. El diámetro de las bombas Pentair Myers de 103 l/s es de 8". Conociendo este diámetro interno la velocidad de conducción se calcula a partir de la siguiente ecuación. [42]:

$$V = \frac{4 \times Q}{(D_{in})^2 \times \pi}$$

$$V = \frac{4 \times \frac{103 \text{ l/s}}{1000}}{(0.2032)^2 \times \pi}$$

$$V = 3.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Tabla 19. Sugerencia de Aspiración según velocidad de conducción.

Velocidad (m/s)	Sumergencia (m)
0,6	0,3
1,5	0,6
2,1	0,9
3,3	2,1
4,5	4,2

Fuente. [42]:

Una vez calculada esta velocidad de conducción se estima el valor de la sumergencia interpolando este valor en la tabla. El valor de sumergencia es entonces 2.0 m.

Dimensionamiento del Pozo de Bombeo

Para ello se adopta una altura de arranque de las bombas sumergibles de 1.6 m (Hp-a), esto con el fin de asegurar que las bombas nunca trabajaran en vacío.

Partiendo de esta premisa la altura total de la lámina de agua será:

$$HT = H_p - a + \text{Sumergencia}$$

$$HT = 1.6 + 2.0 \text{ m}$$

$$HT = 3.6 \text{ m}$$

Por seguridad se asume un 20% de amortiguación para la altura del pozo de bombeo, dando como resultado para la altura final del pozo 4.6 m.

- Cálculo de la Superficie mínima del pozo:

$$S_m = \frac{V_{\min}}{HT}$$

$$S_m = \frac{67.73 \text{ m}^3}{3.6 \text{ m}}$$

$$S_m = 18.81 \text{ m}^2$$

Se decide que el pozo el pozo tendrá las siguientes dimensiones:

Altura = 4.6 m
Longitud = 5.0 m
Ancho = 3.8 m

Como se menciona al inicio del dimensionamiento del pozo de bombeo este estará dividido en dos secciones iguales separado por una compuerta que permitirá su aislamiento en caso de que se deba realizar mantenimiento en una de las secciones del pozo.

Las dimensiones de cada sección serán entonces:

Altura = 4.6 m
Longitud = 2.5 m
Ancho = 3.8 m

Dimensionamiento sistema de cribado grueso

- Dimensionamiento de Cribado Grueso con espaciamiento entre barras de 100 mm:

Cálculo velocidad de llegada al pozo de bombeo [42]:

$$V_e = \frac{Q_{\max}}{S}$$

Dónde:

V_e = Velocidad de entrada del afluente

$Q_{\max}$ = Caudal Máximo

S = Área transversal de la Tubería de ingreso

Desarrollando la ecuación se obtiene:

$$V_e = \frac{0.7526 \text{ m}^3}{\pi \times \frac{d^2}{4}}$$

$$V_e = \frac{0.7526 \text{ m}^3}{\pi \times \frac{(0.6096)^2}{4}}$$

$$V_e = 2.57 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Calculo de la Velocidad de paso a través de la reja [42]:

$$V = V_e \times \frac{100 - G}{100}$$

Dónde:

G = Grado de colmatación. El grado de más usado es del 30%. (Hernandez Muñoz 1997)

$$V = 2.57 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{100 - 30}{100}$$

$$V = 1.8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Calculo del ancho del canal en la zona de rejillas [42]:

$$b = \left(\frac{c}{s} - 1 \right) \times (s + a) + s$$

Dónde:

b = Ancho del canal en la zona de rejillas

a = Ancho de las barras. Se determina que será de 20 mm

c = Ancho del canal de entrada
s = Separación entre barras

Desarrollando la ecuación:

$$b = \left(\frac{0.6096 \text{ m}}{0.1 \text{ m}} - 1 \right) \times (0.1 \text{ m} + .020 \text{ m}) + 0.1 \text{ m}$$

$$b = 0.70 \text{ m}$$

Determinación de Numero de barras necesarias [42]:

$$n = \frac{b - s}{a + s}$$

$$n = \frac{0.71 \text{ m} - 0.1 \text{ m}}{0.02 \text{ m} + 0.1 \text{ m}}$$

$$n = 5$$

Determinación de la Profundidad Útil de las barras de la reja [42]:

$$H = \frac{Q_{med}}{n^{\circ} \text{ lineas}} \times \frac{s + a}{s} \times \frac{1}{\left(1 - \frac{G}{100}\right)} \times \frac{1}{b \times V}$$

