

Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales en el municipio de Socorro,
Santander

Luisa Fernanda Abril Ortiz y Jaime Leonardo Galvis Mateus

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Andrés Almeyda Ortiz

Magister en recursos hídricos y saneamiento ambiental

Codirector

Mario García Solano

Especialista en Ingeniería Sanitaria

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería civil

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Le agradezco a mi madre Ana Celia Mateus Herreño por apoyarme en este camino y siempre inspirarme a ser una mejor persona, por ser ese ejemplo superación, la cual me mostro que a través del estudio y el trabajo duro se puede progresar en esta sociedad tan desigual.

Le agradezco a mi hermano Darwin Fabian Galvis Mateus por haberme permitido seguir mi carrera supliendo el muchas veces el rol del hermano mayor y el hombre de la casa cuidando siempre la salud de mi mamá y apoyándola siempre que yo estuve ausente.

Le agradezco a todas mis tías, tíos y primas por ser parte de ese apoyo emocional y a quienes a través de su orgullo por mi camino en la vida siempre me dieron valor para alcanzar esta meta tan anhelada.

Le agradezco a mi amigo de la carrera universitaria Wilmer Leonardo Ordoñez Toledo por ser ese compañero de mil batallas para sacar adelante la difícil meta ser ingenieros civiles de la mejor universidad de Santander.

Le agradezco a mi compañera de trabajo de grado Luisa Fernanda Abril Ortiz por escoger este proyecto y escogerme como su compañero, por permitirme hacer el estudio sobre mi municipio natal y tener la resiliencia para pese a tantas dificultades continuar trabajando a mi lado y sacar adelante este proyecto.

Jaime Leonardo Galvis Mateus

Dedicatoria

Primeramente, a DIOS por ser mi fortaleza en los días difíciles.

A mi familia, por su amor y apoyo incondicional, por estar conmigo en cada etapa de mi vida, por sus enseñanzas y por ayudarme a crecer como persona.

A mi amigo Jaime por su paciencia, comprensión, esfuerzo y dedicación con este proyecto.

Luisa Fernanda Abril Ortiz

Agradecimientos

Al especialista en Ingeniería Sanitaria Mario García Solano quien estuvo muy presente en el desarrollo de la metodología y con su conocimiento se logró sortear varias dificultades y cumplir cabalmente con un desarrollo objetivo y técnico del proyecto en favor de la comunidad del Socorro.

Al Magister en recursos hídricos y saneamiento ambiental Andrés Almeyda Ortiz por la ayuda y orientación de este proyecto.

Al Gerente de Aguas del Socorro Cesar Augusto Ardila Cárdenas; quien estuvo muy dispuesto en colaborar con las consultas solicitadas a esta entidad encargada del acueducto, alcantarillado y saneamiento ambiental del municipio sobre el cual se realizó el proyecto y cuya información fue de gran ayuda para el desarrollo de este.

A la alcaldía municipal del Socorro por estar pendiente y responder las consultas solicitadas a esta; las cuales permitieron obtener datos esenciales para el desarrollo del proyecto.

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo General	18
1.2 Objetivos Específicos.....	18
2. Marco Teórico.....	19
2.1. Niveles de tratamiento de Aguas Residuales	20
2.1.1. Tratamiento Preliminar	20
2.1.2. Tratamiento Primario	21
2.1.3. Tratamiento Secundario	21
2.1.4. Tratamiento Terciario o Avanzado	21
2.2. Otros Procesos del Tratamiento de Aguas Residuales.....	22
2.2.1. Desinfección	22
2.2.2. Tratamiento de Lodos	22
2.2.3. Gases y Control de Olores	23
2.3. Tecnologías para el Tratamiento del Agua Residual	23
2.3.1. Reactor Anaerobio de Lecho de Lodos de Flujo Ascendente (UASB).	24
2.3.2. Lagunas	24

SELECCIÓN TECNOLOGÍAS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES 6

2.3.2.1. Lagunas Anaerobias.....	24
2.3.2.2. Lagunas Facultativas.....	25
2.3.2.3. Lagunas de Pulimiento.....	25
2.3.3. Wetland.....	25
2.3.4. Filtros Percoladores	25
2.3.5. Lodos Activados	26
3. Metodología	27
3.1 Justificación de la Metodología	27
3.2 Metodología Seleccionada.....	29
3.3 Descripción del Lugar de Estudio.....	29
3.4 Fase 1. Recolección de Información y Comprensión de Tecnologías	30
3.5 Fase 2. Preselección de Tecnologías.....	30
3.6 Fase 3. Matriz de Decisión y Selección de Tecnologías.....	32
3.6.1 Factores Evaluadores de la Matriz de Decisión.....	32
3.6.2 Funcionamiento de la Matriz de Decisión	33
4. Análisis de Resultados	36
4.1 Resultados de la Fase 1	36
4.1.1 Situación Actual de las Aguas Residuales en el Municipio.....	36
4.1.2 Disponibilidad de Terreno para Considerar Sistemas de Tratamiento con Lagunas y Wetlands	37
4.2 Resultados de la Fase 2.....	41
4.2.1 Cuestionario Ambiental y Técnico	41
4.2.2 Diagrama de Flujo.....	41

SELECCIÓN TECNOLOGÍAS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES 7

4.3 Resultados de la Fase 3	41
4.3.1 Porcentajes de Importancia de Factores Evaluadores	41
4.3.2 Consultas Adicionales.....	45
4.3.2.1 Requerimiento de Área	45
4.3.2.2 Remoción de DBO Y SST	46
4.3.3 Evaluación de la Matriz de Decisión	49
4.3.3.1 Resultados de Matriz de Decisión para UASB + Filtros Percoladores.....	50
4.3.3.2 Resultados de Matriz de Decisión para Filtros Percoladores + Lodos Activados.	50
4.3.3.2 Resultados de Matriz de Decisión para UASB + Lodos Activados.	50
4.3.3.4 Resultados de Matriz de Decisión a Lodos Activados Aireación Extendida.	50
4.4 Comparación de Resultados de Matrices de Decisión	51
5. Discusión.....	51
6. Conclusiones	52
7. Recomendaciones	53
Referencias Bibliográficas	56

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Factores Evaluadores Elegidos para la Matriz de Decisión</i>	32
Tabla 2. <i>Ubicación y Caudal de los Vertimientos de Agua Residual, Socorro</i>	36
Tabla 3. <i>Predios Rurales en Propiedad del Municipio de Socorro</i>	38
Tabla 4. <i>Investigación de Mercado de Predios en Socorro, Santander (febrero de 2022)</i>	39
Tabla 5. <i>Investigación de Mercado de Predios en Curití, Santander (febrero de 2022)</i>	39
Tabla 6. <i>Presupuesto de Socorro y Curití para la Vigencia 2020</i>	40
Tabla 7. <i>Valores Propuestos por la Empresa Aguas del Socorro</i>	42
Tabla 8. <i>Valores Propuestos por el Profesor Mario García Solano</i>	42
Tabla 9. <i>Propuesta de Consenso de Porcentajes de Importancia de los Factores Evaluadores de la Matriz de Decisión</i>	43
Tabla 10. <i>Área Requerida por Cada tecnología</i>	46
Tabla 11. <i>Comparación de Porcentajes de Remoción de DBO</i>	48
Tabla 12. <i>Comparación de Porcentajes de Remoción de SST</i>	49
Tabla 13. <i>Comparación de Calificaciones Globales de las Tecnologías Preseleccionadas</i>	51

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Diagrama de Flujo para la Preselección de Tecnologías</i>	31
Figura 2. <i>Matriz de Decisión Tipo</i>	35

Lista de Apéndices

Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS.

Apéndice A. Cuestionario tipo para cada tecnología propuesta

Apéndice B. Ubicación de vertimientos del agua residual en el municipio

Apéndice C. Cuestionario laguna cubierta anaerobia + laguna facultativa + laguna de pulimiento

Apéndice D. Cuestionario UASB + Laguna de pulimiento

Apéndice E. Cuestionario UASB + Wetland

Apéndice F. Cuestionario UASB + Filtros Percoladores

Apéndice G. Cuestionario UASB + Lodos Activados

Apéndice H. Cuestionario Lodos activados aireación extendida

Apéndice I. Cuestionario Filtros percoladores + Lodos activados

Apéndice J. Matriz de decisión aplicada a UASB + Filtros percoladores

Apéndice K. Matriz de decisión aplicada Filtros percoladores + Lodos activados

Apéndice L. Matriz de selección aplicada a UASB + Lodos activados

Apéndice M. Matriz de selección aplicada a Lodos activados aireación extendida

Apéndice N. Derecho de petición 1-Aguas del socorro-estado de aguas residuales

Apéndice O. Derecho de petición 2-Secretaría de planeación

Apéndice P. Derecho de petición 3-Aguas del socorro- porcentaje de Factores evaluadores

Apéndice Q. Respuesta Derecho de Petición 1-Informe de vertimientos Socorro 2021-2020

Apéndice R. Respuesta Derecho de Petición 2-Predios rurales en propiedad del municipio de El Socorro

Apéndice S. Respuesta Derecho de Petición 3-Rad No R-030 del 12-01-2022

Apéndice T. Respuesta de Mario García Solano- Factores Evaluadores

Resumen

Título: Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales en el municipio de Socorro, Santander *

Autor: Luisa Fernanda Abril Ortiz y Jaime Leonardo Galvis Mateus **

Palabras Clave: Aguas residuales, Tecnologías, Contaminación, Tratamiento, Sustentable, Anaerobio, Aerobio, Municipal.

Descripción: En este trabajo se evaluaron distintas tecnologías para el tratamiento del agua residual en el municipio de Socorro en Santander (Colombia), por medio de una metodología propuesta por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), titulada “Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales; guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas”. Para ello, se analizaron factores de tipo ambiental y técnico que presenta el municipio y las características (ventajas y desventajas) de varias tecnologías más sustentables y amigables con el ambiente propuestas por la UNAM, por medio de 3 fases (etapas) que involucraron: la comprensión de tecnologías para el tratamiento del agua residual; la aplicación de un cuestionario (para identificar las tecnologías más susceptibles a ser aplicadas) y la evaluación de estas por medio de una matriz de decisión para seleccionar y finalmente proponer las tecnologías que mejor se adaptan al municipio.

Esta investigación se realizó contando como apoyo con información oficial de entes competentes como la alcaldía del Socorro y la empresa de servicios públicos Aguas del Socorro S.A.-E.S.P., además, con el acompañamiento del especialista en Ingeniería Sanitaria Mario García Solano, quien ha sido profesor en la Universidad Industrial de Santander durante muchos años de la materia “Saneamiento”, cuyo objetivo fundamental es el tema de Agua Residual. Finalmente, al desarrollar la metodología planteada se obtuvo como resultado que la tecnología más adecuada y viable para el municipio es UASB +Filtros percoladores.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Andrés Almeyda Ortiz. Magister en recursos hídricos y saneamiento ambiental. Codirector: Mario García Solano. Especialista en Ingeniería Sanitaria

Abstract

Title: Selection of technologies for wastewater treatment in the municipality of Socorro, Santander

*

Author(s): Luisa Fernanda Abril Ortiz and Jaime Leonardo Galvis Mateus **

Key Words: Wastewater, Technologies, Contamination, Treatment, Sustainable, Anaerobic, Aerobic, Municipal.

