

Maestría en Ingeniería Civil

Optimización técnica, económica y ambiental de la planta de tratamiento de agua residual del municipio de Togüí

Wilson Barón Ávila

Bogotá, D.C., 13 de marzo de 2020



**Optimización técnica, económica y ambiental de la planta de
tratamiento de agua residual del municipio de Togüí**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis
en Ingeniería Ambiental**

**María Paulina Villegas De Brigard
Director (a)**

Bogotá, D.C., 13 de marzo de 2020



La tesis de maestría titulada “Optimización técnica, económica y ambiental de la planta de tratamiento de agua residual del municipio de Togüi”, presentada por Wilson Barón Ávila, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental.

Director de la tesis
María Paulina Villegas De Brigard

Jurado
María Carolina Romero Pereira

Jurado
Jairo Alberto Romero Rojas

Bogotá, D.C., 13 de marzo de 2020

Dedicatoria

A Dios por darme la vida, la fortaleza y la perseverancia necesaria para cumplir cada uno de los sueños que he tenido.

A mis padres que con su amor, comprensión y apoyo incondicional forjaron en mí valores éticos imborrables que conservaré por siempre en mi corazón.

A todas las personas que vislumbran la educación como una herramienta fundamental en la generación de cambios positivos y duraderos en una sociedad, y que todos los días se levantan con la idea de transformar el mundo en un lugar mejor.

Con cariño Wilson.

Agradecimientos

A la Ingeniera María Paulina Villegas De Brigard, Profesora titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería, directora del trabajo de grado, por su oportuna contribución en el desarrollo de cada una de las actividades del trabajo de grado y por su desinteresado compromiso por la investigación en temáticas relacionadas con el saneamiento ambiental.

A todas las personas que conforman la empresa de servicios públicos del municipio de Togüí que con su esfuerzo y dedicación contribuyeron de manera importante en la consecución de cada uno de los objetivos planteados.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por brindar los espacios necesarios para desarrollarnos como profesionales de alta calidad además de forjarnos como personas comprometidas con el desarrollo social del país.

A todas y cada una de las personas que colaboraron de una u otra forma en el desarrollo de este proyecto, y que con su aporte contribuyeron a que el mismo tuviese éxito.

Resumen

En el año 2008 la alcaldía del municipio de Togüí realizó mejoras de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), sin embargo y de acuerdo con los estudios de identificación de las características hidrológicas y sanitarias de la cuenca del río Ubaza, además de la revisión de la eficiencia del sistema de alcantarillado del municipio elaborados por la Universidad Industrial de Santander como trabajo de grado, CORPOBOYACÁ y en 2012 la contraloría de Boyacá, se evidencian problemas tanto en la cobertura del servicio de alcantarillado como en la capacidad de operación y eficiencia de la PTAR existente por lo cual las aguas servidas son vertidas sin dar cumplimiento a la normativa vigente.

En la actualidad persisten las bajas eficiencias, los problemas de capacidad operativa y la contaminación del efluente de la PTAR. Por esta razón se realizó un estudio a fondo de la problemática del tratamiento y disposición final del agua residual en el municipio, a partir del cual se propone una alternativa de mejoramiento viable desde el punto de vista práctico, funcional, ambiental y económico que garantice a futuras generaciones satisfacer sus necesidades básicas y preservar los recursos naturales.

Índice general

Introducción	13
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo general.....	14
1.2 Objetivo específicos.....	14
2. Marco teórico.....	15
2.1 Definición de agua residual	15
2.2 Problemática en Colombia.....	15
2.3 Nuevas tecnologías en tratamiento de aguas residuales	21
2.3.1 Filtración por membranas.	21
2.3.2 Biorreactores de membrana (MBR).	21
2.3.3 Células microbianas de combustible.....	22
2.3.4 Nuevos desarrollos en los procesos de tratamiento biológico.	22
2.3.5 Nanotecnología.	22
2.3.6 Sistemas innovadores de monitoreo y control de aguas residuales.	22
2.3.7 Sistemas de tratamiento natural.	23
2.3.8 Modelado.	23
3. Marco legal colombiano	24
4. Antecedentes	28
4.1 Generalidades	28
4.1.1 Localización y características socioeconómicas.....	28
4.1.2 Climatología.	30
4.1.3 Hidrografía	30
4.1.4 Características del suelo.....	30
4.2 Condiciones actuales manejo de aguas residuales municipales	31
5. Sistema de Alcantarillado y descripción de la planta de tratamiento de agua residual (PTAR)	35
5.1 Sistema de Alcantarillado	35
5.2.1 Localización PTAR	36
5.2.2 Descripción detallada de la PTAR	38
6. Diagnóstico de la PTAR.....	43

6.1	Caracterización del afluente y del efluente.....	43
6.2	Evaluación Técnica de la PTAR	49
6.2.1	Parámetros de diseño y estado de las estructuras.....	49
6.2.2	Operación	53
6.2.3	Mantenimiento	54
6.3	Evaluación Ambiental	55
6.3.1	Listas de chequeo, control y verificación	55
6.3.2	Lista de evaluación de impactos.....	56
6.4	Producción másica y volumétrica de lodos.....	58
6.5	Evaluación Económica	59
6.6	Resumen	61
	7. Optimización PTAR.....	62
	8. Conclusiones y recomendaciones	69
	9. Bibliografía	71
	Anexos	73

Índice de tablas

Tabla 1. Cantidad de STAR por departamento año 2016.....	16
Tabla 2. Comportamiento del caudal de tratamiento de agua residual.	19
Tabla 3. Marco legal aguas residuales en Colombia.	24
Tabla 4. Parámetros y valores límites máximos permisibles en vertimientos.....	27
Tabla 5. Formaciones aflorantes en el área del municipio de Togüí	31
Tabla 6. Vertimientos puntuales	37
Tabla 7. Caracterización Afluente y Efluente	44
Tabla 8. Eficiencia del tratamiento	47
Tabla 9. Eficiencia de las unidades de tratamiento para DBO ₅	48
Tabla 10. Eficiencia de las unidades de tratamiento para DQO	48
Tabla 11. Parámetros de diseño	49
Tabla 12. Parámetros de evaluación técnica	50
Tabla 13. Resultados y criterios recomendados	51
Tabla 14. Estado de las estructuras	52
Tabla 15. Verificación actividades de operación según RAS 2017	53
Tabla 16. Verificación actividades de mantenimiento	54
Tabla 17. Clasificación de impactos	56
Tabla 18. Evaluación de impactos PTAR	57
Tabla 19. Evaluación económica del sistema	59
Tabla 20. Evaluación total del sistema	61

Tabla 21. Actividades de optimización de PTAR.....	63
Tabla 22. Valores promedio de calidad de afluente casos de estudio (UNAM).....	64
Tabla 23. Tecnologías utilizadas en Latinoamérica	65
Tabla 23. Costo de la alternativa propuesta	68

Índice de figuras

Figura 1. Caudal tratado de agua residual del 2016 por departamento (L/s).	20
Figura 2. Localización Municipio de Togüí.....	28
Figura 3. Localización Vertimientos Togüí.....	37
Figura 4. Diagrama de flujo PTAR Togüí.....	38
Figura 5. Desarenador.....	39
Figura 6. Canaleta PARSHALL.....	40
Figura 7. Reactor No.1 anaeróbico de flujo ascendente, RAFA.	41
Figura 8. Humedal.....	42
Figura 9. pH afluente vs efluente PTAR.....	45
Figura 10. Sólidos sedimentables afluente vs efluente.....	45
Figura 11. Conductividad afluente vs efluente.....	46
Figura 12. Oxígeno disuelto afluente vs efluente.....	46
Figura 13. Configuración de trenes de tratamiento representativos de la región	66
Figura 14. Diagrama de flujo Alternativa Sugerida.....	68

Índice de anexos

Anexo 1. Determinación de Variables. Afluente PTAR.....	73
Anexo 2. Determinación de Variables In-Situ. Efluente PTAR	74

Introducción

El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS 2017, establece los requisitos, parámetros y procedimientos técnicos mínimos que obligatoriamente deben reunir los diferentes procesos involucrados en la planeación, el diseño, la construcción, la supervisión técnica, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento de los sistemas de acueducto, alcantarillado y/o aseo que se desarrollen en la República de Colombia, con el fin de que garanticen su estabilidad, durabilidad, funcionabilidad, calidad, eficiencia, sostenibilidad y redundancia.(Resolución 330,2017,p.37)

De tal manera, en el municipio de Togüí se hace necesario determinar las condiciones actuales de vertimiento de las aguas residuales, porque al contar con una empresa prestadora del servicio de acueducto y alcantarillado pequeña, tienen dificultades para medir la calidad de su agua y diagnosticar los problemas, tanto ambientales como operacionales, que se puedan presentar en el sistema, debido principalmente a la falta de capacidad financiera y técnica, poniendo en riesgo la salud de la población y el desarrollo del municipio.

Debido a la obligación como Ingeniero y futuro Magister con énfasis en Ambiental de realizar un aporte productivo a la sociedad, y teniendo en cuenta el papel social que desarrolla la Escuela Colombiana de Ingeniería en la región, es pertinente y necesario contribuir en el adelanto de propuestas de saneamiento básico tanto en el ámbito municipal como regional. Es por esto que con este proyecto de grado se pretende proponer alternativas de mejoramiento viables desde el punto de vista práctico, técnico, ambiental y económico.

OPTIMIZACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL MUNICIPIO DE TOGÜÍ

Capítulo I

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Proponer una alternativa de optimización de la PTAR existente en el municipio de Togüí.

1.2 Objetivo específicos

- Realizar el diagnóstico de la PTAR del municipio de Togüí
- Formular dos alternativas para la optimización de la PTAR, según lo establecido en la normatividad vigente para el sector del agua potable y saneamiento básico.
- Analizar las alternativas propuestas de optimización de la PTAR según criterios técnicos, económicos y ambientales.

Capítulo II

2. Marco teórico

2.1 Definición de agua residual

Las aguas residuales son el resultado del uso doméstico o industrial del agua, son llamadas también negras o cloacales. El agua usada constituye un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; se les llama negras por el color que habitualmente adquieren.

Con frecuencia se diferencia entre aguas servidas y aguas residuales en el sentido de que las primeras solo provendrían del uso doméstico y las segundas corresponderían a la mezcla de aguas domésticas e industriales. (Water Technologies, 2016)

2.2 Problemática en Colombia

Según el informe “Estudio Sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado” (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, SSPD, 2017), solo 541 municipios de los 1.122 registrados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) cuentan con algún tipo de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. A continuación se presentan los datos más relevantes del informe en mención.

- **Inventario de sistemas de tratamiento de agua residual – STAR**

Para la vigencia 2016 se identificaron 696 STAR en 541 municipios del país. En la siguiente tabla se muestra la concentración de sistemas por departamento.

Tabla 1. Cantidad de STAR por departamento año 2016

Departamento	Cantidad de STAR
Cundinamarca	137
Antioquia	90
Boyacá	39
Cauca	37
Tolima	36
Santander	35
Córdoba	29
Cesar	27
Valle del Cauca	27
Casanare	26
Sucre	24
Magdalena	23
Huila	22
Bolívar	21
La Guajira	19
Norte de Santander	18
Atlántico	17
Meta	11
Putumayo	11
Arauca	9
Nariño	7
Caquetá	6
Quindío	6
Chocó	5
Archipiélago de San Andrés,	3

Providencia y
Santa Catalina

Vaupés	3
Caldas	2
Guainía	2
Vichada	2
Bogotá D.C.	1
Risaralda	1
Amazonas	0

Fuente. Tomada de SSPD, 2017.

Es importante indicar, que puede haber departamentos y municipios que carecen de infraestructura de tratamiento de agua residual, para lo cual, es la autoridad ambiental la encargada de definir los esquemas de tratamiento en función de instrumentos de planeación como los planes de saneamiento y manejo de vertimientos (PSMV), Plan de Manejo y Ordenamiento de una Cuenca (POMCA), entre otros.

- **Tecnología de tratamiento de agua residual.**

De acuerdo con la normativa técnica actual, las tecnologías de tratamiento de agua residual pueden ser agrupadas con base en el porcentaje de eficiencia de remoción de parámetros de interés ambiental o sanitario, como son las grasas y aceites, una porción de sólidos sedimentables y suspendidos, entre otros. En primer lugar, se establecen sistemas de pre-tratamiento y tratamiento primario que pueden remover hasta un 50% de la contaminación, porcentajes que pueden variar en función del parámetro de interés ambiental y las unidades de tratamiento utilizadas.

El tratamiento secundario corresponde a tecnologías más específicas que contribuyen a la remoción de materia orgánica y a otros parámetros remanentes de unidades previas, con valores de remoción hasta del 80%. Por su parte, el tratamiento de tipo terciario tiene una

remoción estimada cercana al 100% de patógenos y demás parámetros de interés ambiental, según lo establecido por la autoridad ambiental. (Superintendencia de servicios públicos domiciliarios, 2017)

En ese orden de ideas, se identificaron 18 sistemas de pre-tratamiento, 51 de tipo primario, 465 de tipo secundario, y 13 de tipo terciario. De los 149 restantes, no se reportó el tipo de tecnología utilizada.

Dados los aspectos técnicos, financieros, administrativos y normativos, la mayor parte de sistemas operan bajo tecnología secundaria, como lagunas de estabilización, lodos activados o tratamiento fisicoquímico; es decir, que operados eficientemente alcanzarían a depurar hasta un 80% de la contaminación del agua residual.

Por su parte, en los sistemas de tipo terciario, se incluyen procesos de mayor complejidad tecnológica como la utilización de rayos UV, cloración, lagunas de maduración, ósmosis inversa, entre otros, que implican mayores costos y la necesidad de contar con personal especializado. Entre los municipios que cuentan con sistemas que incorporan esta tecnología, se encuentran entre otros: Tubará en Atlántico, Chiquinquirá y Saboyá en Boyacá, La Calera y Soacha en Cundinamarca, Cumaral, Guamal y Uribe en Meta, y el Cerrito en Santander, bajo la administración de cada prestador del servicio público de alcantarillado.

- **Caudales de tratamiento de agua residual.**

Con relación a los caudales de tratamiento de agua residual, y de acuerdo con el seguimiento que adelantó la Superintendencia para las vigencias 2014, 2015 y 2016, se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 2. Comportamiento del caudal de tratamiento de agua residual.

Año	Caudal tratado (L/s)	Número de STAR con dato
2014	28.018	307
2015	25.779	172
2016	26.70610	243

Fuente. Tomada de SSPD, 2017.

Con relación al caudal tratado de agua residual para la vigencia 2016, se encontró que el 98,02% fue aportado por STAR a cargo de grandes prestadores, mientras que el restante 1,98% corresponde a pequeños prestadores. De lo anterior se puede deducir la dificultad técnica y financiera que tienen los municipios de menor tamaño para tratar sus aguas residuales.

Para efectos ilustrativos, en la figura 1 se muestra la información agregada de los caudales de tratamiento de agua residual expresados en litros por segundo (L/s) por departamento, para los municipios con STAR de los que se tiene información.