Sustituyendo:

$$H = \frac{0.30971 \text{ m}^3/\text{s}}{1} \times \frac{0.1 \text{ m} + 0.02}{0.1} \times \frac{1}{\left(1 - \frac{30}{100}\right)} \times \frac{1}{0.70 \text{ m} \times 1.8 \text{ m/s}}$$

$$H = 0.42 \text{ m}$$

Se establece un resguardo de 0.3 m por tanto la altura total de la criba será de 0.72 m

Calculo de la Sección Útil del Canal: [42]:

$$S = b \times H \times \text{sen}\theta$$

Como se menciona anteriormente por especificaciones de diseño de la Resolución 0330 de 2017 se establece una inclinación de la reja de cribado de 45°. [10]

$$S = 0.70 \text{ m} \times 0.42 \text{ m} \times \text{sen}45^{\circ}$$

$$S = 0.21 \text{ m}^2$$

Calculo de velocidad de aproximación [42]:

$$V_{\text{aprox}} = \frac{Q_{\text{med}}}{S}$$

$$V_{\text{aprox}} = \frac{0.30971 \text{ m}^3/\text{s}}{0.21 \text{ m}^2}$$

$$V_{\text{aprox}} = 1.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Finalmente se determina la pérdida de Carga den la reja de cribado grueso [14]

$$h = \frac{1}{0.7} \times \left(\frac{V^2 - V_{\text{aprox}}^2}{2g} \right)$$

$$h = \frac{1}{0.7} \times \left(\frac{(1.8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 - (1.5 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2g} \right)$$

$$h = 0.07 \text{ m}$$

- Dimensionamiento de Cribado Grueso con espaciamento entre barras de 50 mm:

Calculo de la Velocidad de paso a través de la reja [42]:

$$V = V_e \times \frac{100 - G}{100}$$

$$V = 1.8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{100 - G}{100}$$

$$V = 1.26 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Calculo del ancho del canal en la zona de rejás [42]::

$$b = \left(\frac{C}{S} - 1 \right) \times (s + a) + s$$

Dónde:

b = Ancho del canal en la zona de rejás

a = Ancho de las barras. Se determina que será de 20 mm

c = Ancho del canal de entrada
s = Separación entre barras

Desarrollando la ecuación:

$$b = \left(\frac{0.6096 \text{ m}}{0.1 \text{ m}} - 1 \right) \times (0.05 \text{ m} + .020 \text{ m}) + 0.05 \text{ m}$$

$$b = 0.40 \text{ m}$$

Determinación de Numero de barras necesarias [42]:

$$n = \frac{b - s}{a + s}$$

$$n = \frac{0.40 \text{ m} - 0.05 \text{ m}}{0.02 \text{ m} + 0.05 \text{ m}}$$

$$n = 5$$

Determinación de la Profundidad Útil de las barras de la reja [42]:

$$H = \left(\frac{Q_{med}}{n^{\circ} \text{ lineas}} \right) \times \left(\frac{s + a}{s} \right) \times \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{G}{100} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{b \times V} \right)$$

Sustituyendo:

$$H = \left(\frac{0.30971 \frac{m^3}{s}}{1} \right) \times \left(\frac{0.05 \text{ m} + 0.02}{0.05} \right) \times \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{30}{100} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{0.48 \text{ m} \times \frac{1.26 \text{ m}}{s}} \right)$$

$$H = 1.23 \text{ m}$$

Se establece un resguardo de 0.3 m por tanto la altura total de la criba será de 1.6m.