Description: In this work, different technologies were evaluated for the treatment of wastewater in the municipality of Socorro in Santander (Colombia), through a methodology proposed by the National Autonomous University of Mexico (UNAM), entitled "Selection of technologies for the treatment of municipal wastewater; support guide for small and medium-sized cities". For this, environmental and technical factors presented by the municipality and the characteristics (advantages and disadvantages) of several more sustainable and environmentally friendly technologies proposed by UNAM were analyzed, through 3 phases (stages) that involved : understanding technologies for wastewater treatment; the application of a questionnaire (to identify the most likely technologies to be applied) and the evaluation of these by means of a decision matrix to select and finally propose the technologies that best adapt to the municipality.

This research was carried out with the support of official information from competent entities such as the Mayor's Office of Socorro and the public services company Aguas del Socorro SA-ESP, in addition, with the accompaniment of the specialist in Sanitary Engineering Mario García Solano, who has been a professor in the Industrial University of Santander for many years of the subject "Sanitation", whose main objective is the topic of Residual Water. Finally, when developing the proposed methodology, the result was obtained that the most appropriate and viable technology for the municipality is UASB + Trickling filters.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Andrés Almeyda Ortiz. Master's Degree in Water Resources and Environmental Sanitation. Co-director: Mario García Solano. Sanitary Engineering Specialist.

Introducción

El crecimiento desmedido de la población y el cambio climático han ocasionado graves deficiencias de los recursos hídricos, tan solo en los últimos 20 años la disponibilidad de agua por persona ha disminuido más del 20% (FAO, 2020), en el último siglo el consumo de agua ha aumentado por seis y actualmente millones de personas carecen de acceso a agua potable (UNESCO, 2020). Además, la inadecuada gestión del recurso hídrico, el exceso de fertilizantes agrícolas y las aguas residuales empeoran la escasez y la calidad del agua (Worldbank, 2019), ocasionando así grandes problemas ambientales, sociales, económicos y políticos (Winpenny, Heinz and, & Koo-Oshima, 2013); según la ONU, en el mundo “entre el 80% y el 90 % de las aguas residuales se liberan al medio ambiente sin ningún tipo de tratamiento” (Naciones Unidas, 2020).

Otro aspecto importante para considerar es el manejo, tratamiento y disposición del agua residual ya que estos contribuyen a la producción de gases de efecto invernadero (GEI) por procesos de descomposición de la materia orgánica y otras actividades (Noyola, Morgan, & Guereca, 2013), según la UNESCO el tratamiento de las aguas residuales “genera entre un 3% y un 7% de las emisiones de GEI” (UNESCO, 2020). Por ello, es importante adoptar medidas sociales, institucionales y tecnológicas que busquen atenuar los problemas de escasez y contaminación de este recurso hídrico (UNESCO, 2020), ya que invertir eficientemente en el tratamiento del agua residual y saneamiento es fundamental para mejorar la calidad de vida de las personas, la salud y el medio ambiente (World Bank Group, 2020).

SELECCIÓN TECNOLOGÍAS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES 15

En el caso de la región, en el departamento, “El 44% de los pueblos comuneros y guanentinos no tienen PTAR. San Gil y Socorro, las principales poblaciones del sur de Santander, no tienen plantas de tratamiento de aguas sucias y estas caen directamente a los ríos Fonce y Suárez” (Ríos, 2021 – Vanguardia).

Además, según un estudio de la Universidad Libre en 2018 de los 17 municipios de la región comunera solo 4 tienen una PTAR funcionando. Estos municipios son Palmas del Socorro, Galán, Guapota y Palmar. Dentro de estos, el que cuenta con procedimiento más eficiente es el municipio de Guapota ya que al examinar detenidamente los diversos aspectos de este municipio, se obtuvo los mejores resultados en la remoción de contaminantes de aguas residuales de la provincia comunera (Hernández Gómez & Larrota Rangel, 2018).

En un informe ambiental de la contraloría general de Santander para la vigencia 2017 se dan a conocer datos sobre algunos de estos municipios, en los casos de Palmas del Socorro y Guapota se usan Reactores UASB (Contraloría General de Santander, 2018), en el municipio del Palmar se cuenta con un sistema de tratamiento de agua residual rudimentario con desarenador, sedimentador, clarificador circular y planta clarificadora según un trabajo de grado de 2019 de la Universidad Libre (Ayala Beltrán, D. M., 2019) y en el municipio de Galán opera una PTAR con sistema de lodos activados según describe un trabajo de grado de 2021 de las Unidades Tecnológicas de Santander (Murcia Piratoa & Montañez Pulido, 2021).

Estos problemas de escasez hídrica, contaminación y la falta de plantas de tratamiento de aguas residuales afectan a la población mundial, por ello el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M.), integra procesos y tecnologías un poco más sustentables con el ambiente en su libro “Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales; guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas”, cuya metodología es

SELECCIÓN TECNOLOGÍAS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES 16

aplicable para sistemas municipales con caudales menores a 200 l/s (alrededor de 100,000 habitantes equivalente) (Noyola, Morgan, & Guereca, 2013) y en la cual se basa este proyecto para proponer las tecnologías que mejor se adaptan al municipio de Socorro, conociendo además, que la adecuada gestión de las aguas residuales es fundamental para la salud, economía y seguridad alimentaria de un país, ya que disminuye la contaminación, los desechos y la mala calidad del agua (Worldbank, 2019).

La metodología de la UNAM contempla varias tecnologías y procesos para el tratamiento de las aguas residuales municipales, con el objetivo de remover el material contaminante; orgánico e inorgánico, y mejorar la calidad del agua para su posterior descarga o reutilización (Noyola, Morgan, & Guereca, 2013). Dentro del tratamiento del agua residual se involucran procesos físicos (cribado, sedimentación, filtrado, entre otros), químicos (desinfección) y procesos biológicos: sistemas aerobios como los lodos activados, filtros percoladores y humedales; y anaerobios como los reactores UASB (Noyola, Morgan, & Guereca, 2013).

Los sistemas biológicos degradan o transforman el material orgánico presente en las aguas residuales por medio de distintos microorganismos que actúan de forma aerobia (requieren oxígeno) o anaerobia (funcionan sin oxígeno) (Noyola, Morgan, & Guereca, 2013). El tratamiento anaerobio ofrece distintas ventajas como: baja producción de biomasa, bajo requerimiento de nutrientes y generación de metano, el cual puede ser usado energéticamente (Flotats et al., 2016), mientras que el tratamiento aerobio ofrece mayor calidad del agua tratada y permite cumplir regulaciones ambientales estrictas. Por ello, las tecnologías aerobias y anaerobias usualmente se complementan, para obtener resultados más eficientes y económicos (Orozco, 2014). Finalmente, el agua residual tratada puede ser reutilizada y empleada en distintas actividades como el riego de

aguas verdes y la agricultura, lavado de autos, carga de cisternas para control de incendios, entre otras (Noyola, Morgan, & Guereca, 2013).

De esta manera y teniendo en cuenta que el municipio no cuenta con Planta de tratamiento de agua residual, este proyecto busca proponer las tecnologías que mejor se adapten a las condiciones del municipio de Socorro en Santander, para el tratamiento de las aguas residuales que genera y evitar que caigan directamente a las fuentes hídricas (ríos, quebradas). Además, la tecnología escogida podrá ser utilizada como ejemplo para lugares que presenten características similares a las del municipio y si es de interés para la alcaldía municipal de Socorro, podrá ser utilizado como estudio previo para implementar su planta de tratamiento de agua residual (PTAR).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Proponer tecnologías y procesos sustentables para el tratamiento de las aguas residuales del municipio de Socorro, Santander para mitigar impactos ambientales negativos.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar las opciones tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales que sean sustentables para el municipio de Socorro.

Analizar características ambientales y técnicas del municipio que permitan priorizar la tecnología a implementar.

Evaluar las distintas opciones de tratamiento de agua residual aplicables al municipio de Socorro para optar la tecnología más adecuada.

2. Marco Teórico

Las aguas residuales son la combinación de distintas corrientes de agua descargada a los sistemas de drenaje urbano, provenientes de hogares, instituciones, oficinas, comercios e industrias y se componen de una gran variedad de sustancias contaminantes (Noyola, Morgan, & Guereca, 2013), por ello deben ser tratadas de manera adecuada antes de su disposición final a los cuerpos receptores, y así evitar efectos dañinos en la salud de la población y la contaminación del ambiente, como la generación de olores, el agotamiento del oxígeno disuelto, contaminantes tóxicos y enfermedades causadas por microorganismos patógenos (López et al., 2017).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales integran operaciones y procesos físicos, químicos y biológicos, con la finalidad de depurar el agua (Cestti et al., 2017); buscando reducir la carga orgánica, demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) o la demanda química de oxígeno (DQO), remover o reducir nutrientes como el nitrógeno N y el fósforo P para evitar la contaminación del agua y evitar problemas de eutrofización en las aguas receptoras (proliferación de algas), remover organismos patógenos y parásitos, entre otras (Lazcano, 2016), hasta alcanzar la calidad requerida para su disposición (dependiendo de los procesos que integren o hayan integrado la planta de tratamiento) (Noyola, Morgan & Guereca, 2013) y cumplir con las reglamentaciones que permitan la reutilización del agua residual tratada o su descarga en los respectivos receptores (Lazcano, 2016). En Colombia la resolución 0631 de 2015 establece los parámetros y valores máximos permitidos en los vertimientos de aguas superficiales y los sistemas de alcantarillado público (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) y la Resolución

1207 de 2014 dicta disposiciones para el uso de aguas residuales tratadas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

La planeación, selección y diseño de los sistemas de tratamiento de aguas residuales deben considerar las características del agua residual que se tratará como el tipo, caudal y concentración de contaminantes, así como, los aspectos económicos, técnicos y el impacto ambiental y social que generan, atendiendo el contexto de cada población y siendo preferiblemente, innovadoras y ambientalmente sustentables (Noyola, Morgan, & Guereca, 2013).

Por último, es importante considerar estrategias que permitan la reutilización del agua residual tratada en distintas actividades como la agricultura, piscicultura, recarga de acuíferos (Lazcano, 2016), carga de cisternas para el control de incendios, lavado de autos y pisos, descarga de sanitarios, entre otras (Noyola, Morgan, & Guereca, 2013). De esta manera se puede ayudar a mitigar la escasez hídrica especialmente en países en desarrollo o con gran demanda de agua de riego, lo cual permite un uso más eficiente y sostenible del agua y ofrece beneficios ambientales, económicos, sociales y políticos (Winpenny, Heinz and & Koo-Oshima, 2013).

2.1. Niveles de tratamiento de Aguas Residuales

El nivel de tratamiento de las aguas residuales y la complejidad de este depende del uso o disposición final que se le dará al agua tratada, hasta alcanzar la calidad requerida de acuerdo con la normatividad respectiva. A continuación, se describe cada nivel.

2.1.1. Tratamiento Preliminar

En este nivel se retienen componentes sólidos gruesos y sólidos finos como arenas, basuras, plásticos, piedras, ramas, entre otros, para facilitar el tratamiento posterior y evitar problemas de

operación y mantenimiento dentro del proceso de tratamiento. Esto se realiza por medio de cribas o rejillas, desarenadores, flotadores o desgrasadores (Cestti, Ardiles & Nolasco, 2017).