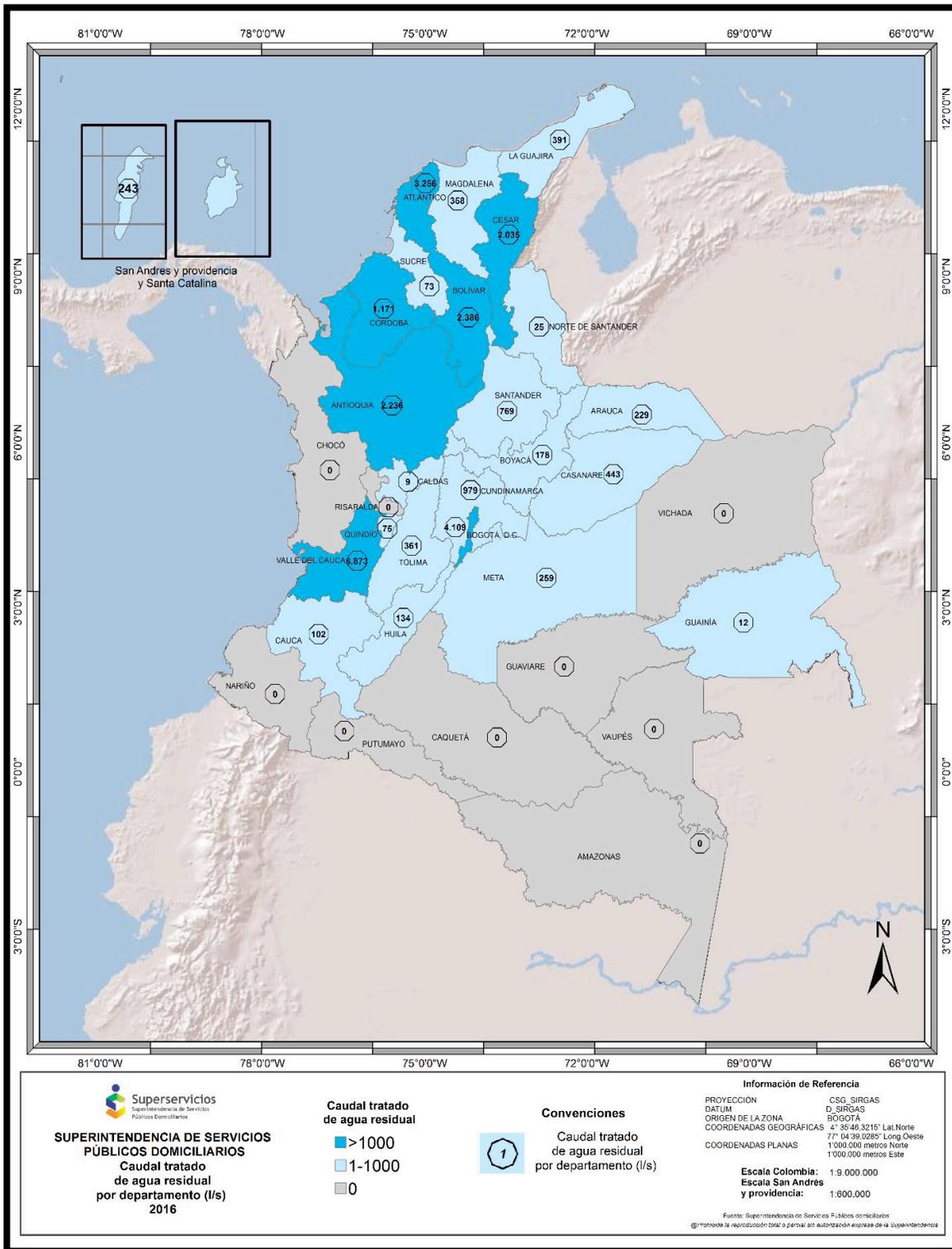


Figura 1. Caudal tratado de agua residual del 2016 por departamento (L/s). Tomada de SSPD, 2017

2.3 Nuevas tecnologías en tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con el World Water Development Report 2017, la escasez de soluciones innovadoras en el área del tratamiento de aguas residuales muestra la insuficiencia de investigación lo cual imposibilita la consolidación de nuevos y mejores tipos de tratamiento. Dentro de este informe y con el objetivo de concientizar e incentivar la investigación en el área de estudio se presenta la reseña de algunas tecnologías nuevas o en proceso de implementación masiva en el tratamiento de aguas residuales (World Water Development Report, 2017):

2.3.1 Filtración por membranas.

La tecnología de tratamiento de agua residual mediante el uso de membranas, utiliza un conjunto de técnicas que brindan beneficios medioambientales además de posibilitar la reutilización del agua para consumo humano principalmente en épocas de verano o para poblaciones que no cuenta con suficiente disponibilidad de agua para abastecer sus comunidades. El uso de procesos de membrana como ósmosis inversa, micro filtración entre otros es cada vez más común para el tratamiento terciario, especialmente en países desarrollados como Singapur, Holanda, Suecia y Estados Unidos.

2.3.2 Biorreactores de membrana (MBR).

Este tipo de tecnología es el resultado de la combinación de técnicas de degradación biológica y separación por membranas en un tratamiento de lodos activados. Los Biorreactores de membrana se destacan por ofrecer una mayor concentración de sólidos suspendidos en la mezcla y ofrecer mayor estabilidad ante sobrecargas que un tratamiento de lodos activados convencional.

2.3.3 Células microbianas de combustible.

El método de tratamiento se fundamenta en un proceso bio-electroquímico con el fin de producir energía mediante la utilización de la digestión anaeróbica, la cual imita las interacciones bacterianas que se encuentran en la naturaleza. El proceso tiene un menor costo económico en la implementación y puede reducir la cantidad de lodos sobrantes.

2.3.4 Nuevos desarrollos en los procesos de tratamiento biológico.

Este tipo de tratamientos se caracterizan por las altas eficiencias y bajos costos de inversión y operación dentro de los cuales encontramos procesos eliminación biológica de nitrógeno vía nitrito y la tecnología de lodo granular

2.3.5 Nanotecnología.

A diferencia de las tecnologías anteriormente mencionadas que han sido desarrolladas o se definen por una disciplina científica concreta, la nanotecnología comprende un amplio margen de áreas de estudio ya que en esencia se define por la escala en la que opera. En la actualidad los procesos que vinculan la nanotecnología ofrecen alternativas más económicas y eficientes en comparación con métodos tradicionales.

2.3.6 Sistemas innovadores de monitoreo y control de aguas residuales.

Dentro de los principales problemas en la operación de sistemas de tratamiento de agua residual encontramos la ausencia de monitoreo, por tal motivo uno de los avances más prometedores para la solución de esta problemática se encuentra en la incorporación de técnicas de monitoreo con nuevos sensores, dispositivos de telemetría y herramientas computacionales que permitan en tiempo real el análisis de Carbono orgánico Total (TOC), fósforo y nitrógeno total y cromatografía de gases acoplada a masas entre otros.

2.3.7 Sistemas de tratamiento natural.

Los sistemas de humedales son cada vez más atractivos como soluciones naturales para complementar las limitaciones tecnológicas existentes. Dentro de las ventajas de este tipo de proceso encontramos ahorro energético y personal de operación además de no producir olores ofensivos.

2.3.8 Modelado.

El modelado de los sistemas de tratamiento de agua residual permite gracias a los recientes avances en microbiología y bioquímica y la amplia capacidad en hardware y software para el tratamiento de datos la predicción de cargas contaminantes y se convierte en una herramienta fundamental en el control de los procesos de tratamiento.

Capítulo III

3. Marco legal colombiano

Durante décadas el gobierno Colombiano ha encaminado sus esfuerzos en el desarrollo de un marco normativo relacionado con la gestión y tratamiento de aguas residuales, para lo cual diferentes sectores como el sector salud, agua potable, saneamiento básico y medio ambiente han intervenido en su regulación.

De la interacción de los diferentes sectores se han desarrollado distintos tipos de normas y son diversos los actores que emiten dichas políticas; en un comienzo fue la Presidencia de la República que mediante decreto ley en 1974 introdujo en el marco legal ambiental el código Nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente, posteriormente en 2008 el Ministerio de Medio Ambiente reguló los lineamientos técnicos para registro y permiso de vertimientos y en 2015 recopiló la extensa normativa vigente en un decreto único que reglamenta el sector ambiente y desarrollo sostenible entre otros, hasta llegar en 2018 a la resolución por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas marinas, y se dictan otras disposiciones.

A continuación se señala la normativa más relevante en el campo de tratamiento de aguas residuales en Colombia:

Tabla 3. Marco legal aguas residuales en Colombia.

NORMA	RESUMEN	ENTIDAD
DECRETO LEY 2811 DE 1974	Dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente	Presidencia de la República
DECRETO 1594 DE 1984	Reglamenta usos del agua y residuos líquidos. Derogado por el Decreto 3930 de 2010.	Presidencia de la República

DECRETO 1600 DE 2005	Reglamenta el sistema nacional ambiental, SINA	MAVDT
NTC-ISO/IEC COLOMBIANA 17025 DE 2005	Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.	ICONTEC
DECRETO 2570 DEL 2006	Adiciona el Decreto 1600 de 1994 y se dictan otras disposiciones sobre el análisis de características físicas, químicas y biológicas en laboratorios acreditados por el IDEAM o en proceso de acreditación.	MAVDT
RESOLUCIÓN 3180 DE 2008	Lineamientos técnicos para registro y permiso de vertimientos	MAVDT - SDA
DECRETO 3930 DE 2010	Reglamenta usos del agua y residuos líquidos	MAVDT
DECRETO 4728 DE 2010	Modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010, frente a la norma de vertimientos, protocolos de monitoreo de vertimientos y planes de cumplimiento.	MAVDT
RESOLUCIÓN 292 DE 2013	Establece criterios de aceptación de la información cuantitativa, física, química y biótica para los estudios o análisis ambientales requeridos por las autoridades ambientales competentes, e información de carácter oficial relacionada con los recursos aire y suelo, y el procedimiento de verificación del cumplimiento de dichos criterios.	IDEAM
DECRETO 1076 DE 2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible	MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE
RESOLUCIÓN 631 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	MINISTERIO DE AMBIENTE Y

	sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.	DESARROLLO SOSTENIBLE
RESOLUCIÓN 330 DE 2017	Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS	MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO
RESOLUCIÓN 884 DE 2018	Requisitos técnicos para los proyectos de agua y saneamiento básico de zonas rurales	MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO
RESOLUCIÓN 883 DE 2018	Por la cual establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas marinas, y se dictan otras disposiciones.	MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO

Fuente. Autor

La constitución colombiana establece dentro de las obligaciones del Estado prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental. De tal manera, la inspección y vigilancia de los vertimientos realizados directa o indirectamente a cuerpos de agua superficial se realiza mediante la utilizando de diferentes instrumentos legales, dentro de los cuales se puede destacar la resolución 631 de 2015 (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible) mediante 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.

En la tabla No. 4 se señalan los parámetros fisicoquímicos generales y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales según lo establecido en la resolución 631 de 2015:

Tabla 4. Parámetros y valores límites máximos permisibles en vertimientos

PARÁMETRO	UNIDADES	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD) ¹	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD), Y DE LAS AGUAS RESIDUALES (ARD-ARND) ²
Ph	Unidades de pH	6 a 9	6 a 9
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	200	180
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂		90
Sólidos suspendidos Totales (SST)	mg/l	100	90
Sólidos sedimentables (SSED)	mL/L	5	5
Grasas y Aceites	mg/l	20	20
Sustancias Activas al Azul de Metileno			Análisis y Reporte

¹ Aguas residuales domésticas (ARD) de las soluciones individuales de saneamiento de viviendas unifamiliares o bifamiliares

² Aguas residuales domésticas (ARD), y de las aguas residuales (ARD-ARND) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales con una carga menor o igual a 625 kg/día DBO₅

Fuente. Tomada del Art. No.8 de la Resolución 631,2015.

Capítulo IV

4. Antecedentes

4.1 Generalidades

4.1.1 Localización y características socioeconómicas.

El municipio de Togüí se encuentra ubicado aproximadamente a 60 km de Tunja (Capital del departamento de Boyacá) y 210 km al Norte de Bogotá. El municipio se encuentra ubicado a 12 km de la vía nacional Tunja –Bucaramanga. La extensión total del municipio es de 156 km²

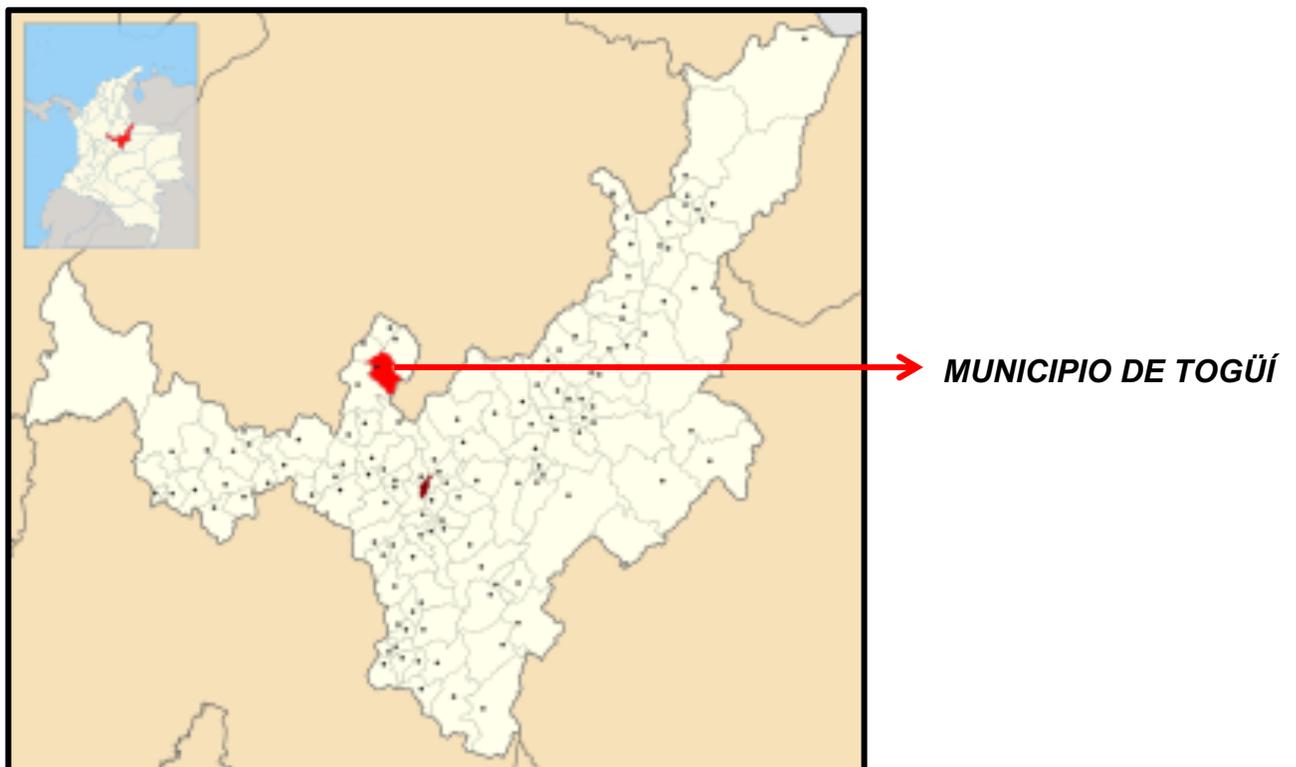


Figura 2.Localización Municipio de Togüí. Esquema de Ordenamiento Territorial de Togüí, año 2008

Limita al norte con San José de Pare y Chitaraque, al Oriente con Chitaraque y Santander, al sur con Moniquirá y al Occidente con Moniquirá y San José de Pare. El casco urbano del municipio de Togüí y de acuerdo a lo señalado en EOT del municipio se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas geográficas: Latitud: X=1.148.387; Longitud: Y=1.062.438 (Esquema de Ordenamiento Territorial de Togüí, año 2008).

Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística, (DANE) para el año 2005, el municipio de Togüí presentaba una población total de 5.229 habitantes, de los cuales el 80.58% viven en el área rural (4214) y el 19.42%(715) en el área urbana, la densidad demográfica de 87,12 hab/Km², La densidad de la población urbana es de 500 hab/Km². La población que registra según estadísticas del SISBEN 2007 es de 5715 habitantes, de los cuales 4946, es decir el 86,5% residen en el área rural y el 13,5 % residen en el área urbana.

El municipio de Togüí tiene un puesto de salud con mínimas condiciones de atención y carente de unas instalaciones adecuadas para la prestación del servicio, En cuanto a atención de hospitalaria, la comunidad debe acudir al hospital regional de Moniquirá (Nivel 2) inaugurado en el año 2019.

Se cuenta con 12 escuelas de educación básica primaria distribuidas en el perímetro urbano y rural además de un colegio de básica secundaria. La edad escolar en promedio se encuentra entre 5 y 18 años, según datos de la alcaldía municipal la población en edad escolar corresponde al 31.26% de la población total.

La principal actividad en el municipio es el cultivo de caña de azúcar con el objetivo de producir panela y miel, productos característicos de la zona; en menor medida se cuenta con pequeños cultivos de café y yuca. Debido a la cercanía a poblaciones de mayor tamaño como Moniquirá (Boyacá) y Barbosa (Santander) las actividades económicas se ven reducidas a pequeñas tiendas y restaurantes, sin embargo es importante destacar que la principal fortaleza del municipio en el ámbito económico radica en el turismo, cuenta con piscinas naturales en las principales fuentes hídricas además del atractivo paisajístico propio de la zona.

4.1.2 Climatología.

El clima predominante es semi húmedo y semiárido, varía según la época del año. Este tipo de climas se caracterizan por localizarse entre los 1500 y 2000 metros, corresponde a temperaturas medias diarias de 12°C a 24°C.

Precipitación: Para el análisis de la precipitación, se emplearon datos suministrados por el IDEAM, obtenidos por observaciones en un periodo de 20 años (1988-2008) de la estación Gambita, que rodea el área de estudio, con una precipitación promedio anual de 630 mm a 842 mm.

Temperatura: El clima presente en la región y de acuerdo a los datos de la estación Gambita varían entre 15.8°C de temperatura mínima y máxima de 19.9°C, durante todos los meses se presentan un promedio de temperatura de 18,1°C (IDEAM, 2009).

4.1.3 Hidrografía

Los principales ríos que riegan al municipio de Togüí son el río Togüí y el río Ubaza. La orientación del curso de los ríos es NW – SE, el patrón de drenaje es paralelo y subdendritico para el río Ubaza y sus afluentes. El agua de escorrentía es un factor que ayuda en la aceleración de la erosión, para el municipio de Togüí este fenómeno no se presenta con realce en ningún sector. La mayor parte del agua recorre el municipio por cauces naturales con densidades de drenaje media y baja. Para el resto del municipio se presenta un patrón de drenaje subdendritico a excepción de la vereda Carare que presenta un drenaje de tipo paralelo, típico sobre las rocas de la formación Cumbre.

4.1.4 Características del suelo

A nivel geológico, en la zona existe la presencia de dos fallas regionales y una local, que varían la secuencia estratigráfica presente. Las dos fallas regionales que se enuncian, una la Falla de Togüí y la otra la Falla de Carare, conforman una estructura geológica denominada Horst. La falla de tipo local encontrada en la zona urbana se denomina Falla del río Ubaza.

Desde el punto de vista estratigráfico en el municipio de Togüí se encuentran rocas de los sistemas Jurásica y Cretácica cubiertas por sedimentos cuaternarios. La secuencia estratigráfica aflorante en el área de estudio hace parte de la serie Jurásico - Cretácico y Terciaria, junto con los depósitos discordantes cuaternarios. Las principales formaciones que componen la geología del municipio se encuentran descritas en la tabla 5.

Tabla 5. Formaciones aflorantes en el área del municipio de Togüí

FORMACIÓN	MIEMBRO	NOMENCLATURA ESTRATIGRAFICA	UNIDAD CRONOLOGICA
San Gil inferior (Tablazo)		Kit	Cretácico
Paja	Arcilloso	Kimp	Cretácico
	Arenoso	Kimpa	Cretácico
Ritoque		Kiri	Cretácico
Rosa Blanca		Kir	Cretácico
Cumbre		Kic	Cretácico
Arcabuco	Techo	Jart	Jurásico
		Jar	Jurásico

Fuente. E.O.T., municipio de Togüí, 2000

4.2 Condiciones actuales manejo de aguas residuales municipales

Uno de los principales objetivos del estado colombiano es dar solución a las necesidades básicas insatisfechas, entre las que se encuentran el acceso a los servicios de acueducto y alcantarillado, fundamentales para la vida humana. Dentro de las políticas institucionales de los municipios deben establecerse las características de suministro de agua domiciliaria y de igual forma especificar los mecanismos de tratamiento y disposición final de las aguas

residuales teniendo en cuenta el cumplimiento de la normatividad vigente, de tal manera que cuando no se cuenta con un servicio que cumpla con las especificaciones mínimas se hace necesario plantear las soluciones pertinentes con el fin de garantizar un desarrollo sostenible.

De acuerdo con la información consultada y disponible con relación al funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del municipio de Togüí, se pudo definir que, a pesar de las inversiones presupuestales efectuadas por las entidades municipales y departamentales, no ha sido posible poner en funcionamiento óptimo la PTAR mencionada, lo que viene ocasionado una serie de afectaciones ambientales y sociales en la región.

Del estudio de “identificación de las características hidrológicas y sanitarias de la cuenca del río Ubaza, en los municipios de Motavita, Cómbita, Arcabuco, Moniquirá, Togüí, Chitaraque y San José Pare”, llevado a cabo por estudiantes de química de la Universidad Industrial de Santander (Santander, Toloza, 2010), se resaltan los siguientes resultados:

- El brazo derecho del río Ubaza en zona de la PTAR Togüí tiene un caudal de 0.6 L/s. El efluente de la PTAR de Togüí es descargado en el brazo derecho del río Ubaza con una carga contaminante de 3.85 kg DBO /d.
- El Río Togüí en la parte baja del casco urbano del municipio del mismo nombre Tiene un caudal de 0.1 L/s. Las aguas residuales municipales que no van a la PTAR, son descargadas directamente al río por medio de un tubo de PVC de 5”.

El estudio mencionado llevado a cabo en el año 2010, presentó los resultados técnicos sobre las cargas contaminantes depositadas en los ríos Ubaza y Togüí, mostrando en su momento la ineficacia de la PTAR del municipio de Togüí. Ineficacia que fue reiterada en el informe de la contraloría de Boyacá para el periodo 2012-2013, en el cual se manifiestan problemas con la capacidad de operación y eficiencia de la PTAR existente por lo cual las aguas servidas son descargadas sin ningún tipo de tratamiento al río Togüí ocasionado graves problemas de contaminación hídrica.

La Corporación Autónoma Regional de Boyacá, Corpoboyacá, en compañía del Ministerio de Vivienda ha efectuado visitas de acompañamiento técnico a la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Togüí con el fin de lograr un diagnóstico y posibles soluciones para la operación de la PTAR, sin embargo y de acuerdo con la información obtenida, dichas soluciones o no han sido implementadas o no han logrado los resultados óptimos esperados. Tomando como base lo anteriormente descrito es como se fundamenta la necesidad de realizar un estudio que permita presentar una propuesta de optimización de la PTAR del municipio, la cual debe ajustarse a la reglamentación vigente aplicable.

La propuesta de mejoramiento se enfoca en optimizar cada uno de los procesos básicos del tratamiento de aguas residuales, como son la recolección, el tratamiento propiamente dicho y la disposición final de las aguas residuales ya tratadas, por lo cual se formularán alternativas viables técnica, ambiental y económicamente, ajustadas a las necesidades propias del municipio de Togüí.

Con relación al proceso de tratamiento de aguas residuales, se buscará minimizar lo más posible las cargas contaminantes y sus efectos en el medio ambiente, mediante la mejora de los diversos procesos de tratamiento (Romero, 2010), los cuales se resumen básicamente en:

- Un sistema para retención y remoción de los sólidos y partículas de gran tamaño (basuras) que salen del drenaje junto con las aguas residuales.
- Un desarenador y preaireador como tratamiento previo a la sedimentación primaria.
- Un sedimentador primario que separe las partículas sólidas que se asientan fácilmente (sólidos sedimentables)
- Un sistema biológico para el tratamiento secundario y otra serie de procesos auxiliares, necesarios para lograr un agua de la calidad deseada.
- Un sistema de desinfección antes de que el efluente sea integrado al medio ambiente.

Dentro de la información disponible con relación a la optimización de plantas de tratamiento de aguas residuales, con respecto al estado de las PTAR en Colombia, de la monografía denominada Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia, elaborada por estudiantes de la especialización en administración en salud pública, de la

Universidad Nacional de Colombia. (Lizarazo, Orjuela, 2013), se resaltan las siguientes conclusiones:

- Las remociones en sólidos totales y en carga contaminante no necesariamente responden a la normatividad establecida. La falta de control y seguimiento a los procesos y la carencia de mantenimiento en los sistemas hacen que las remociones se realicen por debajo de los estándares.
- Las empresas prestadoras del servicio incumplen las normas de vertimiento de aguas residuales, desconocen el protocolo de operación, no hacen el mantenimiento adecuado a la infraestructura y son vulnerables a fenómenos naturales. A esto se suman las deficiencias.

Tales conclusiones muestran un panorama poco alentador con relación a políticas Nacionales enfocadas al tratamiento de aguas residuales en las cuales, según lo manifestado por los autores del trabajo, no se cumple la normatividad, generando grandes afectaciones en las fuentes hídricas y su entorno natural. Lo anterior sustenta la necesidad de ejecutar estudios detallados de optimización de las PTAR existentes, en este caso la PTAR del Municipio de Togüí.

Capítulo V

5. Sistema de Alcantarillado y descripción de la planta de tratamiento de agua residual (PTAR)

5.1 Sistema de Alcantarillado

El tipo de alcantarillado del municipio de Togüí es combinado, ya que a la red llegan aguas residuales de origen doméstico, comercial e institucional, las aguas pluviales captadas en los patios y techos del interior de las viviendas y las aguas de escorrentía de los techos que dan al exterior y son recogidas por los sumideros instalados en las vías.

- **Colectores**

La tubería es de concreto de ocho pulgadas de diámetro; por las características de Togüí el sistema drena las aguas en dos sentidos contrarios, donde están ubicadas una PTAR y un tanque séptico. Toda la red tiene una extensión aproximada de 2,061 km., drenando un área de alrededor de 43.6 hectáreas. Uno de los principales problemas del alcantarillado de la cabecera es que recoge también buena parte de las aguas lluvias, lo que hace que en épocas de aguaceros torrenciales el alcantarillado se desborde y ponga en serio riesgo el funcionamiento de los sistemas de tratamiento.

En el área urbana existen 14 usuarios que no tienen disponibilidad del servicio de alcantarillado y conducen las aguas residuales domésticas a pozos sépticos o cajas de aguas lluvias. La vida útil remanente del colector existente más antiguo es de diez años por lo cual su remodelación se realizaría a partir del año 2019.

- **Pozos de inspección**

Los pozos de inspección del sistema de alcantarillado son de tres tipos: de inicio de tramos, de intersección de tramos y de cambio de dirección.

De los veintiséis (26) pozos observados, ninguna de las tapas cumple con los requerimientos de ventilación y diseño pues sus orificios se encuentran tapados, la mayoría tienen tapas construidas en concreto con aro tapa en hierro fundido y ninguna posee gancho.

- **Sumideros**

Estas estructuras se diseñan con el fin de captar la escorrentía superficial. En el municipio los sumideros se localizan en las esquinas o en la parte lateral de las vías.

En el municipio de Togüí la red de alcantarillado posee 8 sumideros esquineros y 2 sumideros de calzada construidos en mampostería y pañete con mortero. Todos tienen rejillas removibles fabricadas en hierro fundido, todas se encuentran deterioradas y requieren un mantenimiento.

5.2.1 Localización PTAR

La disposición final de las aguas residuales domésticas en el área urbana del municipio de Togüí se realiza en cuatro vertimientos puntuales como se observa en la tabla No. 6, de los cuales dos descargan al río Togüí y los otros dos al río Ubaza. El primer vertimiento se identifica con (V1) y corresponde a la descarga de la PTAR la cual se encuentra localizada en la manzana 24 en el sitio conocido como el Vivero Municipal. Las aguas son conducidas por el emisor uno (E1) desde la caja de salida de la PTAR hasta el río Ubaza, en una distancia aproximada de 29 metros; la descarga final se hace por una tubería de concreto de 8 pulgadas de diámetro; a este vertimiento llegan las aguas residuales domésticas de 176 viviendas.

Se tienen 2 vertimientos (tabla No.6) identificados con (V3) y (V4) que no cuentan con identificación de caudal, debido a que el municipio los considera “menores e intermitentes”.

Tabla 6. Vertimientos puntuales

No.	Identificación del vertimiento	Ubicación Coordenadas		Altura (MSNM)	Número de viviendas	Caudal L/s	Diámetro de descarga (Pulgadas)
		x	y				
V1	PTAR	10316667.38	1805147.170	1638	176	3,2	8
V2	Tanque Séptico	1025071460	1712198.30	1595	23	0,5	8
V3	Salida a Chitaraque	10250472.79	1770936.080	1614	2		8
V4	Salida Vía Monquirá	10312314.22	1795569.110	1650	7		8

Fuente. Manual de mantenimiento PTAR Togüí, 2014

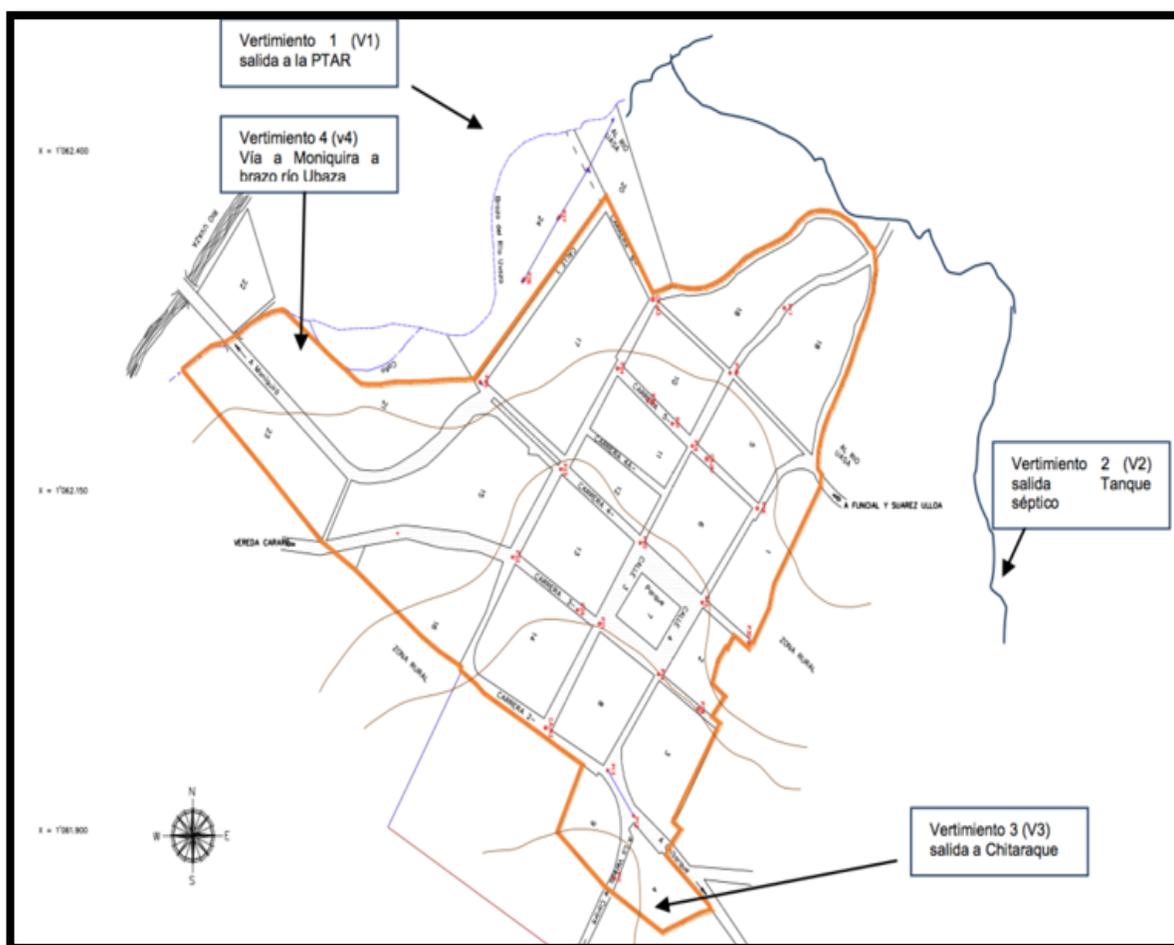


Figura 3.Localización Vertimientos Togüí. Plan de saneamiento y manejo de vertimientos, 2009.