Calculo de la Sección Útil del Canal [42]:

$$S = b \times H \times \text{sen}\theta$$

Como se menciona anteriormente por especificaciones de diseño de la Resolución 0330 de 2017 se establece una inclinación de la reja de cribado de 45° [25].

$$S = 0.40 \text{ m} \times 1.024 \text{ m} \times \sin 45^\circ$$

$$S = 0.452 \text{ m}^2$$

Calculo de velocidad de aproximación [42]:

$$V_{\text{aprox}} = \frac{Q_{\text{med}}}{S}$$

$$V_{\text{aprox}} = \frac{0.30971 \text{ m}^3/\text{s}}{0.452 \text{ m}^2}$$

$$V_{\text{aprox}} = 0.685 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Finalmente se determina la pérdida de Carga den la reja de cribado grueso [14]

$$h = \frac{1}{0.7} \times \left(\frac{V^2 - V_{\text{aprox}}^2}{2g} \right)$$

$$h = \frac{1}{0.7} \times \left(\frac{(1.26 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 - (0.89 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2g} \right)$$

$$h = 0.029 \text{ m}$$

Dimensionamiento Desarenador-Desengrasador

Tabla 20. Parámetro de diseño Desarenador-Desengrasador

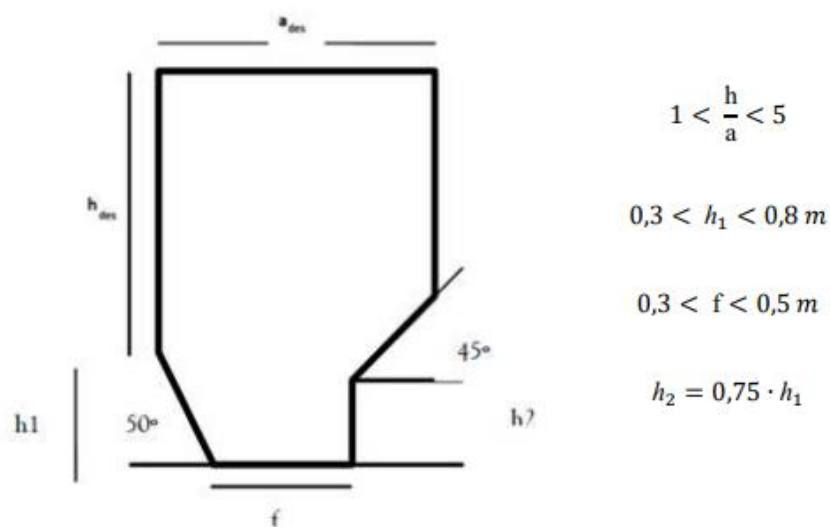
PARÁMETRO	VALOR
Vasc a Qmax	< 25 m/h
Vpaso a Qmax	< 0.15 m/s
TRH	> 5 min
Profundidad (h)	2 a 5 m
Longitud	7.5 – 20 m
Anchura	2.5 – 7.0
Relación longitud: anchura (L:B)	3:1 a 5:1 (4:1 típica)
Relación anchura: Profundidad (A:P)	1:1 a 5.1 (1.5:1 típica)

Caudal específico de aire (Ge) m ³ /(min*m L)		$12 \frac{m^3}{h \times m}$
Capacidad sistema de extracción de arena-agua	Separativa	5 L/m ³
	Unitaria	50 L/m ³

Fuente. [14], [44], [45]

Sumado a estos parámetros de diseño, el dimensionamiento deberá contemplar las siguientes relaciones:

Figura Relaciones dimensionales sección transversal



Fuente. [45]

Cálculo de velocidades de sedimentación de partículas

Tabla 21. Características de Sedimentación de Partículas

Diámetro partícula (mm)	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1	2	3	5	10
VS (cm/s)	0,2	0,7	2,3	4	5,6	7,2	15	27	35	47	74
VS' (cm/s)	0	0,5	1,7	3	4	5	11	21	26	33	
VH (cm/s)	15	20	27	32	38	42	60	83	100	130	190

Fuente. [45]

Dónde:

- d = Diámetro de la partícula de arena.
- V_s = Velocidad de sedimentación, para un fluido de velocidad horizontal nula.
- V_s' = Velocidad de sedimentación, para un fluido de velocidad horizontal V_H .
- V_H = Velocidad horizontal crítica de arrastre de la partícula depositada.