2.1.2. Tratamiento Primario

En este nivel se remueve una porción de sólidos y de materia orgánica suspendida, por medio de la fuerza de gravedad principalmente, en procesos de sedimentación y permite alcanzar porcentajes de remoción de entre 60% y 70% de sólidos suspendidos totales (SST) y un 30% en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) (Noyola, Morgan & Guereca, 2013).

2.1.3. Tratamiento Secundario

En este nivel se elimina la materia orgánica biodegradable por medio de procesos biológicos, en los cuales los microorganismos transforman los contaminantes presentes en el agua residual en energía para su metabolismo, materia celular y otros compuestos orgánicos e inorgánicos. Estos procesos ofrecen altas eficiencias de remoción a un bajo costo y, además, en algunos casos pueden ser usados para reducir nutrientes como el nitrógeno y el fósforo (Noyola, Morgan & Guereca, 2013).

2.1.4. Tratamiento Terciario o Avanzado

Este nivel se implementa cuando es necesario mejorar la calidad del agua, dependiendo de la disposición final que se le dará al agua residual tratada y cumplir condiciones estrictas de descarga o cuando será reutilizada en un fin específico. La finalidad de este tratamiento es eliminar compuestos como sólidos suspendidos, nutrientes y material orgánico remanente no biodegradable (Noyola, Morgan & Guereca, 2013).

2.2. Otros Procesos del Tratamiento de Aguas Residuales

2.2.1. Desinfección

Este proceso se usa cuando se requiere un control de microorganismos patógenos y reducir la cantidad de bacterias y virus presentes en el agua residual tratada, por medio de métodos como la cloración, la ozonización y la radiación ultravioleta (Cestti, Ardiles & Nolasco, 2017).

2.2.2. Tratamiento de Lodos

El tratamiento de las aguas residuales genera lodos producto de la biotransformación del agua residual. En los sedimentadores primarios y secundarios se producen lodos con altas concentraciones de materia orgánica e inorgánica, estos se retiran periódicamente y deben ser acondicionados y tratados antes de su disposición final (Cestti, Ardiles & Nolasco, 2017).

Inicialmente los lodos deben ser espesados con el objetivo de aumentar la concentración de sólidos y disminuir la cantidad de agua, posteriormente se estabilizan por medios químicos (aumentan la cantidad de lodos y los puede convertir en residuos peligrosos) o biológicos por medio de un proceso de digestión aerobio o anaerobio (los lodos disminuyen), finalmente deben ser deshidratados por medio de un filtro prensa, centrifuga, lechos de secado, entre otros (Orozco, 2014). Por otra parte, los residuos sólidos generados en la etapa de pretratamiento deben ser dispuestos de manera adecuada en rellenos sanitarios (Cestti, Ardiles & Nolasco, 2017).

2.2.3. Gases y Control de Olores

Las emisiones de gases producidas en los sistemas de tratamiento deben ser manejadas apropiadamente ya que la liberación de gases de efecto invernadero contribuyen al cambio climático, además algunos de estos gases pueden producir molestias en la comunidad por la generación de malos olores (Noyola, Morgan & Guereca, 2013). El tratamiento aerobio genera principalmente dióxido de carbono (CO_2), mientras que en el tratamiento anaerobio se generan subproductos como el metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y gas Sulfhídrico (H_2S) el cual es altamente oloroso (Orozco, 2014).

2.3. Tecnologías para el Tratamiento del Agua Residual

Distintas tecnologías integran un tren de tratamiento de aguas residuales, estas se pueden dividir en dos grandes grupos que son los tratamientos fisicoquímicos como: el tamizado, filtración, sedimentación, flotación, adsorción, absorción, oxidación química, precipitación e intercambio iónico, entre otras y los tratamientos biológicos que se encargan de degradar o transformar el material orgánico por medio de microorganismos, estos incluyen sistemas aerobios (requieren oxígeno) y procesos anaerobios (no requieren oxígeno) (Noyola, Morgan & Guereca, 2013).

El tratamiento aerobio suele dividirse en dos grupos que son tratamientos en medio suspendido como los lodos activados, zanjonés de oxidación y las lagunas de estabilización y los tratamientos en medio fijo como los filtros biológicos o percoladores y los biodiscos. El tratamiento anaerobio puede ser aplicado a aguas residuales domésticas e industriales y ofrece eficiencias de remoción de hasta el 80% (Orozco, 2014).

2.3.1. Reactor Anaerobio de Lecho de Lodos de Flujo Ascendente (UASB).

El reactor UASB es una tecnología anaerobia que ofrece la capacidad de retención de altas concentraciones de lodo y una separación eficiente de sólidos, líquidos y agua (López et al., 2017). Consiste en un tanque rectangular o circular, basado en la formación de una cama de lodos ubicada en el fondo del reactor y en la parte superior del reactor se coloca un sistema de captación de biogás. Este además retiene los microorganismos por medio de sedimentación, aumentando así el tiempo de retención celular (TRC) y alcanza eficiencias de remoción de entre el 60% a 70 % de DQO (Noyola, Morgan & Guereca, 2013).

2.3.2. Lagunas

Las lagunas son estanques diseñados para el tratamiento del agua residual por medio de procesos biológicos de interacción entre los microorganismos y la materia orgánica y se implementan cuando se requiere un alto grado de remoción de organismos patógenos (Cestti, Ardiles & Nolasco, 2017), además son un tratamiento de bajo costo y fácil manejo y operación, pero requieren de grandes extensiones de terreno para su construcción y necesitan de climas tropicales o semitropicales para actuar adecuadamente (Lazcano, 2016).

2.3.2.1. Lagunas Anaerobias. Estas lagunas suelen usarse como primera etapa de tratamiento y en aguas residuales que presentan alta carga orgánica. Se deben diseñar al menos dos unidades de tratamiento para permitir la operación de una durante la limpieza de lodos, además estas lagunas no son recomendables en zonas con temperatura menor a 15° C o que presenten alto contenido de sulfatos (Cestti, Ardiles, & Nolasco, 2017).

2.3.2.2. Lagunas Facultativas. Estas lagunas presentan una zona aeróbica en la parte superior donde se produce la oxidación aerobia de la materia orgánica mantenida por algas y bacterias, una zona facultativa donde se fermenta la materia orgánica por medio de bacterias facultativas y una zona anaeróbica en la parte inferior en la cual el oxígeno disuelto está ausente y se producen procesos de descomposición anaerobia por medio de microorganismos anaerobios metanogénicos y acetogénicos (Lazcano, 2016).

2.3.2.3. Lagunas de Pulimiento. Estas lagunas se encargan de la remoción de patógenos, sobre todo de virus, larvas de helmintos y quistes de protozoarios, presentan poca acumulación de lodos y su profundidad suele ser de un metro, lo cual puede contribuir al crecimiento de macrófitas y atraer mosquitos (Lazcano, 2016).

2.3.3. *Wetland*

Los *Wetland* son humedales artificiales donde se forma un filtro con materiales granulares (usualmente grava) en el cual se desarrolla un sistema de raíces de plantas donde fluye en agua residual. Este tipo de tratamiento genera agua de buena calidad ya que puede llegar a eliminar eficientemente bacterias y microorganismos patógenos, tiene bajos costos de operación, fácil instalación y mantenimiento, sin embargo, requiere de gran área para su funcionamiento (Noyola, Morgan & Guereca, 2013).

2.3.4. *Filtros Percoladores*

Son dispositivos donde el agua residual entra en contacto con microorganismos adheridos en forma de biopelícula a un empaque que puede ser natural (material pétreo) o sintético (plástico),

este se encuentra suficientemente espaciado permitiendo el flujo del aire de manera natural por diferencia de temperaturas entre el ambiente interno del reactor y el exterior. Permiten alcanzar eficiencias de 70% a 85% de remoción de contaminantes (Noyola, Morgan & Guereca, 2013).

2.3.5. Lodos Activados

Este tratamiento aerobio posee una superficie altamente activa para la adsorción de material coloidal y suspendido, consiste en una masa floculante de microorganismos que se encuentran mezclados con la materia orgánica, que usarán para reproducirse y sobrevivir. En este tratamiento se oxida la materia orgánica a CO_2 , H_2O , NH_4 y nueva biomasa celular (Lazcano Carreño, 2016). La masa de microorganismos se agrupa por medios mecánicos o inyección de aire, la mezcla de estos con el agua residual es llamado licor mezclado, el cual luego pasa a un clarificador secundario donde el lodo activado se sedimenta, una porción de este lodo debe ser retornado al tanque para mantener la relación entre el sustrato y los microorganismos (Noyola, Morgan & Guereca, 2013).

3. Metodología

3.1 Justificación de la Metodología

Dentro de las herramientas para la selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales existen diversos documentos: proyectos, libros, tesis, artículos científicos entre otros. Para esta investigación fue recomendado por el director de proyecto el libro “Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales” publicado por la U.N.A.M. en 2013, su información y metodología fue comparada con publicaciones recientes y contemporáneas que surgen de una revisión de antecedentes de diversas investigaciones y métodos distintos al de la U.N.A.M.

La tesis de maestría “Herramienta de Selección de Tecnologías de Tratamiento de Aguas Residuales basada en Modelos de Decisión Multicriterio Caso de Estudio: Municipios de Colombia” publicada por la Universidad de los Andes en 2017 es un documento muy completo que ofrece información de provecho y una metodología interesante, pero tiene como caso de estudio cualquier municipio de Colombia y ofrece posibles soluciones para municipios con poblaciones muy superiores a la de interés, además, para lograr especificar el caso de estudio necesita demasiada información, como pruebas de laboratorio, opiniones de expertos y el algoritmo de selección propuesto no permite su modificación de criterios y relevancia de estos para el diseñador (Gutiérrez & Rodríguez, 2017).

El artículo científico “Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales” publicado por la Universidad del Valle en 2015, es un documento de utilidad enfocado en poblaciones pequeñas de menos de 100 mil habitantes, pero

con pocas fases en el proceso metodológico y muy cortas, por lo tanto sólo ofrece soluciones por métodos naturales, también en su matriz de decisión tiene como limitante los criterios y los valores de importancia asociados a estos, los cuales son algo fijo para el diseñador (Bernal, Cardona, Galvis-Castaño, & Peña, 2015).

El artículo científico “Modelo de selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades” publicado por la Universidad Tecnológica de Pereira en 2015, es un documento con información beneficiosa enfocado en poblaciones pequeñas de menos de 100 mil habitantes, pero con pocas fases en el proceso y tecnologías aplicables al estudio, por ello se queda corto en criterios importantes para la selección, además, tiene como limitante los criterios y los valores de importancia asociados a estos, los cuales son algo fijo para el diseñador (Guerrero, 2015).