5.2.2 Descripción detallada de la PTAR

El sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas comprende una serie de estructuras distribuidas en dos líneas de tratamiento con capacidad de tratar un caudal de 4.0 L/SL/s. Dentro de las estructuras que conforman la PTAR encontramos un sistema de cribado, canal de aproximación, desarenador y a partir de la canaleta Parshall el sistema de tratamiento se divide en dos líneas que manejan un caudal de 2.0 L/s cada una. Cada línea cuenta con sedimentador, tanque Imhoff y reactor anaerobio de flujo ascendente, RAFA para finalizar en un humedal. A continuación, se describen cada una de las estructuras que componen el sistema de tratamiento.

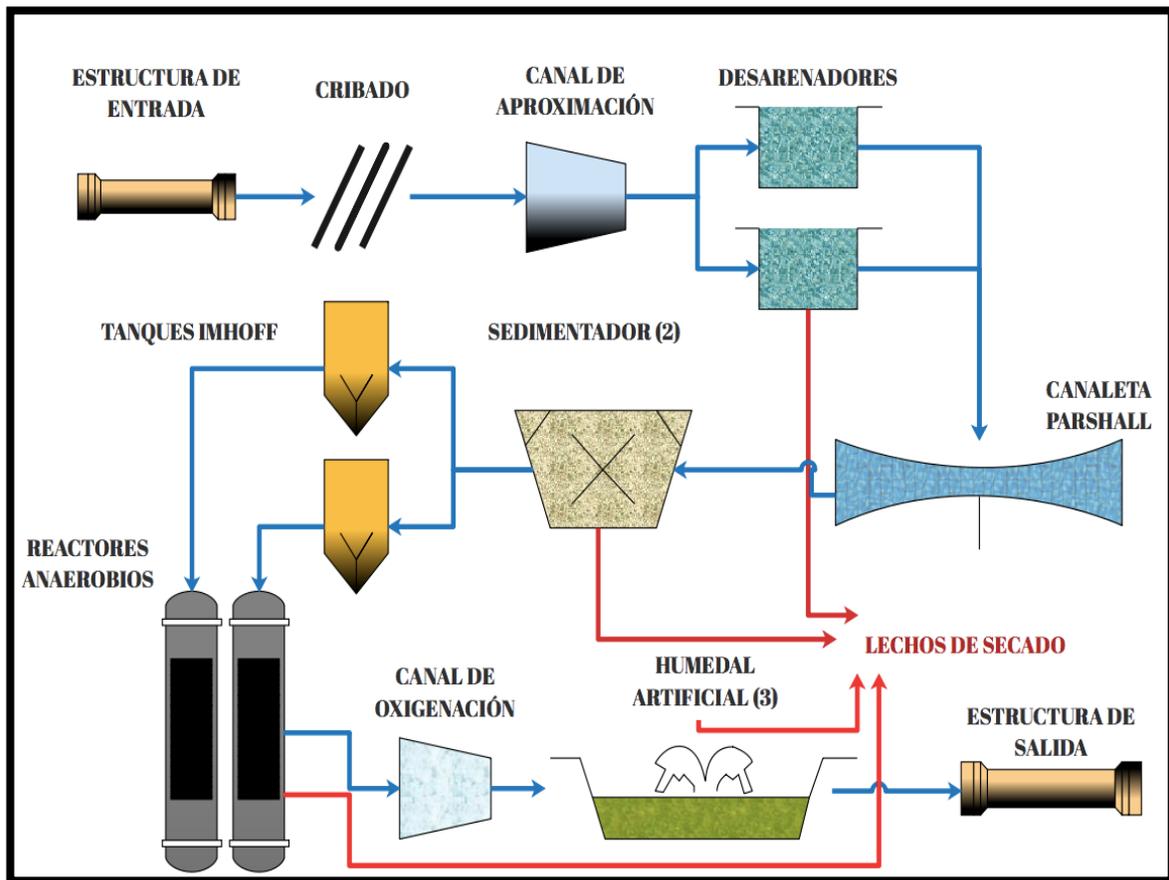


Figura 4. Diagrama de flujo PTAR Togüí. Autor.

- **SISTEMA DE CRIBADO:** garantiza la retención de los sólidos gruesos a través de un sistema de rejillas en acero inoxidable.
- **CANAL DE APROXIMACIÓN:** tiene como función controlar la velocidad de entrada del agua a la planta.
- **DESARENADOR:** tiene como objetivo retener la arena que pueden traer las aguas servidas.



Figura 5. Desarenador. Alcaldía de Togüí, 2019.

- **CANALETA PARSHALL:** Sistema utilizado para aforar el caudal de la planta de tratamiento, construida en fibra de vidrio con una garganta de 2 pulgadas.



Figura 6. Canaleta PARSHALL. Alcaldía de Togüí, 2019.

- **SEDIMENTADORES:** son dos módulos circulares en paralelo de diámetro 3 metros y una profundidad de 3,5 metros en fibra de vidrio y tienen como función garantizar la sedimentación de sólidos suspendidos.
- **TANQUES IMHOFF:** Son dos estructuras en paralelo que trabajan en forma independiente facilitando su mantenimiento. Comprenden un sistema de entrada, zona de sedimentación primaria, zona de homogenización, y zona de salida cada uno.
- **REACTORES ANAERÓBICOS DE FLUJO ASCENDENTE, RAFA:** El reactor está dividido en dos espacios, uno inferior en donde ocurren las reacciones de descomposición y uno superior en donde ocurre la sedimentación de los lodos, el espacio inferior tiene una altura de 4.0 m y superior de 2.0 m, para una altura total de 6.0 m, el reactor es metálico y está construido sobre la cota del terreno.



Figura 7. Reactor No.1 anaeróbico de flujo ascendente, RAFA. Alcaldía de Togüí, 2019.

- **CANAL DE OXIGENACIÓN:** estructura donde se pretende oxigenar el agua con el fin de favorecer la reproducción natural de microorganismos aeróbicos.
- **HUMEDAL**

El humedal es de tipo horizontal de flujo subsuperficial, en el cual el agua se distribuye en un extremo del lecho, se infiltra y se va movilizand o en sentido horizontal a través de un medio granular de relleno y entre las raíces de las plantas. La vegetación utilizada es del tipo *Eichhornia crassipes* (Papiros y Jacintos de Agua) la cual se desarrolla sobre sustratos de terreno gravoso. La depuración del agua ocurre por la interacción entre los elementos componentes del humedal y los fenómenos físicos, químicos y biológicos dentro del humedal, con la intervención del sol como fuente principal de energía. En el fondo del lecho, el agua tratada se recoge

y se evacua por medio de tuberías que conducen a una caja de paso y por último son conducidas al río Ubaza.



Figura 8. Humedal. Alcaldía de Togüí, 2019.

- **LECHOS DE SECADO**

La PTAR cuenta con dos unidades para el secado. Todos los lodos y sedimentos generados en cada una de las unidades de tratamiento son conducidos a estas. El material utilizado para la construcción de la base de los módulos de secado es concreto reforzado y los muros se encuentran en mampostería revestida en pañete.

Capítulo VI

6. Diagnóstico de la PTAR

6.1 Caracterización del afluente y del efluente

Una de las principales herramientas con el fin de establecer el diagnóstico del estado actual de los vertimientos y de esta manera desarrollar estrategias para el tratamiento de aguas residuales municipales eficaces y eficientes, es la caracterización del afluente y del respectivo efluente luego del tratamiento realizado, ya que de esta manera se tiene un mejor panorama para establecer las posibles causas de contaminación de las fuentes hídricas y el tratamiento más adecuado a implementar.

La Corporación Autónoma de Boyacá (CORPOBOYACÁ) a través de la empresa de Análisis de Aguas y Suelos de Colombia (Anascol S.A.S) realizó en enero de 2019 la caracterización del agua residual de la PTAR del municipio de Togüí en los siguientes puntos:

- Entrada PTAR Con coordenadas geográficas N 05° 56' 14.6'' ; W 73° 30' 55.6''
- Salida PTAR Con coordenadas geográficas N 05° 56' 14.5'' ; W 73° 30' 57.8''

Se realizó un muestreo compuesto de 24 horas, con intervalos de 60 minutos para la medición de campo de caudal, conductividad, oxígeno disuelto, pH y sólidos sedimentables; y de muestras puntales para analizar en el laboratorio aceites y grasas, Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO, Demanda Química de Oxígeno, DQO y sólidos suspendidos Totales, SST.

En la tabla 7 se presentan los resultados obtenidos en laboratorio y campo mediante las técnicas avaladas por el IDEAM a la empresa Anascol S.A mediante Resolución 0103 de enero de 2018.

Tabla 7. Caracterización Afluente y Efluente

Variable	Unidades	Resultados		Resolución 631 de 2015
		Afluente	Efluente	
Grasas y Aceites	mg Aceites y Grasas/L	26,3	4,78	20
Demanda Bioquímica de Oxígeno - DBO ₅	mg O ₂ /L	266	101	90
Demanda Química de Oxígeno - DQO	mg O ₂ /L	483	241	180
Sólidos suspendidos totales	mg SST/L	176	34	90
Sólidos sedimentables (Mín-Máx)	mg/L	0,3-1,0	0,1-0,7	5
pH (Mín-Máx)	Unidades pH	7,27-7,64	6,89-7,36	6-9
Oxígeno disuelto (Mín-Máx)	mg O ₂ /L	0,2-0,6	0,3-1,0	-
Conductividad (Mín-Máx)	μS/cm	602-925	887-941	-
Caudal (Promedio)	L/s	2,52	0,43	-

Fuente. Autor.

En las figuras 9, 10,11 y 12 se presentan los resultados obtenidos durante el muestreo de 24 horas. En la figura 10, correspondiente a los sólidos sedimentables, se puede observar que existen dos periodos de tiempo cercanos a las 12 a.m. y 4 a.m. en donde el efluente presenta niveles mayores de concentración de sólidos que el afluente; lo anteriormente señalado puede tener como causa el lugar en donde se tomó la muestra ya que sin mantenimiento de la estructura es posible que se acumule gran contenido de material sedimentable en el fondo de la misma y ante bajos caudales de dilución podrían obtenerse resultados de laboratorio que no corresponden con la calidad del efluente.

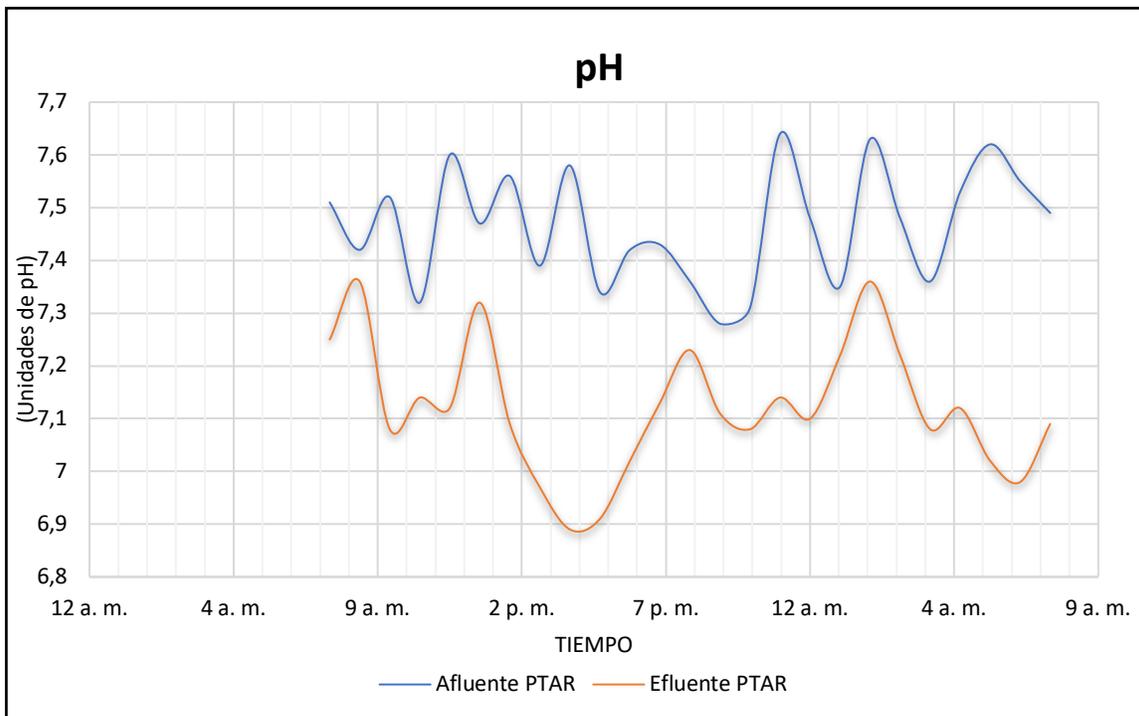


Figura 9. pH afluente vs efluente PTAR. Autor.