Siendo la velocidad horizontal crítica de arrastre de la partícula depositada el valor crítico de velocidad de arrastre máximo, por encima del cual las partículas sedimentadas pueden volver a estar en suspensión y son arrastradas por el efluente. Según Kalbskoff - Imhoff, las velocidades ascensionales aceptables expresadas en (m/h) varían en función del rendimiento del desarenador quedando reflejados en la siguiente tabla [45]

:

Tabla 22. Velocidades ascensionales de partículas

Velocidades ascensionales en desarenadores (m/h)			
Diámetro de partícula (mm)	Rendimientos de Sedimentación		
	100%	90%	85%
0,16	12	16	20
0,2	17	28	36
0,25	27	45	58

Fuente. [45]

Para el diseño de esta unidad se considerará un rendimiento del 90% y un diámetro de partícula de 0.20 mm obteniendo de esta manera los siguientes valores de diseño:

$$V_S = 2.3 \text{ cm/s} = 0,023 \text{ m/s}$$

$$V_S' = 1.7 \text{ cm/s} = 0,017 \text{ m/s}$$

$$V_H = 27 \text{ cm/s} = 0,027 \text{ m/s}$$

$$V_{asc} = 28 \text{ m/s} = 0,008 \text{ m/s}$$

Calculo del Tiempo de Retención Hidráulico [45]

:

$$TRH = \frac{H_{des}}{VS'}$$

Según parámetros de diseño descritos en la tabla. se establece una altura mínima de 2 m.

$$TRH = \frac{2 \text{ m}}{0.017 \text{ m/s}}$$

$$TRH = 2.0 \text{ m}$$

Se comprueba que está dentro de los parámetros de diseño especificados en la tabla.

Calculo Volumen del Desarenador

Debido a que el caudal máximo horario el cual es el caudal de diseño para esta unidad de tratamiento es considerablemente alto, se decide diseñar cuatro unidades idénticas de desarenado – desengrasado para tratar dicho caudal. Por ende, el caudal de diseño de cada unidad será 188.15 l/ s.

Se determina a través de la siguiente ecuación [45]

$$:V_{min} = TRH \times Q_{max}$$

$$V_{min} = 118 \text{ s} \times 0.18815 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_{min} = 22.2 \text{ m}^3$$

Calcula de la superficie mínima de Desarenador – Desengrasador [45]

$$:Q_{max} = S_{min} \times VS'$$

$$S_{min} = \frac{Q_{max}}{VS'}$$

Sustituyendo se obtiene:

$$S_{min} = \frac{0.18815 \text{ m}^3/\text{s}}{0.017 \text{ m/s}}$$

$$S_{min} = 11.1 \text{ m}^2$$

Teniendo en cuenta la superficie mínima del desarenador – desengrasador se recalcula el volumen del mismo a través de la siguiente ecuación [45]:

$$V_{min} = S_{min} \times H_{des}$$

$$V_{min} = 11.1 \text{ m}^2 \times 2 \text{ m}$$

$$V_{min} = 22.2 \text{ m}^3$$

Dimensionamiento del Desarenador – Desengrasador:

Este dimensionamiento se realiza teniendo como base las relaciones descritas en la tabla donde se describen los parámetros de diseño con respecto a la relación entre anchura y profundidad; y entre longitud y anchura.

Por tanto:

Tomando como partida el valor típico de relación ancho – profundidad descrito en la tabla se obtiene [45]:

$$\frac{A_{des}}{H_{des}} = x ; x = 1.5$$

$$A_{des} = 1.5 \times H_{des}$$

Teniendo en cuenta entonces que:

$$S_{min} = H_{des} \times A_{des}$$

Sustituyendo los sistemas de ecuaciones se obtiene:

$$S_{min} = 1.5 \times H^2 des$$

$$Hdes = \sqrt{\frac{11.1 \text{ m}^2}{1.5}}$$

$$Hdes = 2.72 \text{ m}$$

Se procede a determinar Ades:

$$Ades = Hdes \times 1.5$$

$$Ades = 2.72 \text{ m} \times 1.5$$

$$Ades = 4.08 \text{ m}$$

El cálculo de la longitud se realiza teniendo en cuenta la relación típica longitud – ancho como se muestra a continuación [45]
:

$$\frac{Ldes}{Ades} = Y ; Y = 4 \times Ades$$

$$Ldes = 4 \times Ades$$

$$Ldes = 16.32 \text{ m}$$

Finalmente se realiza la comprobación del volumen de la unidad que debe ser mayor al volumen mínimo calculado y posteriormente del TRH para verificar que se encuentre dentro de lo que se establece en los parámetros de diseño.