El libro “Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales” publicado por la U.N.A.M. en 2013 es un documento muy completo y bien estructurado, en la parte teórica cuenta con información detallada de cada tecnología existente, tiene 3 fases definidas y explicadas de manera apropiada y se enfoca en municipios con población menor a 100 mil habitantes. En su metodología incorpora una investigación realizada durante varios años y mejorada teniendo en cuenta la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el tratamiento de aguas residuales de América latina y el caribe, y cuenta con la colaboración del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo de Canadá, adoptando así, procesos y tecnologías más sustentables. Como principal virtud esta sugiere criterios para la conformación de la matriz de decisión, pero da libertad al diseñador de eliminar los que no le parezcan convenientes y agregar otros que considere necesarios, además no asigna valores de relevancia a cada criterio,

sino que los deja como una decisión autónoma del diseñador ya que es él quien debe establecer las necesidades prioritarias del municipio (Noyola, Morgan & Guereca, 2013).

Al comparar estos documentos que brindan herramientas para el desarrollo de la investigación se evidencia que todos proponen una matriz, algoritmo o vector de toma de decisiones en el cual hay criterios importantes y una ponderación de estos para poder escoger la opción más conveniente. El más idóneo es el publicado por la U.N.A.M. debido a que brinda una contextualización de diversas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales en municipios medianos y pequeños además de ofrecer una metodología más autónoma para el diseñador donde es él quien decide qué criterios usar y que relevancia tendrán estos, lo cual es importante ya que permite que la selección de la tecnología sea personalizada y detallada para el municipio de interés.

3.2 Metodología Seleccionada

Las actividades desarrolladas se realizaron en 3 fases, enfocadas en la metodología propuesta por la U.N.A.M. publicada en 2013 en el libro “Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales, guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas”.

3.3 Descripción del Lugar de Estudio

Socorro es un municipio del departamento de Santander, perteneciente a la Provincia Comunera y cuya economía es principalmente agrícola (Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), 2020). Tiene una población de más de 32.965 habitantes (Contaduría General de la Nación, 2020) y una temperatura que varía de 18°C a 25°C (Cedar Lake Ventures, Inc., sf).

3.4 Fase 1. Recolección de Información y Comprensión de Tecnologías

En la primera fase se procedió a realizar la lectura y comprensión del proceso propuesto por la U.N.A.M., además de la información acerca de las tecnologías de tratamiento de agua residual sugeridas allí. Paralelamente a esta actividad fue necesario determinar información acerca del municipio como: el tratamiento actual de las aguas residuales y los predios en propiedad del municipio alejados de la zona urbana (ubicación, área, destino), esta consulta se hizo con el objetivo de considerar sistemas de tratamiento con lagunas y Wetlands, dicha información fue solicitada y conseguida mediante derechos de petición realizados a las entidades competentes.

3.5 Fase 2. Preselección de Tecnologías

Esta fase incluyó la revisión de aspectos importantes a considerar de tipo ambiental y técnico por medio de un cuestionario presente en el apéndice A, el cual se aplicó a distintas tecnologías propuestas por la U.N.A.M. y permitió reconocer tecnologías que no son recomendables para aplicar en el municipio. En este, además, se descartaron preguntas de tipo económico y de diseño ya que estas se encuentran fuera del alcance del proyecto.

Posterior a esto, se empleó un diagrama de flujo que permitió filtrar las tecnologías, ya que este las separa en dos grandes grupos dependiendo de si hay disponibilidad de área. En caso afirmativo se sugieren sistemas Compactos (tratamientos con bajo requerimiento de área) como:

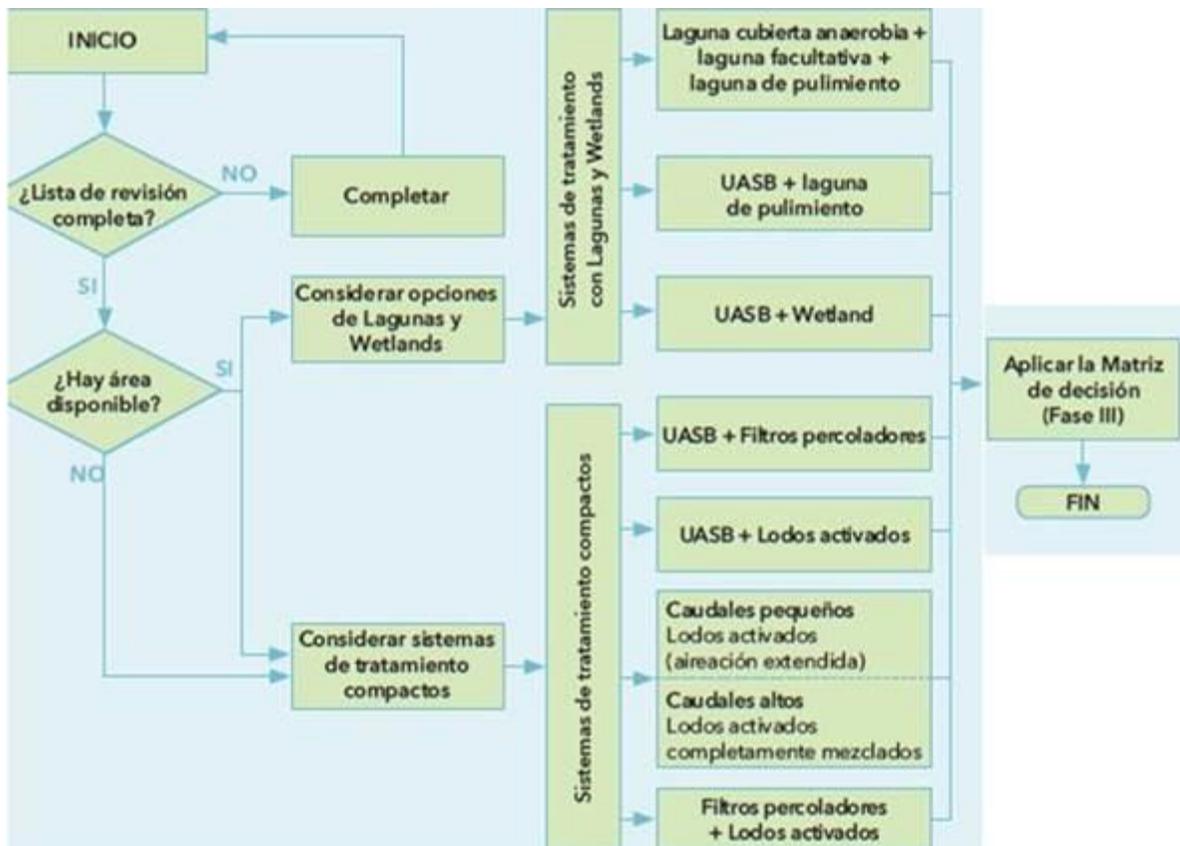
- UASB + Filtros percoladores
- UASB + Lodos activados
- Lodos activados con aireación extendida
- Filtros percoladores + Lodos activados.

Y sistemas de tratamiento con Lagunas y Wetlands como:

- Laguna cubierta anaerobia + laguna facultativa + laguna de pulimiento
- UASB + laguna de pulimiento
- UASB + Wetland

En caso contrario, al no tener disponibilidad de área se sugieren únicamente los sistemas de tratamiento Compactos (Noyola, Morgan & Guereca, 2013).

Figura 1. Diagrama de Flujo para la Preselección de Tecnologías



Nota: Adaptado de Noyola, A., Morgan, J. and Guëreca, L., (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. 1st ed. Universidad Nacional Autónoma de México

3.6 Fase 3. Matriz de Decisión y Selección de Tecnologías

Se empleó una matriz de decisión sugerida por la guía, para elegir las mejores tecnologías a partir de una perspectiva técnica. Esta matriz correlaciona los diversos puntos que tienen la posibilidad de ser valorados en un proceso de tratamiento de agua bajo cierta situación de aplicación, por medio de la asignación de calificaciones de varios factores evaluadores según los criterios del o los evaluadores. Los factores reciben una ponderación según su trascendencia, en funcionalidad de cada caso de evaluación.

Esta técnica posibilita que una evaluación de tipo cualitativa sea más objetiva, además garantiza que entre más capacitados y profesionales sean los colaboradores en fijar los valores de ponderación y las calificaciones de los procesos, más confiable será la elección generada por medio de la matriz (Noyola, Morgan & Guereca, 2013).

3.6.1 Factores Evaluadores de la Matriz de Decisión

Siguiendo la metodología, fue necesario definir los factores a evaluar dentro de la matriz de decisión. Teniendo presente el alcance del proyecto se suprimieron factores sugeridos como costo, diseño y construcción; de esta manera los factores evaluadores que se tuvieron en cuenta fueron los siguientes:

Tabla 1. Factores Evaluadores Elegidos para la Matriz de Decisión

No	Factores evaluadores elegidos
1	Aplicabilidad del proceso
2	Generación de residuos
3	Aceptación por parte de la comunidad

No	Factores evaluadores elegidos
4	Generación de subproductos con valor económico o de uso
5	Vida útil
6	Requerimiento de área
7	Operación
8	Entorno e impacto al medio ambiente

Nota: Adaptado de Noyola, A.; Morgan, J.M. and Guereca, L. (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales; guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas, primera edición, UNAM, México, pp. 2, 8, 11, 35, 43, 57-64, 72-73

Luego, fue necesario determinar un porcentaje de importancia para cada uno de ellos, así que se consultaron expertos en el tema. Desde la academia se solicitó la opinión del profesor Mario García Solano de la Universidad Industrial de Santander (UIS) y en el ámbito Institucional se solicitó la opinión a la empresa Aguas del Socorro S.A-E.S.P.

De esta manera y con ambos puntos de vista como base, se procedió a realizar un consenso y unificar conceptos teniendo en cuenta información adicional sobre el municipio y literatura disponible sobre el tema, para así presentar una propuesta desde el criterio del grupo de trabajo y con su debida justificación.

3.6.2 Funcionamiento de la Matriz de Decisión

La matriz consta de 5 columnas (A, B, C, D, E) y 21 renglones útiles.

En la columna A se muestran los valores de ponderación para los múltiples factores a evaluar del proyecto, que se identifican en la columna B. Estos son valorados para cada propuesta técnica con una calificación que se encuentra en la columna C.

Originalmente en la columna C se evalúa cada factor y subfactor de la columna B al otorgar un valor de cero cuando el aspecto evaluado no aplique, 1 cuando el proceso cumpla con el aspecto en forma deficiente, 3 cuando cumpla con el aspecto en forma adecuada y 5 cuando el proceso cumpla con el aspecto evaluado en forma muy buena o excelente, sin embargo se decidió hacer un aporte metodológico percibiendo que no hay punto medio entre cumplir un aspecto adecuadamente o cumplirlo de manera excelente y lo mismo ocurre con las calificaciones de cumplir un aspecto de forma deficiente o adecuada, por ello, para dar más sensibilidad a las calificaciones posibles en la matriz se definieron puntos medios entre estas calificaciones posibles. En consecuencia, se calificó con un valor de 4 cuando el proceso cumple con el aspecto en forma sobresaliente y calificar con un valor de 2 cuando el proceso cumple con el aspecto en forma regular.

En la columna D, la calificación asignada a cada factor (columna C) se divide entre la calificación máxima que tienen la posibilidad de obtener (calificación de 5) excepto para las casillas 7.6 D y 8.7 D, puesto que esto ya se hizo desde las calificaciones de los subfactores, según con las normas en la misma matriz. En la columna E se multiplica el valor de cada renglón de la columna D por el valor ponderado de la columna A y al final se suman todos los renglones de la columna E para obtener la calificación total (casilla 9 E) del proceso evaluado bajo las condiciones ponderadas en la columna A. Finalmente, el proceso que obtenga la mayor calificación va a ser el seleccionado, debe tenerse en cuenta que la calificación más alta posible alcanzable es de 100 puntos (Noyola, Morgan & Guereca, 2013).