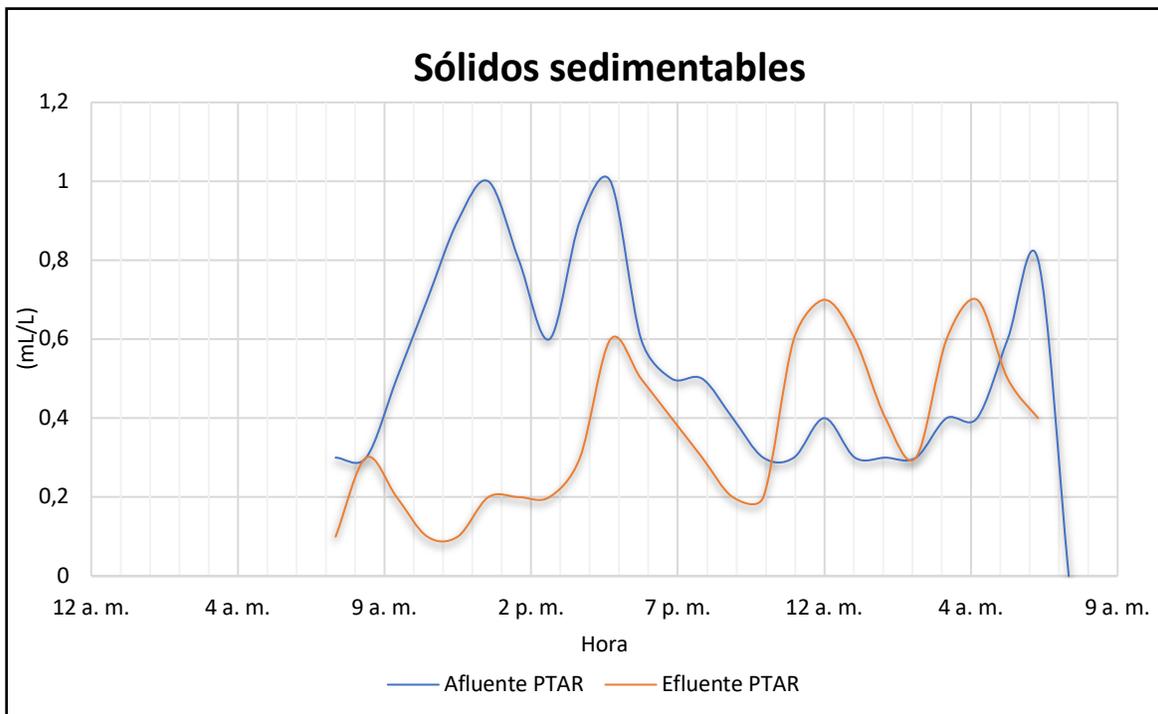


Figura 10. Sólidos sedimentables afluente vs efluente. Autor.

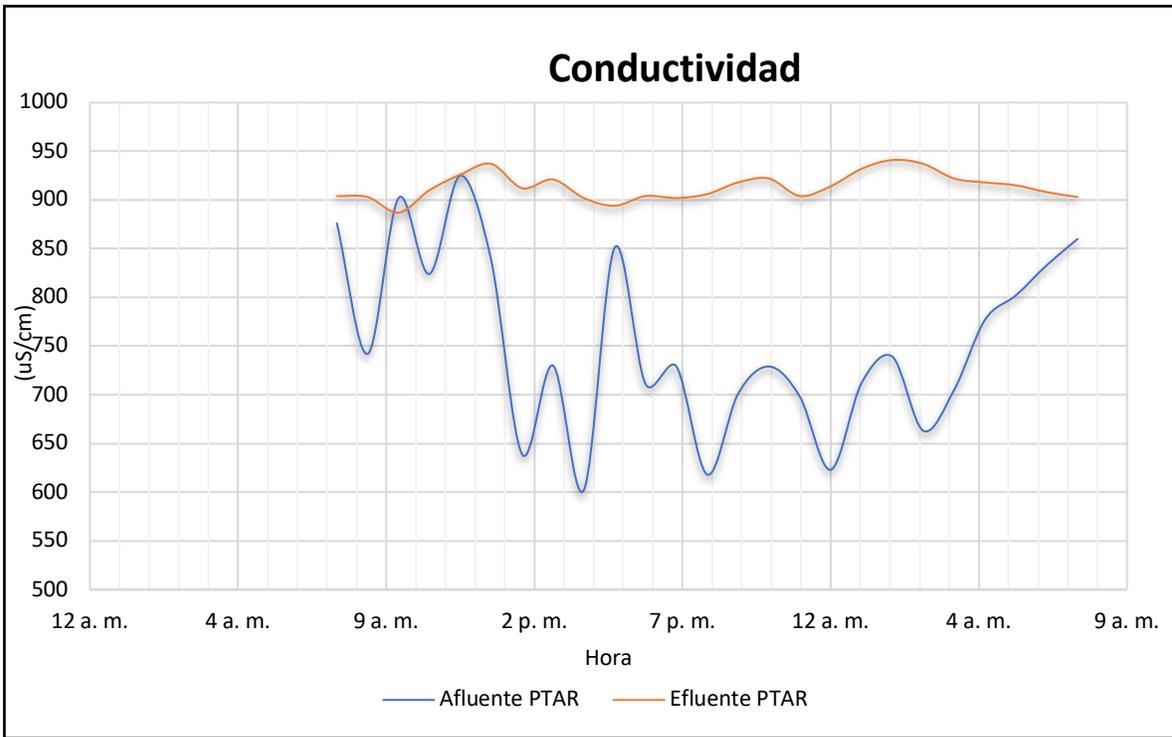


Figura 11. Conductividad afluente vs efluente. Autor.

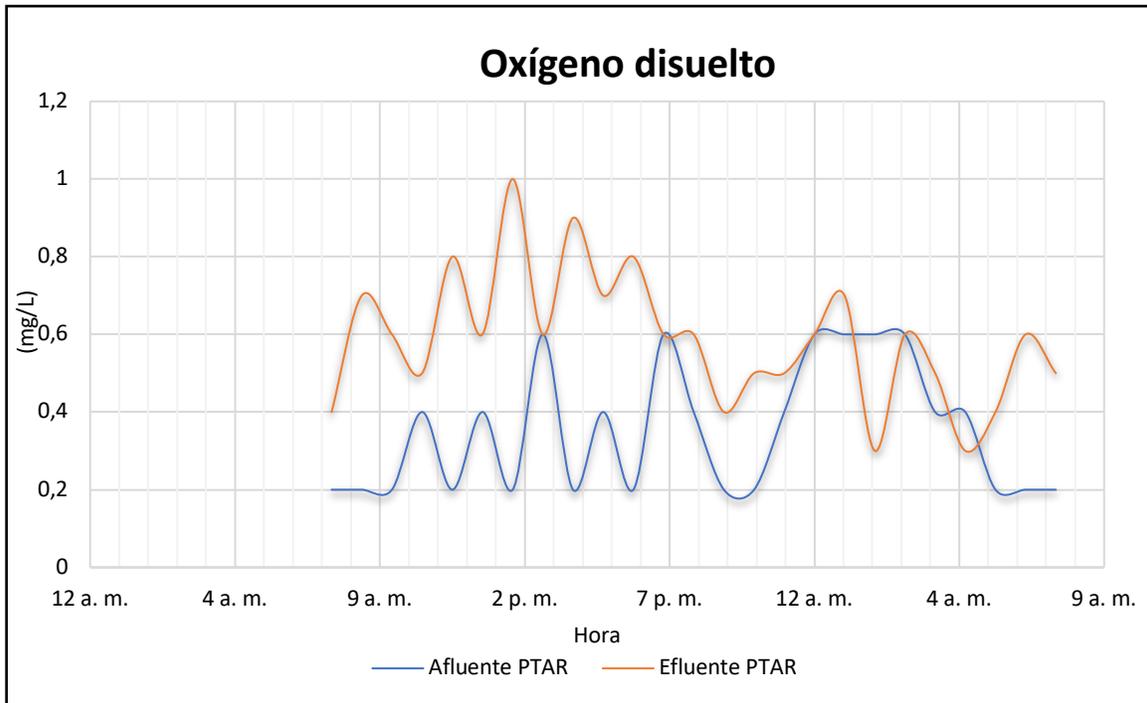


Figura 12. Oxígeno disuelto afluente vs efluente. Autor.

- **Análisis de Eficiencias**

En la tabla 8 se presentan las eficiencias del tratamiento del agua residual en donde se evidencia que el tratamiento actual no cumple los parámetros de DBO₅ y DQO establecidos en la resolución 631 de 2015.

Tabla 8. Eficiencia del tratamiento

Variable	Resultados		EFICIENCIA TRATAMIENTO (%)	EFICIENCIA REQUERIDA (%)
	Entrada	Salida		
Grasas y Aceites (mg Aceites y Grasas/L)	26,3	4,78	82	OK
Demanda Bioquímica de Oxígeno -DBO ₅ (mg O ₂ /L)	266	101	62	66
Demanda Química de Oxígeno (DQO mg O ₂ /L)	483	241	50	63
Sólidos suspendidos totales (mg SST/L)	176	34	81	OK
Sólidos sedimentables (Min-Max) (mg/L)	1	0,7	30	OK
pH (Mín-Máx)	7,64	7,36	4	OK

Fuente. Autor.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se realizó un muestreo a cada unidad de tratamiento con el fin de establecer las eficiencias de estas en términos de DBO₅ y DQO, los cuales no presentan cumplimiento de la normativa. Cabe señalar que la toma de muestras se realizó a las 2 p.m. teniendo en cuenta que de acuerdo al ensayo de 24 horas realizado previamente (Ver anexo 19) esta hora presenta un caudal considerable en el afluente al igual que la carga contaminante.

Tabla 9. Eficiencia de las unidades de tratamiento para DBO₅

UNIDAD DE TRATAMIENTO	RESULTADOS Demanda Bioquímica de Oxígeno - DBO ₅ (mg O ₂ /L)		EFICIENCIA TRATAMIENTO (%)	EFICIENCIA TEÓRICA (RAS 2017) (%)
	ENTRADA	SALIDA		
Cribado	264	263	0	0-15
Desarenador	263	260	1	0-5
Sedimentador	260	253	3	30-40
Tanque Imhoff	253	225	11	25-40
RAFA	225	120	47	65-80
Humedal	120	112	7	30-40
EFICIENCIA TOTAL	264	112	58	≥ 66*

* De acuerdo a lo estipulado en la resolución 631 de 2015, la DBO máxima del efluente es de 90 mg/L-O₂.

Fuente. CORPOBOYACÁ, 2019.

Tabla 10. Eficiencia de las unidades de tratamiento para DQO

UNIDAD DE TRATAMIENTO	Resultados Demanda Química de Oxígeno DQO (mg O ₂ /L)		EFICIENCIA TRATAMIENTO (%)	EFICIENCIA TEÓRICA (RAS 2017) (%)
	ENTRADA	SALIDA		
Cribado	479	470	2	0-10
Desarenador	470	465	1	0-5
Sedimentador	465	442	5	30-40
Tanque Imhoff	442	405	8	15-30
RAFA	405	240	41	60-80
Humedal	240	238	1	30-40
EFICIENCIA TOTAL	479	238	50	≥ 63*

* De acuerdo a lo estipulado en la resolución 631 de 2015 la DQO máxima del efluente es de 180 mg/L-O₂.

Fuente. CORPOBOYACÁ, 2019.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las tablas 9 y 10 se puede observar que las eficiencias de los sistemas de pretratamiento y tratamiento primario no están acordes a las teóricas señaladas en el RAS 2017 y que la eficiencia del tratamiento está siendo sustentada en los procesos anaerobios sin lograr cumplir con la normativa correspondiente que establece una remoción mínima de 90 mg O₂/L para DBO₅ y 180 mg O₂/L para DQO.

6.2 Evaluación Técnica de la PTAR

6.2.1 Parámetros de diseño y estado de las estructuras

Con el fin de identificar el funcionamiento óptimo de la planta de tratamiento de agua del municipio se verificó el cumplimiento de algunos parámetros de diseño suministrados por la empresa de servicios públicos AGUAS DE TOGÜÍ E.S.P comparándolos con los exigidos en el RAS 2017. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 11. Parámetros de diseño

ELEMENTO	PÁRAMETRO DE DISEÑO	VALOR ACTUAL	VALOR ADMISIBLE SEGÚN RAS 2017	DIAGNÓSTICO CUMPLE/NO CUMPLE
Tubería Alcantarillado Combinado	Diámetro real interno (mm)	203	> 260	NO CUMPLE
Cribado	Separación entre rejillas (cm)	1,5	1 a 2	CUMPLE
Desarenador	Número de módulos	2	2	CUMPLE
Sedimentador	Pendiente de fondo (°)	45	45-65	CUMPLE
	Diámetro (m)	3	3 a 45	CUMPLE
	Profundidad (m)	4	2,5-4	CUMPLE
Tanque IMHOFF	Población (habitantes)	5715	500-5000	NO CUMPLE
	Número de módulos	3	3	CUMPLE
RAFA	Profundidad (m)	6	4,5 a 6	CUMPLE
	Estructura recolección de Gas (Und)	1	1	CUMPLE
Humedal	Longitud/Ancho	2:1	3:1 a 4:1	NO CUMPLE
	Profundidad (m)	0,4	0,1 a 0,45	CUMPLE
Lechos de secado	Área (m ² /persona)	0,001	> 0,24	NO CUMPLE

Fuente. Autor.

De acuerdo a la información proporcionada por el municipio y la tabla 11 se puede inferir que la tubería de alcantarillado combinado, el humedal y los lechos de secado no cumplen

los parámetros de diseño mínimos señalados en el RAS 2017. Cabe señalar que si bien, el parámetro de población no tiene cumplimiento para el diseño del tanque Imhoff, para fines de evaluación podría no considerarse ya que la variación en población no es representativa.

Como parte de la evaluación técnica de la planta de tratamiento y de acuerdo a la disponibilidad de información se calcularon parámetros de tiempos de retención, cargas orgánicas, etc., a continuación, se presenta el resumen de cálculos y resultados obtenidos.

Tabla 12. Parámetros de evaluación técnica

ELEMENTO	PÁRAMETRO EVALUADO	DATOS	CÁLCULO*	RESULTADO
Cribado	Pérdida de energía en la rejilla limpia (H)(m)	β = 1,79 Barras circulares w = 0,02 m ancho máximo de la sección transversal de las barras, en la dirección de flujo, m b =0,025 espaciamiento o separación mínima entre las barras,m hv = 0,10 altura o energía de velocidad del flujo de aproximación, m θ = 50° ángulo de la rejilla con la horizontal v_s =1,15 m/min Velocidad de asentamiento	$H = \beta \left(\frac{w}{b}\right)^{\frac{4}{3}} * hv * \text{sen}\theta$	0,1
Desarenador	Longitud de la cámara (L) (m)	v = 0,25 Velocidad de flujo m/s H = 1,12 m altura del agua L = 15 m Longitud de la cámara	$L = \frac{H * V}{v_s}$	14,6
	Tiempo de retención (θ) (min)	v = 0,25 Velocidad de flujo m/s	$\theta = \frac{L}{V}$	1,0
Sedimentador	Carga superficial (CS) (m ³ /d)	Q =216 m ³ /d	CS=Q/A	30,9
	Tiempo de retención (θ) (h)	Área =7 m ² Volumen =28 m ³	$\theta = \frac{V}{Q}$	3,1
Tanque Imhoff	Carga orgánica (CO) (kg/d)	DBO₅ = 0,000253 kg/L Q = 216.000 L/d =216 m ³ /d	$CO = Q * DBO_5$	55,0

	Carga superficial (CS) (m/d)	Área=7,1 m ² **	$CS = \frac{Q/2}{A}$	15,2
	Tiempo de retención (θ) (h)	Volumen =28,4 m ³	$\theta = \frac{V}{Q/2}$	6,3
	Carga orgánica (CO) (kg/d)	DQO= 0,000405 Kg/L	$CO = Q * DQO$	87,5
RAFA	COV (kg/d.m ³)	Volumen =36,94 m ³	$COV = \frac{Q * DQO}{V}$	1,2
	Tiempo de retención (θ) (h)	Área=6,15 m ² ***	$\theta = \frac{V}{Q/2}$	8,2

* Los cálculos se realizan de acuerdo a lo establecido por Romero en su libro tratamiento de aguas residuales, 2016

** Se supone un radio de 1,5 m y una profundidad de 4 m de acuerdo a inspección visual del tanque; los datos reales no fueron suministrados por el municipio.