$$Vdes = Ldes \times Ades \times Hdes$$

$$Vdes = 16.32 \text{ m} \times 4.08 \text{ m} \times 2.72 \text{ m}$$

$$Vdes = 181.1 \text{ m}^3 > Vmin$$

Comprobación Tiempo de Retención Hidráulico:

$$TRH = \frac{Vdes}{Q_{max}}$$

$$TRH = \frac{181.1 \text{ m}^3}{0.18815 \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$TRH = \frac{962.52 \text{ s}}{60 \text{ s}} = 16 \text{ min}$$

Según las relaciones dimensionales de la sección transversal de la unidad de tratamiento descritas en la figura, estos parámetros son los que se muestran a continuación.

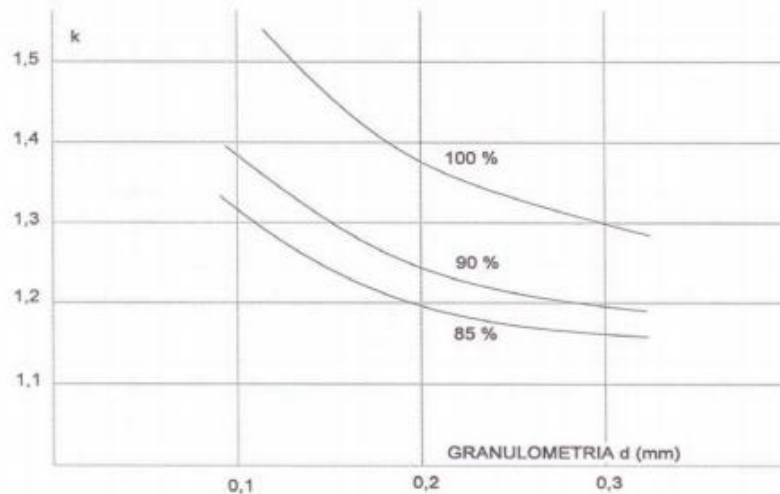
$$h_1 = 0,4 \text{ m}$$

$$h_2 = 0,4 \times 0,75 = 0,3 \text{ m}$$

$$f = 0,3 \text{ m}$$

Por último, se debe determinar el valor real del Desarenador – Desengrasador. Para esto se debe multiplicar la longitud teórica L_{des} por la constante de Kalbskopf. Dicha constante “ K_K ” se obtiene a partir de la relación del rendimiento del desarenador y la granulometría de la partícula, la cual se muestra en la figura a continuación:

Figura. Relación Rendimiento desarenado vs Granulometría



Fuente. [45]

Para este caso en específico y como se mencionó al inicio del dimensionamiento se estima un 90% de rendimiento y una granulometría de las partículas a sedimentar de 0.2 mm. Obteniendo de este modo una constante de Kalbskopf de 1.5.

$$K_k = 1.5$$

$$L_{des} = 16.32 \, m \times 1.5$$

Por tanto, la longitud final del Desarenador – Desengrasador será:

$$L_{des} = 24.48 \, m$$

Calculo del caudal de aire necesario para la unidad de tratamiento [42]:

$$G_{aire} = G_e \times L$$

$$G_{aire} = 12 \frac{m^3}{h \times m} \times 24.5 \, m$$

$$G_{aire} = 294 \frac{m^3}{h}$$

Capacidad succión bomba de extracción de arenas [42]:

Como se especifica en los parámetros de diseño para una red separada se establece una capacidad específica de 5 litros por cada m^3 de agua residual tratada en la unidad. Por tanto, la capacidad de la bomba de succión se calcula de la siguiente manera:

$$\dot{L}_{arena - agua} = \frac{5 \, L \times (0.8815 \frac{m^3}{s} \times 3600s)}{1000 \, L}$$

$$\dot{L}_{arena - agua} = 3.4 \frac{m^3}{h}$$

Siendo $\dot{L}_{arena - agua}$ el caudal succionado de la mezcla arena – agua residual.