Figura 2. Matriz de Decisión Tipo

#	Porcentaje de importancia (%)	Factor evaluado	C	D=C/5	E=D*A
	A	B			
1		Aplicabilidad del proceso			
2		Generación de residuos			
3		Aceptación por parte de la comunidad			
4		Generación de subproductos con valor económico o de uso			
5		Vida útil			
6		Requerimiento de área			
7		Operación			
7.1	-----	Flexibilidad de la operación			
7.2	-----	Confiabilidad del proceso			
7.3	-----	Complejidad de operación del proceso			
7.4	-----	Requerimiento de personal			
7.5	-----	Disponibilidad de repuestos y centros de servicio			
7.6	-----	Sumar C7.1, C7.2, C7.4 y dividir en 25, resultado en D7.4			
8		Entorno e impacto ambiental			
8.1	-----	Influencia de la temperatura			
8.2	-----	Producción de ruido			
8.3	-----	Contaminación visual			
8.4	-----	Producción de malos olores			
8.5	-----	Producción de GEI			
8.6	-----	Condiciones para la reproducción de animales dañinos			
8.7	-----	Sumar C8.1, C8.2, C8.3, C8.5, C8.6 y dividir en 30, resultado en D8.7			
9	100	SUMAR LOS VALORES DE LA COLUMNA E Y ANOTAR EL RESULTADO EN LA CASILLA E9			

Nota: Adaptado de Noyola, A.; Morgan, J.M. and Guereca, L. (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales; guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas, primera edición, UNAM, México, pp. 2, 8, 11, 35, 43, 57-64, 72-73

4. Análisis de Resultados

4.1 Resultados de la Fase 1

4.1.1 Situación Actual de las Aguas Residuales en el Municipio

Sobre la situación actual de las aguas residuales se obtuvo la siguiente respuesta por parte de la empresa de Aguas del Socorro S.A.-E.S.P.; “El municipio no cuenta con sistema centralizado de tratamiento de aguas residuales domésticas PTARD de modo que los emisarios finales corresponden a cada salida de los subsectores del sistema de alcantarillado municipal”. En el informe proporcionado por la empresa de Aguas del Socorro se identificaron 6 vertimientos en el área urbana del municipio; cada uno presenta información de ubicación, coordenadas y caudal (Aguas del Socorro S.A E.S.P., 2021), esta información se sintetiza en la tabla 2 y apéndice B.

Tabla 2. *Ubicación y Caudal de los Vertimientos de Agua Residual, Socorro*

ID	Nombre del vertimiento	X	Y	Caudal (L/s)
V1	La Guayacana	6°28'5.55" N	73°16'0.78" W	20.3
V2	La Libertad	6°28'10.35" N	73°15'56.95" W	30
V3	Naranjito	6°28'16.68" N	73°15'49.23" W	3.56
V4	Terminal	6°28'18.97" N	73°15'47.84" W	0.72
V5	Jaboncilla	6°28'26.30" N	73°15'40.18" W	7.59
V6	Villa Madrigal	6°28'34.00" N	73°15'41.70" W	3.07
TOTAL				65.24

Nota: Adaptado de Aguas del Socorro S.A.-E.S.P., (2021). informe autodeclaración de vertimientos

Los 6 vertimientos mencionados antes permanecen distribuidos en diversos sitios dentro del municipio, ellos recolectan las aguas servidas de las casas del área urbana por medio de la red pública de Alcantarillado del municipio del Socorro, Santander.

“El sector de predominación y población atendida del sector producen primordialmente aguas domesticas residenciales y los únicos suscriptores no residenciales del área corresponden al Sector Oficial; lo que posibilita establecer que no hay generadores de aguas residuales industriales, descartándose la existencia de recursos tóxicos contaminantes representativos”. (Aguas del Socorro S.A E.S.P., 2021)

4.1.2 Disponibilidad de Terreno para Considerar Sistemas de Tratamiento con Lagunas y Wetlands

Sobre el área disponible se obtuvo información por parte de la Alcaldía del municipio, acerca de una serie de lotes los cuales pese a su gran extensión de terreno o ubicación geográfica (alejados de la zona urbana y/o con pendientes favorables para el transporte del agua residual) fueron descartados para el fin del proyecto ya que: una agrupación de lotes en el pasado fue un relleno sanitario y toda construcción allí sería inestable por procesos de consolidación (Rivera Vázquez, 2012); otra agrupación de predios contiguos están destinados a una futura urbanización llamada “Ciudadela Tamacara” (Ciudadela Tamacara, 2019); otro lote es un acceso vial a una vereda llamada “Caraota” y el otro lote disponible es un humedal con uso institucional (Alcaldía Socorro Santander, 2022). Lo mencionado anteriormente se visualiza en la tabla 3.

Tabla 3. *Predios Rurales en Propiedad del Municipio de Socorro*

No. Lote	Tipo de terreno	Destino del suelo	Descripción	Área (m2)
1	Agrupado	Agropecuario	Antiguo relleno sanitario	82500
2	Agrupado	Uso publico	Futura Urbanización	19045
3	Individual	Uso publico	Acceso vial vereda Caraota	2640
4	individual	Institucional	Humedal	10000

Nota: Adaptado de Alcaldía de Socorro, Santander. (2022). Información proporcionada

De esta manera se evaluó la posibilidad de adquirir predios para no descartar sistemas con grandes requerimientos de área como los sistemas de tratamiento con Lagunas y Wetlands (Noyola, Morgan & Guereca, 2013), realizando para ello, un análisis comparativo de mercado con los precios por metro cuadrado de lotes disponibles en el municipio de Socorro y un municipio similar a este, para identificar si el valor del metro cuadrado de terreno es elevado o no, dicho análisis de mercado fue realizado en la misma fecha y plataforma, como puede observarse en las tablas 4 y 5.

El municipio elegido para la comparación fue Curití, ya que este también está ubicado en el departamento de Santander, son cercanos, pertenecen a municipios de sexta categoría (Contaduría General de la Nación, 2022) y poseen un presupuesto similar como puede observarse en la tabla 6.

Tabla 4. *Investigación de Mercado de Predios en Socorro, Santander (febrero de 2022)*

Socorro			
Ubicación	Área [m²]	Precio	Precio/m²
Rural	4.500	\$ 350.000.000 ^(a)	\$ 77.778
Rural	2.500	\$ 162.000.000 ^(b)	\$ 64.800
Rural	2.500	\$ 140.000.000 ^(c)	\$ 56.000
Rural	2.500	\$ 200.000.000 ^(d)	\$ 80.000
Rural	2.500	\$ 280.000.000 ^(e)	\$ 112.000
Rural	2.631	\$ 242.000.000 ^(f)	\$ 91.980
Promedio			\$ 80.426

Nota: ^a(Mitula, 2022a), ^b(Mitula, 2022b), ^c(Mitula, 2022c), ^d(Mitula, 2022d), ^e(Mitula, 2022e), ^f(Mitula, 2022f)

Tabla 5. *Investigación de Mercado de Predios en Curití, Santander (febrero de 2022)*

Curití			
Ubicación	Área [m²]	Precio	Precio/m²
<i>Rural</i>	2.500	\$ 52.000.000 ^(a)	\$ 20.800
<i>Rural</i>	1.250	\$ 35.000.000 ^(b)	\$ 28.000
<i>Rural</i>	2.500	\$ 67.000.000 ^(c)	\$ 26.800
<i>Rural</i>	2.500	\$ 89.000.000 ^(d)	\$ 35.600
<i>Rural</i>	5.000	\$ 150.000.000 ^(e)	\$ 30.000
<i>Rural</i>	2.500	\$ 50.000.000 ^(f)	\$ 20.000
Promedio			\$ 26.867

Nota: ^a(Mitula, 2022a), ^b(Mitula, 2022b), ^c(Mitula, 2022c), ^d(Mitula, 2022d), ^e(Mitula, 2022e), ^f(Mitula, 2022f)

Tabla 6. *Presupuesto de Socorro y Curití para la Vigencia 2020.*

Municipio	Presupuesto
Curití	\$ 29.475.476.830 ^(a)
Socorro	\$ 30.274.654.941 ^(b)

Nota: ^a(González Sarmiento & Alcaldía Municipal de, 2021), ^b(Concejo Municipal del Socorro, 2020)

Contrastando y analizando los datos presentados en las tablas 4,5 y 6 pudo observarse que el presupuesto del municipio de Socorro es tan solo 2.71% superior al del municipio de Curití, pero en comparación al precio de terreno por metro cuadrado de un lote rural en Socorro es 229.35% más elevado que el precio de un metro cuadrado de un lote rural en Curití, presentando una diferencia de precio de 199.35%.

Con la información anterior se pudo evidenciar que es muy costoso el metro cuadrado en Socorro, además, este no cuenta con muchos recursos al ser un municipio de sexta categoría y adquirir terrenos no es barato en comparación de otros municipios como Curití. De esta manera no son recomendables los Sistemas Lagunares y Wetlands.

Además, por salud pública se recomiendan los sistemas de tratamiento compactos sobre los Sistemas Lagunares y Wetlands, ya que por sus grandes cantidades de agua estancada pueden convertirse en focos de infección para vectores como el dengue, además de la bacteria E. Coli y el parásito criptosporidio (Baptis Thealth South Florida, 2019).

4.2 Resultados de la Fase 2

4.2.1 Cuestionario Ambiental y Técnico

Se resolvió el cuestionario tipo presente en el apéndice A, el cual evalúa aspectos ambientales y técnicos para cada una de las tecnologías planteadas en la metodología; dichos resultados pueden apreciarse en la lista de apéndices.

4.2.2 Diagrama de Flujo

Usando el diagrama de flujo presentado en la figura 1 y teniendo en cuenta que no se dispone de área y es costoso para el municipio adquirirla; como se demostró en los resultados de la fase 1 se preseleccionaron las tecnologías con sistemas de tratamiento compacto:

- UASB + Filtros percoladores
- UASB + Lodos activados
- Lodos activados con aireación extendida
- Filtros percoladores + Lodos activados.

4.3 Resultados de la Fase 3

4.3.1 Porcentajes de Importancia de Factores Evaluadores

Los expertos consultados presentaron sus conceptos para los porcentajes de importancia y son presentados en las siguientes tablas.

Tabla 7. *Valores Propuestos por la Empresa Aguas del Socorro*

Empresa Aguas del Socorro	
A	B
Porcentaje de Importancia [%]	Factor evaluado
9	Aplicabilidad del proceso
7,5	Generación de residuos
5	Aceptación por parte de la comunidad
7,5	Generación de subproductos con valor económico o de uso
5	Vida útil
40	Requerimiento de área
6	Operación
20	Entorno e impacto al medio ambiente

Nota: Aguas del Socorro S.A E.S.P. (2021b, diciembre). Oficio externo No. 02. Código: GD-F010

Tabla 8. *Valores Propuestos por el Profesor Mario García Solano*

Profesor Mario García Solano	
A	B
Porcentaje de Importancia [%]	Factor evaluado
20	Aplicabilidad del proceso
2,5	Generación de residuos
15	Aceptación por parte de la comunidad
2,5	Generación de subproductos con valor económico o de uso
5	Vida útil
15	Requerimiento de área
10	Operación
30	Entorno e impacto al medio ambiente

Nota: M. García Solano. (2022). Comunicación personal

Con esta información presentada en las tablas 7 y 8 se realizó una propuesta de consenso, esta propuesta se sustentó considerando como factor más importante la aplicabilidad del proceso, seguido en orden descendente del entorno e impacto ambiental, el requerimiento de área, la operación, la aceptación de la comunidad y los demás factores restantes se igualaron en importancia, repartiéndose el porcentaje restante después de la jerarquía anterior.