*** Se supone un radio de 2,8 m y una profundidad de 6 m de acuerdo a inspección visual del tanque; los datos reales no fueron suministrados por el municipio.

Fuente. Autor.

Teniendo en cuenta los resultados de la tabla 12 y de acuerdo a los parámetros recomendados por diferentes autores para el diseño (Romero, 2016), en la siguiente tabla se presenta un cuadro comparativo de los más representativos.

Tabla 13. Resultados y criterios recomendados

ELEMENTO	PÁRAMETRO EVALUADO	RESULTADO	VALORES DE REFERENCIA*
Sedimentador	Carga superficial (CS) (m/d)	30,9	32 - 49
	Tiempo de retención (θ) (h)	3,1	1,5 - 2,5
Tanque Imhoff	Carga superficial (CS) (m/d)	15,2	24 - 50
	Tiempo de retención (θ) (h)	6,3	1 - 4
RAFA	Carga Orgánica Volumétrica (COV) (kg/d*m ³)	1,2	8 - 40
	Tiempo de retención (θ) (h)	8,2	10 - 14**

* Los criterios son los parámetros recomendados para el diseño por diferentes autores, Romero. 2016

** RAS 2017**

Fuente. Autor.

Analizando los resultados obtenidos de la tabla 12 se puede observar que la pérdida de energía en la rejilla limpia correspondiente a 10 cm se encuentra dentro de los parámetros aceptables; para el desarenador se tiene un tiempo de retención de 1 min el cual está por debajo de los parámetros habituales de funcionamiento (2 a 5 minutos, Romero, 2016), lo cual podría tener incidencia directa en la baja eficiencia de la unidad de tratamiento.

En la tabla 13 se puede observar que la planta de tratamiento actual cumple con la mayoría de parámetros de diseño indicados, con excepción del tiempo de retención y la carga orgánica volumétrica en el RAFA que se encuentran por debajo de los valores recomendados por la literatura.

En la tabla 14 se presenta el estado actual de las estructuras más importantes que componen el sistema de tratamiento de agua residual del municipio.

Tabla 14. Estado de las estructuras

Etapa del sistema	Estructura	Diagnóstico Bueno/Regular/Malo	Observaciones
Alcantarillado	Tubería	Malo	* El periodo de diseño finalizó en 2018. Requiere cambio inmediato por deterioro. * Cobertura > 90%
Estructura de entrada	Tubería	Bueno	* Tubería en PVC de 8" .Instalada hace 2 años
Cribado	Rejillas	Regular	*Requiere cambio de algunos elementos
	Compuertas	Malo	*Deficiente estado de funcionamiento
Desarenador	Válvulas de lavado	Regular	*Requiere mantenimiento
Sedimentador	Canaleta PARSHALL	Bueno	* Estructura en concreto para el control de velocidad en la entrada del sedimentador
	Caja de entrada	Regular	*Requiere mantenimiento
RAFA	Bomba Sumergible	Malo	*Requiere cambio
	Sedimentador integrado	Bueno	*Permite el retorno de los lodos de manera natural al espacio de reacción inferior

Humedal	Válvulas de Entrada	Bueno	* Tres válvulas de entrada independientes
	Filtros de Grava	Regular	* Los muros de concreto de los filtros presentan fisuras con posibilidad de fugas
Lechos de Secado	Muros	Bueno	* Hace 6 meses se realizó mantenimiento de la estructura
Estructura de Salida	Tubería	Bueno	* Tubería en PVC de 8" Instalada hace 2 años

Fuente. Autor.

6.2.2 Operación

Las actividades correspondientes a operación y control que se deben llevar a cabo en la PTAR y la evaluación del cumplimiento de estas según lo estipulado en el del RAS 2017 se describen en la siguiente tabla.

Tabla 15. Verificación actividades de operación según RAS 2017

Ítem	Descripción y frecuencia exigida	Verificación	
		Cumple	No cumple
Operación Normal	Medición de Caudales (Diario)		X
	Medición de parámetros de Calidad agua Cruda (Semestral)		X
	Caracterización operaciones unitarias (Semestral)		X
Manual de Operación	No se encuentra ajustado a las condiciones reales (cuando se realicen modificaciones de procesos o unidades)		X
Cribado	Limpieza manual de rejillas (Diario)	X	
Desarenador	Verificación sistemas hidráulicos de evacuación lodos (semanal)		X
RAFA	Verificación velocidad de flujo (Diario)		X
	Caracterización de gas (Semestral)		X
Humedal	Medición de Caudales (Diario)		X
Lechos de secado	Caracterización de Lodos (En caso de reuso)		X
Control de Olores	Procedimientos de control (Diario)		X

Fuente. Autor.

6.2.3 Mantenimiento

Las actividades correspondientes a mantenimiento que se deben llevar a cabo en la PTAR y la evaluación del cumplimiento de estas según lo estipulado en el del RAS 2017 se describen en la siguiente tabla.

Tabla 16. Verificación actividades de mantenimiento

Parámetro	Ítem	Descripción y frecuencia exigida	Verificación	
			Cumple	No cumple
Recursos humanos	Capacitación técnica	Asesoría, capacitación, supervisión y monitoreo personal (Anual)	X	
	Capacitación en situaciones de emergencia	Mantenimiento correctivo como repuesta a fallas y contingencias (Anual)		X
	Salud ocupacional	Exámenes periódicos (Anual)	X	
Disponibilidad de información	Libro de control	Resultados análisis calidad del agua (Trimestral)		X
		Frecuencia realización de los análisis (Diario)		X
		Cantidad de productos utilizados (Diario)		X
	Manual de mantenimiento (Actualización anual)	Introducción del tipo de planta	X	
		Mantenimiento de todos los sistemas y equipos de la planta		X
		Mantenimiento rutinario y preventivo obras civiles	X	
		Mantenimiento válvulas, medidores, instrumentos y controladores	X	
		Mantenimiento medios filtrantes		X
		Mantenimiento de equipos de bombeo y de sistemas eléctricos		X
		Mantenimiento de todos los equipos de instrumentación y control	X	
Mantenimiento preventivo, correctivo y situaciones de emergencia		X		
Actividades de mantenimiento	Mantenimiento general	Control de olores y ruido (Diario)		X
		Conexión entre equipos y unidades de tratamiento (Semanal)		X
		Lubricación y limpieza (Diario)	X	
		Control y sobrecalentamiento de partes eléctricas (Diario)		X
		Control de fugas (Diario)	X	
		Aplicación de pintura en estructuras (Anual)		X
		Revisión de instrumentos y controladores	X	
		Inventario, señalización y control de elementos usados (Diario)	X	

Fuente. Autor.

6.3 Evaluación Ambiental

Para el análisis de los impactos ambientales generados por la planta de tratamiento y la cuantificación de los mismos se utilizó la metodología propuesta por O' Sullivan. A continuación se hace una breve descripción del método siendo necesario remitirse a la fuente original en caso de requerirse mayor nivel de detalle ¹.

6.3.1 Listas de chequeo, control y verificación

Para el desarrollo de este proyecto específico se utilizó la lista de chequeo con escala en donde se incluye una ponderación de los diferentes elementos que se están calificando mediante algún factor de importancia relativa, que permite añadir una estimación de la significancia de cada variable ambiental afectada, en relación con los restantes. Las respectivas ponderaciones y la metodología de valoración de los impactos se señalan en la tabla 16; a continuación se describen los criterios utilizados:

- **Carácter (C):** Identifica si la actividad es negativa, positiva o neutra.
- **Perturbación (P):** Se relaciona con el grado de alteración en el curso de un fenómeno físico.
- **Importancia (I):** Grado de relevancia del impacto.
- **Ocurrencia (O):** Probabilidad de ocurrencia de un efecto.
- **Extensión (E):** Zona en donde se producen los impactos.
- **Duración (D):** Tiempo en el cual se presenta el impacto.
- **Reversibilidad (R):** Se relaciona con la recuperación del medio.

¹O' Sullivan M. Evaluación de Impacto Ambiental. Ingeniería Ambiental. 2 ed. España: McGraw-Hill, 2008.802 p.

Tabla 17. Clasificación de impactos

Clasificación de impactos			
Caracter (C)	Positivo (1)	Negativo (-1)	Neutro (0)
Perturbación (P)	Importante (3)	Regular (2)	Escasa (1)
Importancia (I)	Alta (3)	Media (2)	Baja (1)
Ocurrencia (O)	Muy probable (3)	Probable (2)	Poco probable (1)
Extensión (E)	Regional (3)	Local (2)	Puntual (1)
Duración (D)	Permanente (3)	Media (2)	Corta (1)
Reversibilidad (R)	Irreversible (3)	Parcial (2)	Reversible (1)
TOTAL	18	12	6
Valoración de impactos			
Impacto total = C X (P + I + O + E + D + R)			
Negativo (-)			
Severo	$\geq (-) 15$		
Moderado	$(-) 15 \geq 9$		
Compatible	$(-) \leq 9$		
Positivo (+)			
Alto	$\geq (+) 15$		
Medio	$(+) 15 \geq 9$		
Bajo	$(+) \leq 9$		

Fuente. Anónima.

- **6.3.2 Lista de evaluación de impactos**

En la tabla 18 se presentan los resultados de la evaluación de los impactos generados por la planta de tratamiento actual teniendo en cuenta las ponderaciones de la tabla 17 .Se evalúan los principales aspectos ambientales que de acuerdo a las características del proceso de tratamiento de agua y disposición de residuos se consideran pueden ser afectados. Para la asignación de la calificación de cada uno de los aspectos se realizaron comparaciones cartográficas y fotográficas de las condiciones actuales y las precedentes a la planta además de la revisión bibliográfica de aspectos bióticos y abióticos del área de influencia de la PTAR.

Tabla 18. Evaluación de impactos PTAR

Factores ambientales	Clasificación de impactos							Impacto total	Valoración del impacto
	C	P	I	O	E	D	R		
Aumento de las actividades económicas	1	1	1	2	1	1	1	7	BAJO
Cambios morfológicos y topográficos	-1	1	1	1	1	1	1	-6	BAJO
Cambios calidad del aire	-1	3	3	2	2	2	1	-13	MODERADO
Cambio en el uso del suelo	-1	3	3	3	2	3	2	-16	SEVERO
Contaminación atmosférica	-1	2	2	2	1	1	1	-9	MODERADO
Destrucción de vegetación	-1	1	2	2	2	3	1	-11	MODERADO
Disminución calidad paisajística	-1	3	3	3	1	3	1	-14	MODERADO
Aumento disponibilidad de recursos hídricos	1	2	2	2	3	3	2	14	MEDIO
Generación de ruido	-1	1	3	1	1	1	1	-8	BAJO
Generación de empleo	1	2	3	2	2	3	2	14	MEDIO
Desvalorización de predios	-1	3	3	2	1	2	1	11	MODERADO

Fuente. Autor.

En la tabla No. 18 se evidencia que el impacto negativo más importante de la PTAR es el cambio en el uso del suelo ya que según lo señala el artículo 183 del Ras 2017 la distancia mínima para la localización de la planta con relación al centro urbano debe ser de 200 m y dicho parámetro actualmente no presenta cumplimiento ya que la PTAR se ubica en el centro urbano aproximadamente a 50 m de una institución educativa. La falta de planeación municipal en los últimos años podría haber incidido en la no verificación de la normativa ambiental vigente y la evidente desactualización de EOT del municipio.

6.4 Producción másica y volumétrica de lodos

De acuerdo a la información suministrada por la empresa de servicios públicos del municipio de Togüí, se calcula la producción aproximada de lodo de la PTAR. Los lodos estimados y de acuerdo a la figura 4 (diagrama de flujo de la PTAR) corresponden a los generados por los procesos realizados en el desarenador, sedimentador y RAFA principalmente; para las demás unidades de tratamiento se realiza una disposición final al relleno sanitario.

Cabe señalar que la remoción de lodo deshidratado de los lechos de secado se realiza de manera manual mediante la utilización de pala y carretilla y no se cuenta con un procedimiento de disposición final. Es importante señalar que dicho residuo carece de caracterización que permita definir de manera técnica la disposición adecuada.

De acuerdo a la medición realizada en la entrada de los lechos de secado, la empresa de servicios públicos del municipio estima una producción de lodos de 25,16 kg/día los cuales tienen un tiempo de retención (Θ) en los lechos de secado de 15 días, por lo anteriormente señalado podemos calcular la masa de lodos como se señala a continuación:

$$\text{Masa de lodo (Kg)} = \text{Producción de lodos} \left(\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) * \text{Tiempo de retención } (\Theta) (\text{día})$$

$$\text{Masa de lodo (Kg)} = 25,16 \left(\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) * 15 (\text{día})$$

$$\text{Masa de lodo (Kg)} = 377,4 \text{ kg}$$

Para el cálculo del volumen de lodo se considera la masa de lodo anteriormente estimada además de la información suministrada por el municipio referente a la densidad relativa de sólidos de 1,01 y el porcentaje en peso de sólidos del 5 %. De acuerdo a la temperatura promedio del municipio de 18°C tenemos una densidad del agua aproximada de 998,69 (Kg/m³), de tal manera el a continuación se estima el volumen de lodos:

$$\text{Volumen de lodos (m}^3\text{)} = \frac{\text{masa de lodos (kg)}}{\text{densidad agua} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * \left(\frac{\text{porcentaje en peso de sólidos}(\%)}{100} \right) * \text{densidad relativa de sólidos}}$$

$$\text{Volumen de lodos (m}^3\text{)} = \frac{377,4 \text{ (kg)}}{998,68 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * \left(\frac{5 \text{ (\%)}}{100}\right) * 1,01}$$

$$\text{Volumen de lodos (m}^3\text{)} = 7,48$$

6.5 Evaluación Económica

La evaluación económica de la PTAR que aparece en la tabla 19 se realizó con base en la información proporcionada por la empresa de servicios públicos del municipio. Cabe señalar que la evaluación presentada a continuación es solo un estimativo general de los costos de operación del sistema debido a que no se contaba con la información suficiente para establecer análisis económicos más detallados, algunos de los valores utilizados son los vigentes en el mercado para el año de 2019.

Tabla 19. Evaluación económica del sistema

ETAPA	ÍTEM	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO \$	COSTO \$/mes	COSTO \$/año
SISTEMA DE ALCANTARILLADO	Operario para mantenimiento de la red y sus estructuras	Global	2	\$ 828.116	\$ 1.656.232	\$ 19.874.784
	Equipo de mantenimiento	Global	1	\$ 220.000	\$ 220.000	\$ 2.640.000
	Operario	Global	2	\$ 1.450.000	\$ 2.900.000	\$ 34.800.000
PERSONAL PTAR	Laboratorista	Global	1	\$ 1.100.000	\$ 1.100.000	\$ 13.200.000
	Celador	Global	1	\$ 828.116	\$ 828.116	\$ 9.937.392
	Personal aseo instalaciones	Global	1	\$ 828.116	\$ 828.116	\$ 9.937.392
PTAR	Mantenimiento sistema de cribado	Global	1	\$ 53.000	\$ 53.000	\$ 636.000
	Mantenimiento desarenador	Global	1	\$ 115.000	\$ 115.000	\$ 1.380.000
	Mantenimiento sedimentador	Global	1	\$ 115.000	\$ 115.000	\$ 1.380.000

	ÍTEM	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO \$	COSTO \$/mes	COSTO \$/año
INSUMOS TRATAMIENTO	Mantenimiento RAFA	Global	1	\$ 285.000	\$ 285.000	\$ 3.420.000
	Mantenimiento humedal y lechos de secado	Global	1	\$ 187.000	\$ 187.000	\$ 2.244.000
	Cal	Lb	12	\$ 5.200	\$ 62.400	\$ 748.800
ADMINISTRACIÓN SISTEMA	Administrador	Global	1	\$ 2.500.000	\$ 2.500.000	\$ 30.000.000
	Facturador	Global	1	\$ 1.678.000	\$ 1.678.000	\$ 20.136.000
	Secretaria	Global	1	\$ 828.116	\$ 828.116	\$ 9.937.392
COSTOS DIRECTOS TRATAMIENTO ACTUAL PTAR					\$ 8.494.864	\$ 79.423.584
TOTAL COSTO MES (\$)					\$13.500.980	
TOTAL COSTO AÑO (\$)						\$162.011.760
TOTAL COSTO m³ por mes (miles de \$)					\$ 1.302	

Fuente. Autor

Comparando municipios de características geográficas, sociales y económicas similares a las del municipio de Togüí y como se señala en el informe de 2018 de la comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico sobre costos de acueducto y alcantarillado se obtiene un valor promedio de \$127 por m³ tratado de agua cruda y el valor obtenido en la tabla 18 de \$1302, se evidencia que si bien técnicamente la PTAR se encuentra en funcionamiento con unos resultados aceptables, económicamente y de acuerdo a las características del municipio y de sus habitantes se hace inviable mantener el tratamiento actual con unos costos operativos y de mantenimiento tan elevados.