Tabla 9. *Propuesta de Consenso de Porcentajes de Importancia de los Factores Evaluadores de la Matriz de Decisión*

A	B
Porcentaje de Importancia [%]	Factor evaluado
25	Aplicabilidad del proceso
5	Generación de residuos
10	Aceptación por parte de la comunidad
5	Generación de subproductos con valor económico o de uso
5	Vida útil
20	Requerimiento de área
10	Operación
20	Entorno e impacto al medio ambiente

Los porcentajes propuestos por el grupo de trabajo se explican a continuación:

Aplicabilidad del proceso: se decidió determinar un porcentaje de 25% a este factor, ya que uno de los objetivos específicos del proyecto es proponer la tecnología de tratamiento de agua residual más idónea para el municipio y esto va de la mano con que el proceso sea apto al entorno socioeconómico y de recursos técnicos y humanos disponibles.

Entorno e impacto ambiental: a este factor se le asignó un valor del 20%, al tener en cuenta la importancia merecida al medio ambiente, debido a que se busca dar una propuesta que llegue a solucionar un problema ambiental sin afectar de forma agresiva el entorno y el medio ambiente.

Requerimiento de área: en este ítem se difirió de ambos conceptos; la empresa aguas del Socorro propuso un 40%, mientras que el valor propuesto por la academia de 15% se consideró más adecuado, pero se decidió elevar este porcentaje y asignarle un valor de 20% ya que previamente se decidió tener en consideración tecnologías con bajo requerimiento de área.

La operación: este ítem se destaca por ser de particular relevancia para el proyecto ya que la idea es que tanto en la aplicabilidad del proceso como en la operación se busque una tecnología que sea posible desarrollarse en el municipio, por ello se le asignó el tercer valor más alto en los porcentajes propuestos con un 10% a este factor evaluador, adicional a esto, al sumar la aplicabilidad del proceso y la operación se obtiene un 35% lo que aseguró que una tercera parte de la matriz esté enfocada en que sea viable la tecnología propuesta desde el funcionamiento.

Aceptación de la comunidad: este ítem es de gran valor ya que se le quiere dar solución a un problema ambiental que afecta a todo un municipio, pero a su vez se quiere tener en cuenta la opinión de la comunidad y darle la importancia debida, por esto se planteó un punto medio entre la propuesta del consultor académico y la de la empresa de saneamiento asignándole un 10% a este rubro y teniendo el tercer valor más alto en los porcentajes propuestos a los factores evaluadores.

Factores evaluadores restantes: como la vida útil de una obra debe ser de periodos largos mayores de 25 años (Aclara, 2016) esto no será un factor discriminador esencial y teniendo en cuenta que toda tecnología generará residuos se decidió repartir el 15% restante en proporciones

iguales asignando un valor de 5% a cada uno de los rubros: generación de residuos, generación de subproductos y vida útil.

4.3.2 Consultas Adicionales

Para una resolución de la matriz de decisión con más argumentos de juicio se consultaron temas técnicos específicos como el requerimiento de área y la remoción de DBO (Demanda Biológica de oxígeno) y SST (Sólidos suspendidos totales) de cada tecnología preseleccionada.

4.3.2.1 Requerimiento de Área

- **UASB + Filtros percoladores**

Área requerida 0.03 – 0.10 (m²/PE); PE: Persona equivalente.

Nota: Requerimiento de área referente a tecnologías usadas para el tratamiento secundario de aguas residuales para climas cálidos a templados (Dotro et al., 2017).

- **UASB + Lodos activados**

Requerimiento de área 0.2-0.3 (m²/habitante).

Nota: Pueden obtenerse áreas más pequeñas por medio de deshidratación mecánica. Los valores de área representan el área de toda la planta de tratamiento de aguas residuales, no solo de las unidades de tratamiento (Von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005).

- **Lodos activados (Aireación extendida)**

Área requerida: 0.25-0.35 (m²/habitante).

Nota: Pueden obtenerse áreas más pequeñas por medio de deshidratación mecánica. Los valores de área representan el área de toda la planta de tratamiento de aguas residuales, no solo de las unidades de tratamiento (Von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005).

- **Filtros percoladores + lodos activados**

Área requerida 0.12 – 0.30 (m²/PE); PE: Persona equivalente.

Nota: Requerimiento de área referente a tecnologías usadas para el tratamiento secundario de aguas residuales para climas cálidos a templados (Dotro et al., 2017).

Con la información recolectada sobre los requerimientos de área se elaboró la tabla 10.

Tabla 10. Área Requerida por Cada tecnología

Tecnología	Área [m²]/hab
UASB + Percoladores	0,03-0,1
Lodos activados con aireación extendida	0,25-0,35
UASB + Lodos activados	0,2-0,3
F. percoladores + Lodos activados	0,12 – 0,30

4.3.2.2 Remoción de DBO Y SST

- **Lodos activados con aireación extendida**

En el estudio de Trujillo Orozco y Aranguren Arango (2017) se afirma que el tratamiento de agua residual por medio de los lodos activados; al agregarle la modificación de Aireación extendida al proceso, se tiene un rango en porcentaje de remoción de DBO de entre el 75% – 95% (Trujillo y Aranguren, 2017).

Según la publicación de 2005 “Tratamiento biológico de aguas residuales en regiones de clima cálido”, volumen 2, del Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil, en la tabla 30.3, manifiesta que el tratamiento de aguas residuales municipales por medio de UASB + Lodos activados tiene un rango de remoción de SST de entre el 85% – 95% (Von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005).

- **UASB + Lodos activados**

Según la publicación de 2005 “Tratamiento biológico de aguas residuales en regiones de clima cálido”, volumen 2, del Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil, en la tabla 30.3 presentada, manifiesta que el tratamiento de agua residual municipales por medio de UASB + Lodos activados tiene un rango de remoción de DBO de entre el 85% – 95% y un rango de remoción de SST de entre el 85% – 95% (Von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005).

- **UASB + Filtros percoladores.**

Según el Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental – ECCA, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia; en su publicación de 2016 “Análisis del funcionamiento de la configuración del reactor anaerobio de flujo ascendente – filtro percolador para el tratamiento a escala real de aguas residuales domésticas”. Se afirma en la tabla 5 que el tratamiento de agua residual por medio de UASB + Filtros percoladores tiene un rango de remoción de DBO de entre el 75% – 96% y un rango de remoción de SST de entre el 70% – 93% (Torres et al., 2016).

▪ **Filtros percoladores + lodos activados**

Según la publicación “The Coupled Trickling Filter Activated Sludge Process: Design and Performance” de la Oficina de Investigación y Desarrollo de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos en 1978; en la tabla 12 se evidencia que el tratamiento de aguas residuales municipales por medio de Filtro percolador + Lodos activados tiene un rango de remoción de DBO de entre el 95%– 97% y un rango de remoción de SST de entre el 90% – 96% (United States Environmental Protection Agency, 1978).

Con la anterior información recolectada sobre los porcentajes de remoción de DBO y SST se elaboraron las siguientes tablas comparativas.

Tabla 11. *Comparación de Porcentajes de Remoción de DBO*

Tecnología	% R. DBO	Prom. de R. de DBO [%]
-------------------	-----------------	-------------------------------

F. percoladores + Lodos activados	95-97	96
UASB + F. Percoladores	75-96	85,50
UASB + Lodos activados	85-95	90
Lodos activados con aireación extendida	75-95	85,00

Nota: R: Remoción. DBO: Demanda biológica de oxígeno. Prom: Promedio.

Tabla 12. *Comparación de Porcentajes de Remoción de SST*

Tecnología	% R. SST	Prom. de R. de SST [%]
F. percoladores + Lodos activados	90-96	93
UASB + F. Percoladores	70-93	81,5
UASB + Lodos activados	85-95	90
Lodos activados con aireación extendida	85 - 95	90

Nota: R: Remoción. SST: Sólidos suspendidos totales. Prom: Promedio.

4.3.3 Evaluación de la Matriz de Decisión

Se procedió a calificar cada tecnología preseleccionada con la información reunida en el cuestionario anteriormente mencionado en el Apéndice A, donde se evaluaron temas ambientales y técnicos; las comparaciones realizadas en las tablas 10, 11, 12 sobre aspectos técnicos específicos como el requerimiento de área y la remoción de DBO Y SST y las consultas a un experto sobre detalles adquiridos desde su experiencia de cada una de las tecnologías.

Dicho proceso de calificación se realizó en reuniones con el especialista en Ingeniería Sanitaria Mario García Solano, a quien se le hicieron las consultas respectivas sobre temas específicos en conocimientos adquiridos desde su experiencia en el área; como funcionamiento,

operación, entorno e impacto ambiental, entre otras. Además, se tuvieron en cuenta datos de carácter ambiental, técnico, de requerimiento de área y remoción recolectados al desarrollar la metodología.

4.3.3.1 Resultados de la Matriz de Decisión para UASB + Filtros Percoladores. Al aplicar el proceso de calificación a la tecnología preseleccionada UASB + Filtros percoladores se obtuvo una calificación general para esta tecnología de 73,8 puntos, como se observa en el Apéndice J.

4.3.3.2 Resultados de la Matriz de Decisión para Filtros Percoladores + Lodos Activados. Al aplicar el proceso de calificación a la tecnología preseleccionada Filtros percoladores + Lodos activados se obtuvo una calificación general para esta tecnología de 64,78 puntos, como se observa en el apéndice K.

4.3.3.2 Resultados de la Matriz de Decisión para UASB + Lodos Activados. Al aplicar el proceso de calificación a la tecnología preseleccionada UASB + Lodos Activados se obtuvo una calificación general para esta tecnología de 68 puntos, como se observa en el Apéndice L.

4.3.3.4 Resultados de la Matriz de Decisión a Lodos Activados Aireación Extendida. Al aplicar el proceso de calificación a la tecnología preseleccionada Lodos activados aireación extendida se obtuvo una calificación general para esta tecnología de 60 puntos, como se observa en el Apéndice M.

4.4 Comparación de Resultados de Matrices de Decisión

Al contrastar los Apéndices J, K, L y M se puede afirmar que de las tecnologías preseleccionadas la de mejor calificación en la matriz de decisión es UASB + Filtros percoladores como puede evidenciarse en la tabla 13.

Tabla 13. Comparación de Calificaciones Globales de las Tecnologías Preseleccionadas

Tecnología	Calificación global
<i>UASB + Filtros Percoladores</i>	73,8
<i>Lodos Activados Aireación extendida</i>	60
<i>UASB + Lodos Activados</i>	68
<i>Filtros percoladores + Lodos Activados</i>	64,78

Observando la tabla 13 las 2 mejores calificaciones pertenecen a UASB + Filtros Percoladores y UASB + Lodos Activados; la diferencia entre estas calificaciones es de un poco más de 5 puntos. Teniendo en cuenta que esta es una matriz con 21 renglones útiles, lo que significa que tiene múltiples detalles en cuenta y es bastante sensible, esto sería una diferencia significativa, lo cual valida proclamar al UASB + Filtros Percoladores según este estudio como mejor tecnología a implementar en Socorro, Santander para el tratamiento de aguas residuales.

5. Discusión

En los resultados de esta investigación se pudo determinar que la mejor tecnología a implementar en el municipio de Socorro perteneciente a la provincia comunera es la de UASB +

Filtros Percoladores, que coincide con los expuesto en el informe ambiental realizado por la Contraloría General de Santander (2018) donde en los únicos municipios de la provincia comunera como Palmas del socorro y Guapota que registran información sobre PTAR se tiene en funcionamiento el sistema UASB para el tratamiento de aguas residuales; lo que evidencia que es recomendable un sistema compacto para un municipio de esta provincia y además que es altamente aconsejable un sistema que considere dentro de sus trenes de tratamiento sistema de reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB).

Los resultados de este estudio demuestran que la tecnología de UASB + filtros percoladores es muy recomendable para una excelente remoción de DBO Y SST, esto concuerda a los resultados representados por Hernández Gómez & Larrota Rangel (2018) donde en el municipio de Guapota, que cuenta con un sistema UASB, es el mejor de la provincia comunera en la remoción de contaminantes de aguas residuales.

6. Conclusiones

Mediante información oficial emitida por las entidades territoriales competentes, se pudo conocer la situación actual de las aguas residuales del municipio de Socorro; dando como resultado que se carece de una PTAR.

A la hora de plantear diferentes tecnologías para el tratamiento del agua residual en el municipio se pudo evidenciar que, en el caso de Socorro debido al elevado precio del metro cuadrado, como puede observarse en las tablas 4, 5 y 6, la mejor opción es considerar Sistemas de tratamiento Compactos.

Se logró desarrollar la metodología propuesta por la Universidad Nacional Autónoma de México publicada en 2013 en el libro “Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales, guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas”; llegando a hacer algunas reducciones de alcance acordes al proyecto y ampliar la sensibilidad de la matriz de decisión.

Se pudo evaluar una gran cantidad de factores presentes en la tabla 1 al aplicar al caso de estudio la metodología desarrollada por la Universidad Nacional Autónoma de México publicada en 2013 en el libro “Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales, guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas”;

La tecnología más adecuada y viable para el municipio de Socorro, Santander es UASB + Filtros percoladores, ya que obtuvo la calificación más alta, siendo esta de 73.8, como se observa en tabla 13.

7. Recomendaciones

Ampliar el rango de calificación de los factores en la fase de evaluación de la matriz para mejorar la sensibilidad de esta, como se especificó en la sección 3.6.2 sobre funcionamiento de la matriz de decisión.

Realizar un análisis de los aspectos que estuvieron fuera del alcance del proyecto como costo, diseño y construcción, para las tecnologías preseleccionadas y de esa manera tener un panorama más amplio, contrastar los resultados de esta investigación y verificar si la opción planteada por este estudio sigue siendo la más viable para el municipio de Socorro.

Durante la fase de diseño y construcción debe tenerse en cuenta la resolución 0330 de 2017, normatividad colombiana que regula los requisitos técnicos a las entidades formuladoras de proyectos saneamiento básico y a su vez vincula al título D del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS del 2016.

La tecnología seleccionada “UASB + Filtros percoladores” puede alcanzar altos porcentajes de remoción de DBO y SST, como se observa en las tablas 11 y 12, sin embargo, es necesario considerar la normatividad colombiana, para asegurarse que el agua cumple con la calidad especificada, por ello se recomienda revisar la resolución 0631 de 2015, en la cual “se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir quienes realizan vertimientos puntuales a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público”.

Dentro de los subproductos del tratamiento anaerobio; reactor UASB, se obtiene el biogás que es una mezcla de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y gas sulfhídrico (H₂S) (Orozco, 2014). El metano es un gas aprovechable energéticamente por ello, y pensando en un tratamiento más sustentable, se recomienda la posibilidad de utilizarlo en la producción de energía que puede ser empleada en la misma planta (Noyola, Morgan, & Guereca, 2013).

Además, se recomienda implementar dentro del tren de tratamiento del agua residual, un biofiltro para el control de olores, debido a la presencia de gases, principalmente el H₂S, el cual puede ocasionar olores desagradables (Orozco, 2014).

Finalmente, el agua residual tratada puede ser reutilizada en distintas actividades como se mencionó antes. Considerando, que la economía en el municipio de Socorro es principalmente agrícola (Rios, 2021) se recomienda especialmente el uso de esta en la agricultura, ya que ofrece distintos beneficios ambientales y económicos, principalmente en regiones que presentan escases de agua o demandan gran cantidad de agua de riego, como lo especifica la FAO en su informe sobre temas hídricos “Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?” (Winpenny et al., 2013). Se recomienda, además, revisar la resolución 1207 de 2014 en la cual “se adoptan disposiciones relacionadas al uso de aguas residuales tratadas” en Colombia.

Referencias Bibliográficas

Aclara. (2016, 30 mayo). *¿Cuál es el tiempo de vida de las plantas de tratamiento Aclara?*

<https://aclara.mx/faq/tiempo-vida-las-plantas-tratamiento/> [citado 18 de febrero de 2022].

Aguas del Socorro S.A E.S.P. (2021). *Informe autodeclaración de vertimientos (N.o 02). Código: GD-F-012.*

Aguas del Socorro S.A E.S.P. (2021b, diciembre). *Oficio externo (N.o 02). Código: GD-F010.*

Alcaldía Socorro Santander. (2022). *Respuesta Derecho de Petición Radicado 94437* [Correo electrónico].

Ayala Beltrán, D. M. (2019). *Diseño del plan de manejo ambiental para la unidad de servicios públicos en el Municipio de Palmar, DEPARTAMENTO DE SANTANDER.* (Ingeniero Ambiental). Universidad Libre Seccional Socorro. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/19792/Trabajo%20de%20grado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Baptis Thealth South Florida. (2019). *El Agua Estancada: Proteja a su Familia de Infecciones y Otros Riesgos.* <https://baptisthealth.net/baptist-health-news/es/el-agua-estancada-proteja-su-familia-de-infecciones-y-otros-riesgos/#:%7E:text=El%20agua%20estancada%20puede%20estar,causar%20diarrea%2C%20dice%20el%20Dr>

Bernal, D., Cardona, D., Galvis, A. and Peña, M., 2015. *Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domesticas por métodos naturales.* <<https://www.researchgate.net/profile/M->

Pena/publication/266219442_GUIA_DE_SELECCION_DE_TECNOLOGIA_PARA_EL
_TRATAMIENTO_DE_AGUAS_RESIDUALES_DOMESTICAS_POR_METODOS_
NATURALES/links/55bb8a0308aec0e5f4418c0d/GUIA-DE-SELECCION-DE-
TECNOLOGIA-PARA-EL-TRATAMIENTO-DE-AGUAS-RESIDUALES-
DOMESTICAS-POR-METODOS-NATURALES.pdf>

Cedar Lake Ventures, Inc. (s. f.). *El clima en Socorro, el tiempo por mes, temperatura promedio (Colombia)* - Weather Spark. Weather Spark. <https://es.weatherspark.com/y/24365/Clima-promedio-en-Socorro-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o> [citado 9 de febrero de 2022].

Cestti, R., Ardiles, L., & Nolasco, D. (10 de mayo de 2017). *Tratamiento y reúso de las aguas residuales Perú, ¿Un reflejo de la región? Una visión del tratamiento y reúso de las aguas residuales, Lima, Perú*. <https://sinia.minam.gob.pe/download/file/fid/39054>

Ciudadela Tamacara. (13 de agosto de 2019). *Fan page de urbanización ciudadela Tamacara [Venta de lotes urbanizados]*. <https://en-gb.facebook.com/unsupportedbrowser>

Concejo Municipal del Socorro. (2020). *Acuerdo No. 019 de 2020*. <https://socorrosantander.micolombiadigital.gov.co/>.
https://socorrosantander.micolombiadigital.gov.co/sites/socorrosantander/content/files/000501/25026_acuerdo-no-019-de-2020-noviembre-23.PDF

Contaduría General de la Nación. (2020, noviembre). *Resolución No. 190*. <https://www.contaduria.gov.co/documents/20127/225823/RESOLUCI%C3%93N+No.+190+DE+2020+-+expide+la+Categorizaci%C3%B3n+del+2020+para+el+2021/70c54285-ed0-977e-e9fc-5d980aca973f>

Contaduría General de la Nación. (2022). *Resumen de Categorización Departamentos, Municipios y Distritos*. <https://www.contaduria.gov.co/categorizacion-de-departamentos-distritos-y-municipios>

Contraloría General de Santander. (2018). *Estado de las plantas de tratamiento de agua potable y residual en el departamento de Santander*. https://contraloriasantander.gov.co/wp-admin/admin-ajax.php?juwpfisadmin=false&action=wpfd&task=file.download&wpfd_category_id=588&wpfd_file_id=11947&token=098175682a72aa95d197e9d7e0710773&preview=1

Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Sperling, M., Nivala, J., Puigagut, J., & Stein, O. (2017). *Treatment Wetlands (1.a ed., Vol. 7)*. IWA Publishing. <https://limaens.paginas.ufsc.br/files/2020/09/volume-7.pdf>

Eagleton, N. (2017, 9 octubre). *El Agua Estancada: Proteja a su Familia de Infecciones y Otros Riesgos*. <https://baptisthealth.net/baptist-health-news/es/el-agua-estancada-proteja-su-familia-de-infecciones-y-otros-riesgos/#:%7E:text=El%20agua%20estancada%20puede%20estar,causar%20diarrea%2C%20dice%20el%20Dr>

FAO. (2020). *The State of Food and Agriculture. Overcoming water challenges in agriculture. Rome. 2020, pp. V*. <https://doi.org/10.4060/cb1447en>

Flotats, X., Bonmati, A., Fernández, B., Sales, D., Aymerich, E., Irizar, I., . . . al.et. (2016). *De Residuo a Recurso, el camino hacia la sostenibilidad. Mundi-Prensa, España. p. 95*. <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:4259/es/ereader/uis/55257?page=95>

Gonzáles Sarmiento, A. & Alcaldía municipal de Curití. (2021). *Informe financiero nov 2021 Curití*.

https://curitisantander.micolombiadigital.gov.co/sites/curitisantander/content/files/000427/21347_informe-financiero-nov-2021-curiti.pdf

Guerrero, J. (2015). *Modelo de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades.*

https://feparunsa.files.wordpress.com/2012/07/seleccion_tecnologia_tratamiento_aguas_residuales.pdf

Gutiérrez, P., & Rodríguez, J. (2017). *Herramienta de Selección de Tecnologías de Tratamiento de Aguas Residuales basada en Modelos de Decisión Multicriterio.*

<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/13922/u754079.pdf?sequence=1>

Hernández Gómez, W. F., & Larrota Rangel, S. A. (2018). *Evaluación de la eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en la Provincia Comunera, Santander, Colombia.* *Dinámica Ambiental*, 2(2), 48–49.