6.6 Resumen

Tabla 20. Evaluación total del sistema

Parámetro	Diagnóstico	Observaciones	
		Positiva	Negativa
Calidad del Agua vertimiento (Resol 031 de 2015)	Deficiente	La eficiencia en la remoción de SST Y grasas y aceites es > 80%	No cumple los parámetros de DBO ₅ Y DQO
Sistema de alcantarillado	Regular	Cobertura > 90%	Diámetro de tubería No cumple RAS 2017 (260 mm). La tubería presenta alto grado de deterioro
Parámetros de diseño	Aceptable	El desarenador, sedimentador y Tanque Imhoff cumplen con los parámetros de diseño exigidos por la norma colombiana	El RAFA tiene un tiempo de retención (8 horas) inferior a los recomendados en diseño (10 - 14 horas)
		La planta actual cumple con las eficiencias estipuladas por la norma de vertimientos para los parámetros de Grasas y Aceites y Sólidos suspendidos totales	La planta actual No cumple con las eficiencias estipuladas por la norma de vertimientos para los parámetros de DBO ₅ Y DQO. Los lechos de secado no cumplen el parámetro de área (m ² /persona)
Estado de las estructuras	Regular	Canaleta PARSHALL en buen estado	El humedal No cumple la relación Longitud/Ancho (Ras 2017)
		Los lechos de secado presentan buen estado	Se requiere cambio de la Bomba sumergible
Operación	Regular	El humedal cuenta con tres válvulas de entrada funcionales e independientes	En el humedal los muros de concreto de los filtros presentan fisuras con posibilidad de fugas
		Se realiza medición de algunos parámetros de calidad de Agua (pH, OD, Conductividad)	Las compuertas del cribado requieren mantenimiento rutinario
Mantenimiento	Aceptable	Lubricación y Limpieza de los componentes de la PTAR	El manual de Operación no se encuentra actualizado a las condiciones actuales de la PTAR. No se cumple con la frecuencia exigida por normativa vigente
Impacto Ambiental	Deficiente		No se tiene un programa de mantenimiento periódico y rutinario. No se cumple con la frecuencia exigida por normativa vigente
			La ubicación de la PTAR no corresponde a lo estipulado en el EOT ni el RAS 2017. Se encuentra en el centro urbano
Evaluación económica	Regular		Los costos de operación y mantenimiento No son acordes al tipo de municipio y los requerimientos de calidad de agua

Fuente. Autor.

Capítulo VII

7. Optimización PTAR

Es importante señalar que los datos suministrados por el municipio en lo referente a calidad del agua no son suficientes para determinar de manera precisa el origen de la problemática de la PTAR ni asegurar si alcanza o no las eficiencias de remoción requeridas. Los parámetros de diseño sugieren que la PTAR debería ser suficientemente eficiente. Es probable que esté siendo mal operada y que solo requiera ajustes menores, especialmente en la operación misma, pero esto requiere un estudio de mayor alcance con la colaboración de las autoridades municipales y departamentales en cuanto a la disponibilidad de toda la información. Sin embargo, de acuerdo con los hallazgos encontrados en el presente estudio, y teniendo en cuenta las especificaciones del RAS 2017, además de los parámetros mínimos de calidad de agua para vertimientos exigidos en la resolución 631 de 2015, se realizan una serie de recomendaciones para mejorar las eficiencias obtenidas y el cumplimiento de la normativa legal.

- **Recomendaciones generales para el sistema de tratamiento de agua residual**

Recomendación 1: Para poder establecer la situación real de la PTAR en cuanto a la eficiencia de remoción de los diferentes parámetros en cada una de las etapas del proceso y determinar si se requiere la optimización, es necesario llevar a cabo un plan de muestreo de 1 o 2 meses que sea representativo del funcionamiento de la planta.

Recomendación 2: el tratamiento adecuado de las aguas residuales municipales requiere la interacción eficaz de todos los participantes en el proceso mediante la articulación de políticas municipales en el marco de la ley nacional que permitan de manera técnica,

económica y ambiental dar soluciones a la problemática del manejo de agua residual. El sistema de tratamiento de agua residual del municipio de Togüí presenta problemas en infraestructura, operación y mantenimiento de algunos de los componentes del sistema. En la tabla 21 se presentan las actividades propuestas para optimizar la totalidad del sistema existente.

Tabla 21. Actividades de optimización de PTAR

ítem	Actividades requeridas
Sistema de alcantarillado	Cambio de tubería por cumplimiento periodo de diseño Ampliación cobertura de alcantarillado
Sistema de tratamiento agua residual	Mantenimiento periódico y rutinario de la red Se debería reubicar la PTAR (RAS 2017) lo cual significa construirla nuevamente Aumentar área de lechos de secado (RAS 2017) Mantenimiento periódico y rutinario de compuertas y demás accesorios del sistema Construcción instalación para laboratorio calidad de agua e implementar un plan de muestreos.
Operación	Actualizar manual de operación y capacitar operarios
Mantenimiento	Generar un manual de manteniendo acorde a la planta y normativa vigente.
Disponibilidad de información	Implementación de un sistema de información de todos los procesos desarrollados en el sistema de alcantarillado y el manejo de vertimientos

Fuente. Autor.

Recomendación 3: teniendo en cuenta que la planta de tratamiento actual no cumple con criterios de ubicación ya que, según establece el artículo 183 del RAS 2017, la distancia mínima para la localización de la planta con relación al centro urbano debe ser de 200 m, en caso de reubicar la PTAR en una zona acorde con el EOT municipal y el RAS 2017, y teniendo en cuenta que tendría que construirse una nueva, se propone la implementación de un tren de tratamiento diferente.

Para la definición de los procesos de tratamiento sugeridos, se consideraron las condiciones actuales de operación de la planta de tratamiento; además se realizó el análisis bibliográfico del informe final del proyecto “Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el tratamiento de aguas residuales de América Latina y el Caribe, al adoptar procesos y tecnologías más sustentables”, financiado por el International Development Research Center (IDRC) de Canadá y desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la universidad nacional autónoma de México UNAM. En este se realiza un inventario de las tecnologías exitosas más utilizadas en algunos países de Latinoamérica incluyendo a Colombia.

Dentro del primer análisis realizado se verifica que las condiciones del afluente en cuanto a parámetros como DBO₅ (266 mg O₂/L), DQO (483 mg O₂/L) y SST (176 mg SST/L) se encuentren dentro de los promedios del estudio desarrollado por la (UNAM) y mencionado anteriormente. En la tabla 22 se evidencia que las condiciones actuales de operación de la planta se enmarcan en las características promedio de afluentes para 156 tratamientos de aguas residuales municipales exitosos.

Tabla 22. Valores promedio de calidad de afluente casos de estudio (UNAM)

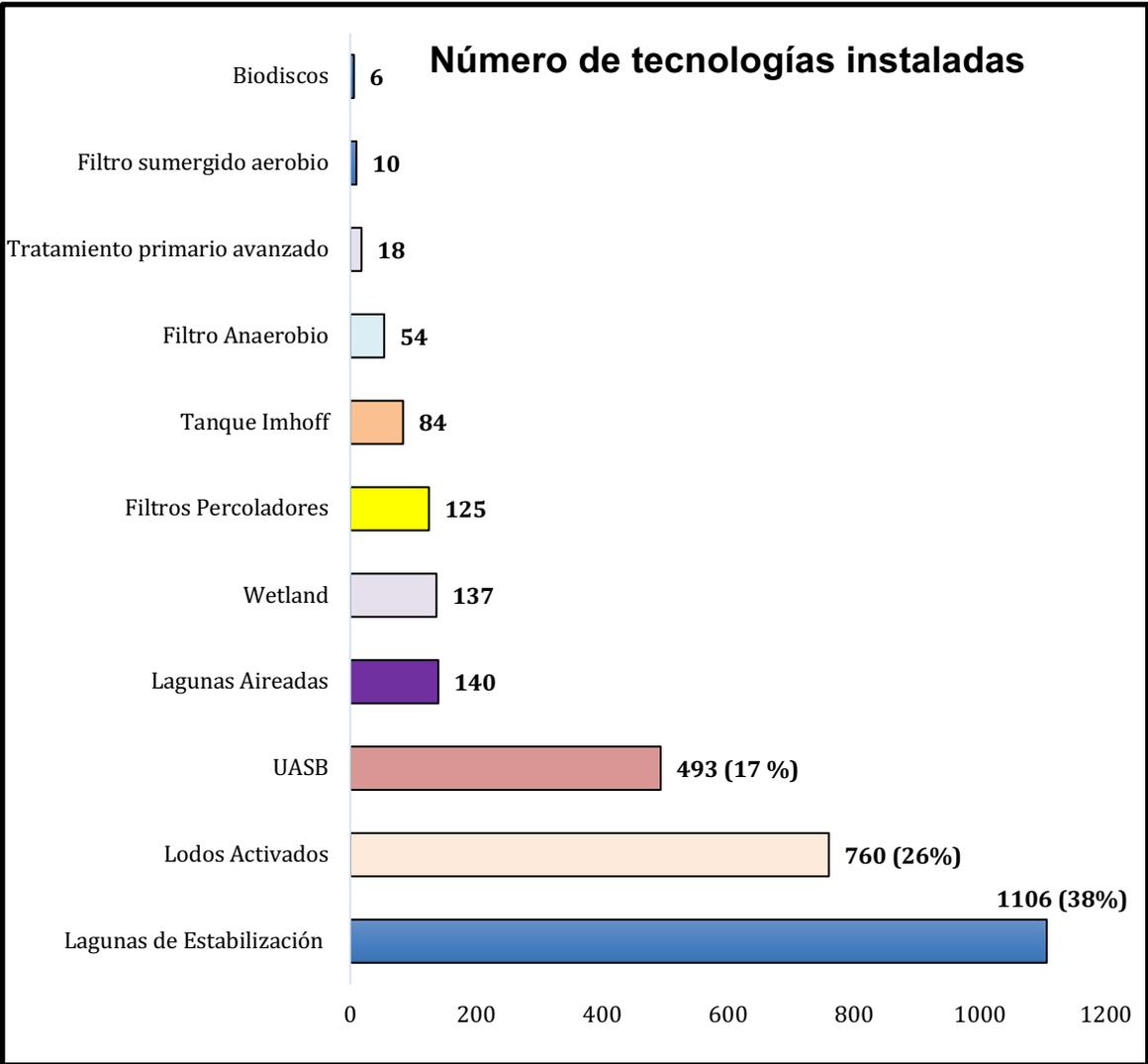
Variable	Unidades	Resultados		Valor de referencia
		Valor promedio	Desviación estándar	
Grasas y Aceites	mg /L	244	17	220
Demanda Bioquímica de Oxígeno -DBO5	mg /L	557	40,3	500
Sólidos suspendidos totales	mg /L	264	31,1	220
Nitrógeno total	mg /L	42	1,4	40
Fósforo total	mg /L	7	0,7	8

Fuente. Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales, UNAM.2013

El segundo aspecto de análisis se enfoca principalmente en la delimitación de los procesos más utilizados en Latinoamérica y principalmente en Colombia. Dentro del estudio realizado por la UNAM se evaluó un total de 2,734 instalaciones en 6 países seleccionados distribuidas por país de la siguiente manera: Brasil con una muestra de 702 PTAR, Chile

con un total de 177 PTAR, Colombia con un total de 139 PTAR, Guatemala con un total de 32 PTAR, México con un total de 1,653 PTAR, y República Dominicana con una muestra de 31 PTAR. En la tabla 23 se presentan los resultados obtenidos en cuanto al tipo de proceso utilizado y en la figura 13 la configuración de trenes de tratamiento.

Tabla 23. Tecnologías utilizadas en Latinoamérica



Fuente. Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales, UNAM.2013.

Como se puede observar en la tabla 23 las tecnologías más usadas en el tratamiento de aguas residuales, que representan aproximadamente el 80 %, son los procesos de las

lagunas de estabilización, lodos activados y el reactor anaerobio de manto de lodos de flujo ascensional (RAFA, PAMLA o UASB).

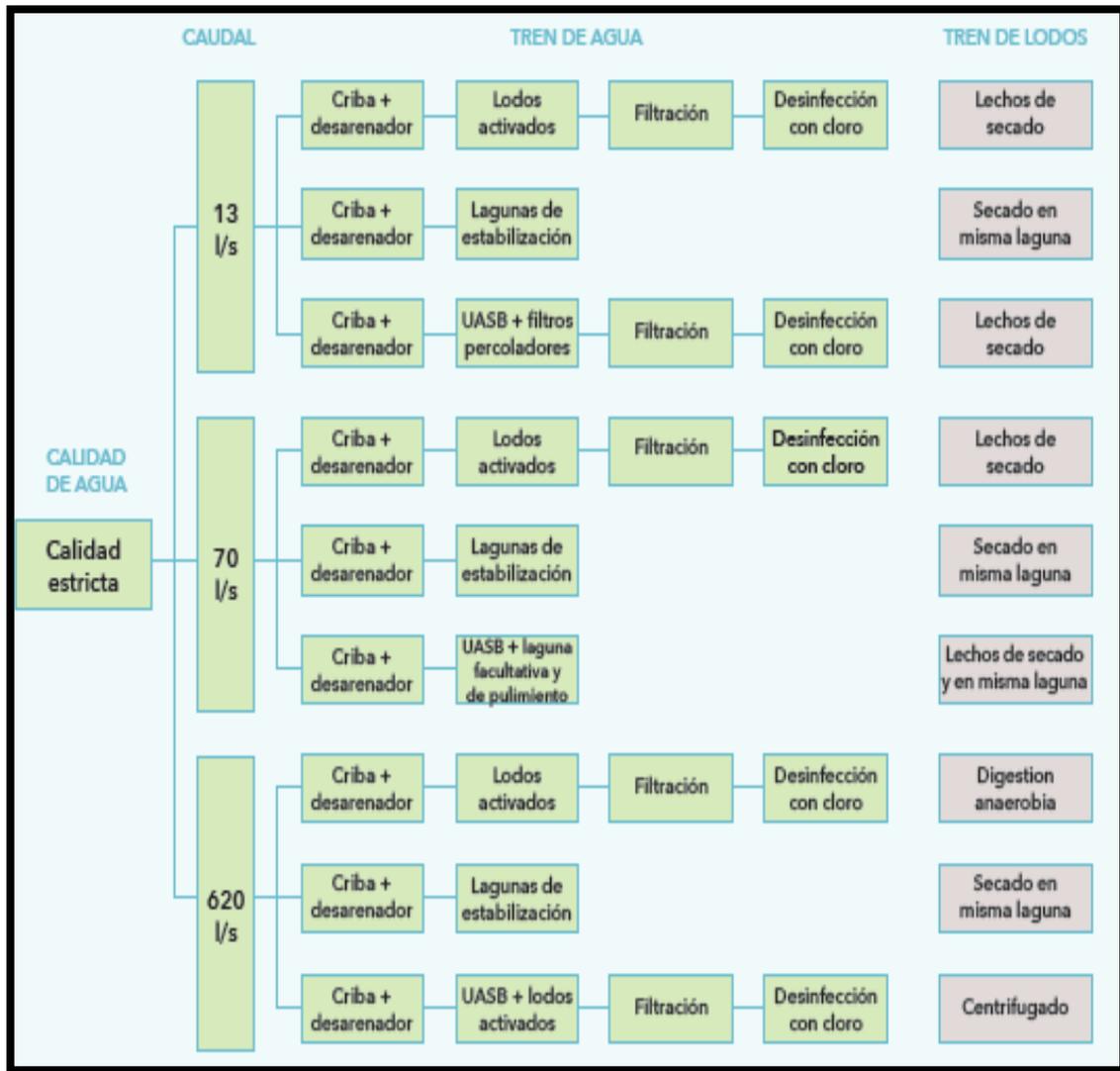


Figura 13. Configuración de trenes de tratamiento representativos de la región
Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales, UNAM.2013

De acuerdo al análisis realizado anteriormente y la configuración de trenes de tratamiento señalados en la figura 13, se propone la implementación de una nueva PTAR que obligatoriamente debe construirse a las afueras del casco urbano del municipio. Lo anteriormente señalado teniendo en cuenta que la planta de tratamiento actual presenta

problemas operativos, económicos y además presenta incompatibilidad por ubicación ya que según establece el artículo 183 del RAS 2017 la distancia mínima para la localización de la planta con relación al centro urbano debe ser de 200 m. Los procesos señalados se describen a continuación:

- **Tamiz estático**

Es un tratamiento preliminar concebido para la separación sólido-líquido, consiste en un fluido que se desliza sobre una superficie curva y el agua fluye a través de una rejilla de gran eficiencia. Este tipo de equipos no llevan partes mecánicas, ni requieren consumo eléctrico y teniendo en cuenta que los sólidos se almacenan en un contenedor por gravedad requiere un mantenimiento mínimo.

- **Desarenador**

- **Laguna de estabilización facultativa**

El diseño de estas lagunas se basa en la estabilización de la materia orgánica en un medio oxigenado principalmente por las algas presentes. El objetivo de las lagunas facultativas es obtener un efluente de la mayor calidad posible, en el que se haya alcanzado una elevada estabilización de la materia orgánica, y una reducción en el contenido en nutrientes y bacterias coliformes. La profundidad de las lagunas facultativas suele estar comprendida entre 1 y 2 m para facilitar así un ambiente oxigenado en la mayor parte del perfil vertical (Rolim, 2000).

- **Lechos de secado de lodos**

En la figura 14 se presenta el tren de procesos de tratamiento sugerido.

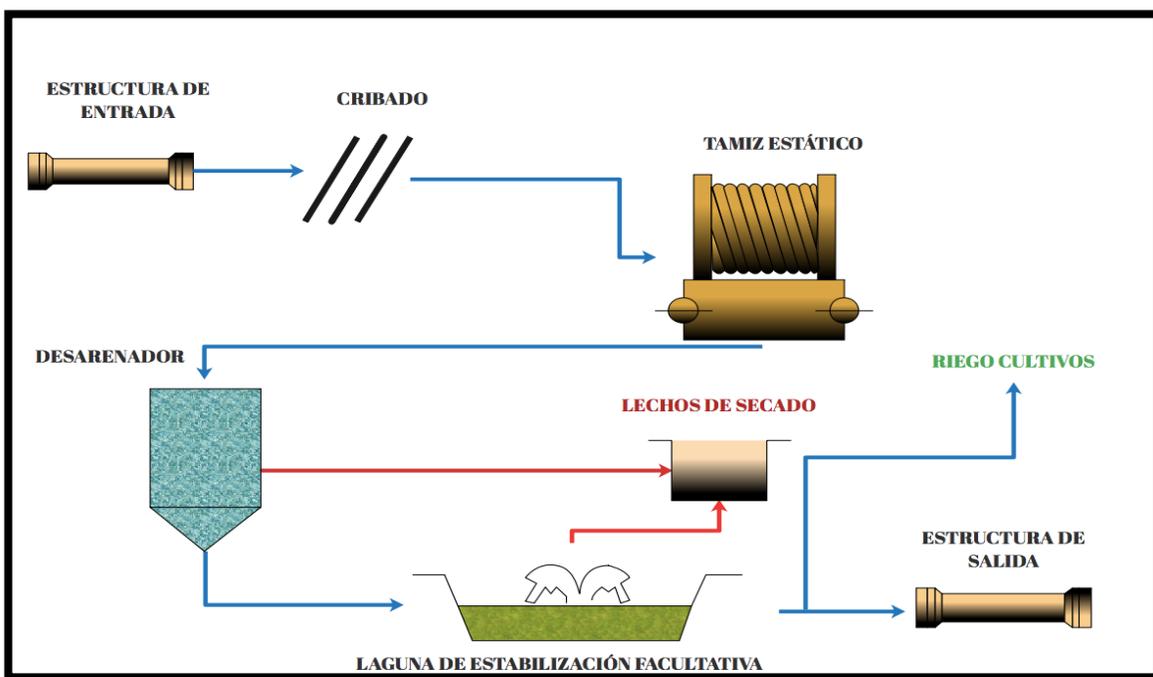


Figura 14. Diagrama de flujo Alternativa Sugerida. Autor.

De acuerdo a la información suministrada por el municipio y los precios actuales de la región, en la tabla 23 se presentan los costos aproximados de implementación del tratamiento propuesto.

Tabla 23. Costo de la alternativa propuesta

Alternativa	Costo		Costo Total (\$)
	Construcción (\$)	Mantenimiento y Operación mensual* (\$)	
Tamiz estático	\$ 7.200.000	\$ 120.000	\$ 35.950.000
Desarenador	\$ 8.900.000	\$ 160.000	
Laguna de estabilización facultativa	\$ 19.850.000	\$ 415.000	

* Valor estimado por la empresa de servicios públicos del municipio de Togüí
 **No se incluye valor del terreno

Fuente. Autor.

Capítulo VIII

8. Conclusiones y recomendaciones

- La poca información suministrada por el municipio limitó el alcance del presente proyecto en lo concerniente a la caracterización del vertimiento ya que imposibilitó un nivel de detalle más amplio y específico en el análisis de resultados debido a la carencia de resultados de la totalidad de ensayos de laboratorio realizados en diferentes épocas del año. Sin embargo y de acuerdo al análisis de la problemática se puede inferir la necesidad de mejorar la operación de la planta existente con el fin de alcanzar las eficiencias requeridas.
- De acuerdo al diagnóstico realizado en el capítulo 6 se pudo evidenciar que el municipio de Togüí presenta problemas de orden administrativo y operativo en el manejo y tratamiento de las aguas residuales. Los principales problemas se enmarcan en un sistema de alcantarillado deficiente tanto en la cobertura como en el estado de la infraestructura, además de la baja eficiencia operativa, económica y ambiental de la planta de tratamiento de agua residual actual.
- Según los resultados de los análisis realizados al afluente que abastece la PTAR municipal y su respectivo efluente, se puede afirmar que el vertimiento no cumple con los rangos mínimos establecidos en la resolución 631 de 2015 para DBO₅ y DQO. Sin embargo, teniendo en cuenta la insuficiencia de dichos resultados y que las diferentes unidades cumplen con los parámetros de diseño, se puede inferir que probablemente la problemática se enmarca en la operación de la PTAR por lo cual es necesario mejorarla además de capacitar adecuadamente a sus operarios.
- De acuerdo al análisis de eficiencia realizado a las unidades de tratamiento de la PTAR para los parámetros de no cumplimiento (DBO₅ y DQO), se puede deducir que los módulos que presentan menor eficiencia son los correspondientes al pre tratamiento y tratamiento primario.

- Los parámetros de diseño de la planta de tratamiento actual presentan cumplimiento con excepción del tiempo de retención y la carga orgánica volumétrica en el RAFA que se encuentran por debajo de los valores recomendados por la literatura.
- Según lo establecido en el artículo 183 del Ras 2017 la PTAR actual no cumple con la distancia mínima para la localización con relación al centro urbano la cual debe ser de 200 m, por tal motivo se considera ambientalmente Incompatible
- Con el fin de cumplir la normativa vigente que implica la reubicación de la PTAR, se recomienda realizar la construcción de un nuevo sistema de tratamiento mediante la implementación de un Tamiz estático, un desarenador y finalizar el tratamiento en una laguna de estabilización facultativa. Cabe señalar que el procedimiento sugerido se basa en las eficiencias teóricas de las unidades de tratamiento señaladas en la resolución 330 de 2017 (Ras 2017) y que la planta deberá ubicarse según lo estipulado en el artículo 183 del Ras 2017.
- Con base en el análisis técnico y económico realizado con la información disponible para el presente estudio, la solución inmediata a la problemática y que por su menor costo el municipio podría emprender en el corto plazo es establecer un plan de muestreo suficiente y adecuado que permita caracterizar de manera específica el afluente, el efluente de cada una de las unidades de tratamiento y el vertimiento. Sin embargo es importante señalar que mediante la implementación de la misma no se cumpliría con los parámetros ambientales de localización fuera del casco urbano.
- Se recomienda al municipio de Togüí establecer políticas y proyectos del manejo de las aguas residuales que permitan desarrollar procesos técnicos y económicos viables para el municipio, para lo cual se sugiere, entre otras, la gestión de información del alcantarillado municipal a través de un sistema de información que permita recopilar y almacenar datos de calidad de afluente y efluente, operación y mantenimiento del sistema de tratamiento y costos.

Capítulo IX

9. Bibliografía

- CALIDAD Y TRATAMIENTO DEL AGUA. Manual de suministro de agua comunitaria. American Water Works Association. Ed. Mc Graw-Hill Professional, 2002. 324 p.
- COLOMBIA.MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2017: normatividad .Bogotá, 2017.182 p.
- COLOMBIA.MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 631 de 2015.Por la cual se establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los alcantarillados públicos: normatividad .Bogotá, 2015.73 p.
- COLOMBIA. Alcaldía mayor del municipio de Toguí. Plan de desarrollo 2008-2011: informe. Toguí, 2008.109 p.
- COLOMBIA. Alcaldía mayor del municipio de Toguí. Esquema de ordenamiento territorial 2008-2011: informe. Toguí, 2008.28 p.
- D. LETTERMAN, Raymond. Calidad y tratamiento del agua. Manual de suministros de agua comunitaria. 5 Ed, México: McGraw – Hill, 2008. 347 p.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación: Citas y notas de pie de página. 2 ed. Bogotá: ICONTEC, 1995. 7 p. (NTC 1487)
- _____. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. 6 ed. Bogotá: ICONTEC, 2008. 41 p. (NTC 1486)
- _____.Referencias bibliográficas para libros, folletos e informes. 2 ed. Bogotá: ICONTEC, 2004. 41 p. (NTC 1160)
- O ‘Sullivan M. Evaluación de Impacto Ambiental. Ingeniería Ambiental. 2 ed, España: McGraw-Hill.2008.802 p.

- ROMERO ROJAS, Jairo A. Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño. Escuela Colombiana de Ingeniería .3ra Ed, Bogotá: Norma, 2000. 203 p.
- ROLIM MENDONCA, S. *Sistemas de lagunas de estabilización*. Bogotá: McGraw-Hill ,2000.
- UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. México, 2013.

Anexos

Anexo 1. Determinación de Variables. Afluente PTAR

No. Muestra	Hora	pH (unidades)	Sólidos Sedimentables (mL/L)	Conductividad (uS/cm)	Oxígeno disuelto (mg/L)	Caudal (L/s)
1	8:00	7,51	0,3	876	0,2	2,574
2	9:00	7,42	0,3	742	0,2	1,742
3	10:00	7,52	0,5	902	0,2	1,948
4	11:00	7,32	0,7	824	0,4	2,394
5	12:00	7,60	0,9	925	0,2	3,578
6	13:00	7,47	1,0	838	0,4	4,020
7	14:00	7,56	0,8	639	0,2	4,891
8	15:00	7,39	0,6	730	0,6	2,992
9	16:00	7,58	0,9	602	0,2	3,636
10	17:00	7,34	1,0	851	0,4	4,235
11	18:00	7,42	0,6	711	0,2	4,376
12	19:00	7,43	0,5	729	0,6	3,252
13	20:00	7,36	0,5	618	0,4	2,238
14	21:00	7,28	0,4	701	0,2	2,291
15	22:00	7,31	0,3	729	0,2	1,640
16	23:00	7,64	0,3	698	0,4	1,442
17	0:00	7,48	0,4	623	0,6	1,218
18	1:00	7,35	0,3	712	0,6	0,912
19	2:00	7,63	0,3	739	0,6	0,605
20	3:00	7,48	0,3	663	0,6	0,475
21	4:00	7,36	0,4	705	0,4	0,803
22	5:00	7,53	0,4	777	0,4	1,560
23	6:00	7,62	0,6	802	0,2	3,262
24	7:00	7,55	0,8	833	0,2	4,216
25	8:00	7,49	-	860	0,2	2,874

Fuente.CORPOBOYACÁ.2019

Anexo 2. Determinación de Variables In-Situ. Efluente PTAR

No. Muestra	Hora	pH (unidades)	Solidos Sedimentables (mL/L)	Conductividad (uS/cm)	Oxígeno disuelto (mg/L)	Caudal (L/s)
1	8:15	7,25	0,1	904	0,4	0,421
2	9:15	7,36	0,3	903	0,7	0,441
3	10:15	7,08	0,2	887	0,6	0,422
4	11:15	7,14	0,1	910	0,5	0,458
5	12:15	7,12	0,1	926	0,8	0,466
6	13:15	7,32	0,2	937	0,6	0,459
7	14:15	7,09	0,2	912	1,0	0,421
8	15:15	6,97	0,2	921	0,6	0,419
9	16:15	6,89	0,3	902	0,9	0,44
10	17:15	6,91	0,6	894	0,7	0,418
11	18:15	7,02	0,5	904	0,8	0,463
12	19:15	7,13	0,4	902	0,6	0,401
13	20:15	7,23	0,3	906	0,6	0,417
14	21:15	7,11	0,2	918	0,4	0,452
15	22:15	7,08	0,2	922	0,5	0,458
16	23:15	7,14	0,6	904	0,5	0,398
17	00:15	7,1	0,7	914	0,6	0,394
18	01:15	7,22	0,6	932	0,7	0,491
19	02:15	7,36	0,4	941	0,3	0,421
20	03:15	7,22	0,3	937	0,6	0,428
21	04:15	7,08	0,6	922	0,5	0,414
22	05:15	7,12	0,7	918	0,3	0,385
23	06:15	7,02	0,5	915	0,4	0,421
24	07:15	6,98	0,4	908	0,6	0,438
25	08:15	7,09		903	0,5	0,401

Fuente.CORPOBOYACÁ.2019