<https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/ambiental/article/view/5796/5382>

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (21 de febrero de 2020). *El ICA y alcaldes de la Provincia Comunera, en alianza por la ganadería en la región*

<https://www.ica.gov.co/noticias/ica-alcaldes-provincia-comunera-alianza-ganaderia>

Lazcano Carreño, C. (2016). *Bioteología ambiental de agua y agua residuales (2.a ed.). ECOE.*

<https://elibro-net.bibliotecavirtual.uis.edu.co/es/ereader/uis/122526?>

López, C., Buitrón, G., García, H., & Cervantes, F. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño.*

<https://iwaponline.com/ebooks/book/707/Tratamiento-biologico-de-aguas-residuales>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 0631 de 2015*

<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/8.-Anexo-8-Resolucion-631-de-2015-Vertimientos.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Resolución 1207 de 2014.*

<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/7.-Anexo-7-Resolucion-1207-de-2014.pdf>

Mitula. (2022a). *Lotes Curití - Santander.*

https://casas.mitula.com.co/detalle/31082/3450027633094233734/22/1/lotes-curiti-santander?search_terms=lotes+curiti+santander&page=1&pos=22&t_sec=1&t_or=2&t_pvid=35175adb-9e41-4526-b37c-d9f03420902e&req_sgmt=REVTS1RPUDtTRU87U0VSUDs=

Mitula. (2022b). *Lotes Curiti Santander.*

https://casas.mitula.com.co/detalle/666/2820021642336715882/1/1/lotes-curiti-santander?search_terms=lotes+curiti+santander&page=1&pos=1&t_sec=1&t_or=2&t_pvid=35175adb-9e41-4526-b37c-d9f03420902e&req_sgmt=REVTS1RPUDtTRU87U0VSUDs= [citado 17 de febrero de 2022].

Mitula. (2022c). *Lotes Curiti Santander.*

https://casas.mitula.com.co/detalle/12682/3720065635335794981/4/1/lotes-curiti-santander?search_terms=lotes+curiti+santander&page=1&pos=4&t_sec=1&t_or=2&t_pvid=35175adb-9e41-4526-b37c-d9f03420902e&req_sgmt=REVTS1RPUDtTRU87U0VSUDs= [citado 17 de febrero de 2022].

SELECCIÓN TECNOLOGÍAS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES 61

Mitula. (2022d). *Lotes* *Curiti* *Santander.*

https://casas.mitula.com.co/detalle/666/7680020644842930366/10/1/lotes-curiti-santander?search_terms=lotes+curiti+santander&page=1&pos=10&t_sec=1&t_or=2&t_pvid=35175adb-9e41-4526-b37c-d9f03420902e&req_sgmt=REVTS1RPUDtTRU87U0VSUDs= [citado 17 de febrero de 2022].

Mitula. (2022e). *Lotes* *Curiti* *Santander.*

https://casas.mitula.com.co/detalle/31082/2320127644583671383/16/1/lotes-curiti-santander?search_terms=lotes+curiti+santander&page=1&pos=16&t_sec=1&t_or=2&t_pvid=35175adb-9e41-4526-b37c-d9f03420902e&req_sgmt=REVTS1RPUDtTRU87U0VSUDs= [citado 17 de febrero de 2022].

Mitula. (2022f). *Lotes* *Curiti* *Santander.*

https://casas.mitula.com.co/detalle/31082/8610031643201245110/19/1/lotes-curiti-santander?search_terms=lotes+curiti+santander&page=1&pos=19&t_sec=1&t_or=2&t_pvid=35175adb-9e41-4526-b37c-d9f03420902e&req_sgmt=REVTS1RPUDtTRU87U0VSUDs= [citado 17 de febrero de 2022].

Mitula. (2022a). *Lotes* *Socorro* *Santander.*

Available:https://casas.mitula.com.co/detalle/31082/4540127644583662702/2/1/lotes-socorro-santander?search_terms=lotes+socorro+santander&page=1&pos=2&t_sec=1&t_or=2&t_pvid=e534e223-26b5-4c7d-8ff7-

d88d10647726&req_sgmt=REVTS1RPUDtTRU87U0VSUDs= [citado 17 de febrero de 2022].

Mitula. (2022b). Lotes Socorro Santander.

Available:[https://casas.mitula.com.co/detalle/666/8780024632916135791/3/1/lotes-](https://casas.mitula.com.co/detalle/666/8780024632916135791/3/1/lotes-socorro-santander?search_terms=lotes+socorro+santander&page=1&pos=3&t_sec=1&t_or=2&t_pvid=e534e223-26b5-4c7d-8ff7-d88d10647726&req_sgmt=REVTS1RPUDtTRU87U0VSUDs=)

socorro-

santander?search_terms=lotes+socorro+santander&page=1&pos=3&t_sec=1&t_or=2&t_pvid=e534e223-26b5-4c7d-8ff7-

pvid=e534e223-26b5-4c7d-8ff7-

d88d10647726&req_sgmt=REVTS1RPUDtTRU87U0VSUDs= [citado 17 de febrero de 2022].

Mitula. (2022c). Lotes Socorro Santander.

Available:[https://casas.mitula.com.co/detalle/666/5730021636807190324/10/1/lotes-](https://casas.mitula.com.co/detalle/666/5730021636807190324/10/1/lotes-socorro-santander?search_terms=lotes+socorro+santander&page=1&pos=10&t_sec=1&t_or=2&t_pvid=71b1cbce-2ba6-421a-903b-d289f64b7801&req_sgmt=REVTS1RPUDtTRU87U0VSUDs=)

socorro-

santander?search_terms=lotes+socorro+santander&page=1&pos=10&t_sec=1&t_or=2&t_pvid=71b1cbce-2ba6-421a-903b-

_pvid=71b1cbce-2ba6-421a-903b-

d289f64b7801&req_sgmt=REVTS1RPUDtTRU87U0VSUDs= [citado 17 de febrero de 2022].

Mitula. (2022d). Lotes Socorro Santander.

Available:[https://casas.mitula.com.co/detalle/666/8740023627818373686/12/1/lotes-](https://casas.mitula.com.co/detalle/666/8740023627818373686/12/1/lotes-socorro-santander?search_terms=lotes+socorro+santander&page=1&pos=12&t_sec=1&t_or=2&t_pvid=71b1cbce-2ba6-421a-903b-d289f64b7801&req_sgmt=REVTS1RPUDtTRU87U0VSUDs=)

socorro-

santander?search_terms=lotes+socorro+santander&page=1&pos=12&t_sec=1&t_or=2&t_pvid=71b1cbce-2ba6-421a-903b-

_pvid=71b1cbce-2ba6-421a-903b-

d289f64b7801&req_sgmt=REVTS1RPUDtTRU87U0VSUDs= [citado 17 de febrero de 2022].

Mitula. (2022e). Lotes Socorro Santander.

Available:https://casas.mitula.com.co/detalle/666/4580028630323930248/14/1/lotes-socorro-santander?search_terms=lotes+socorro+santander&page=1&pos=14&t_sec=1&t_or=2&t_pvid=71b1cbce-2ba6-421a-903b-

d289f64b7801&req_sgmt=REVTS1RPUDtTRU87U0VSUDs= [citado 17 de febrero de 2022].

Mitula. (2022f). Lotes Socorro Santander.

Available:https://casas.mitula.com.co/detalle/666/7341023527918472686/12/1/lotes-socorro-santander?search_terms=lotes+socorro+santander&page=1&pos=12&t_sec=1&t_or=2&t_pvid=71b1cbce-2ba6-421a-903b-

d289f64b7801&req_sgmt=REVTS1RPUDtTRU87U0VSUDs= [citado 17 de febrero de 2022].

Murcia Piratoa, M. A., & Montañez Pulido, R. S (2021). *Tratamiento de Lodos Aguas residuales Aprovechamiento de Lodos (Ingeniero ambiental)*. unidades tecnológicas de Santander. <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/6424>

Naciones Unidas. (22 de marzo de 2020). *El agua, parte del problema, pero también de la solución ante el cambio climático. Noticias ONU*. <https://news.un.org/es/story/2020/03/1471492>

Noyola, A., Morgan, J., & Guereca, L. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales; guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas, primera edición*. México: UNAM, pp. 2, 8, 11, 35, 43, 57-64, 72-73.

Oficina de Investigación y Desarrollo de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. (1978). *Couples Trickling filter-Activated Sludge Process: Design and Performance*. National Service Center for Environmental Publications (NSCEP). <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/9101Q91X.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1976+Thru+1980&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C76thru80%5CTxt%5C00000033%5C9101Q91X.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL#>
[citado 19 de febrero de 2022].

Orozco, A. (2014). *Bioingeniería de aguas residuales*. . Teoría y diseño, segunda edición, ACODAL, p. 5, 296, 428.

Rios, J. (29 de enero de 2021). *El 44% de los pueblos comuneros y guanentinos no tienen PTAR*. <https://www.vanguardia.com/santander/guanenta/el-44-de-los-pueblos-comuneros-y-guanentinos-no-tienen-ptar-YF3340504>

Rivera Vázquez, I. (2012). *Determinación de Asentamientos Teóricos en Rellenos Sanitarios.*

https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6094/Determinaci%C3%B3n_asentamientos_te%C3%B3ricos_rellenos_sanitarios.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rivera Vázquez, I. (2012, agosto). *Determinación de Asentamientos Teóricos en Rellenos Sanitarios.*

https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6094/Determinaci%C3%B3n_asentamientos_te%C3%B3ricos_rellenos_sanitarios.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Torres, P., Rodríguez, J., Suárez, C., Duque, Y., & Enriquez, L. (4 de febrero de 2016). *Análisis del funcionamiento de la configuración del reactor anaerobio de flujo ascendente – filtro percolador para el tratamiento a escala real de aguas residuales domésticas. Universidad del Valle.* <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/318447/408607>

Trujillo Orozco, L., & Aranguren Arango, Y. (2017). *Diagnóstico, estudio de prefactibilidad y selección del sistema de tratamiento para las aguas residuales municipio de Guaduas - Cundinamarca.* <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/10982>

UNESCO. (21 de Marzo de 2020). *La gestión del agua, elemento clave para afrontar el cambio climático.* <https://es.unesco.org/news/gestion-del-agua-elemento-clave-afrontar-cambio-climatico>

United States Environmental Protection Agency. (1978). *Couples Trickling filter-Activated Sludge Process: Design and Performance.*

<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/9101Q91X.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1976+Thru+1980&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>

Von Sperling, M., & de Lemos Chernicharo, C. A. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*

<https://library.oapen.org/viewer/web/viewer.html?file=/bitstream/handle/20.500.12657/31041/640165.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=26&zoom=auto,-114,610>

Von Sperling, M., & de Lemos Chernicharo, C. A. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions* (1.a ed., Vol. 2).

<https://library.oapen.org/viewer/web/viewer.html?file=/bitstream/handle/20.500.12657/31041/640165.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=26&zoom=auto,-114,610> [citado 18 de febrero de 2022].

Winpenny, J., Heinz and, I., & Koo-Oshima, S. (2013). *Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos? FAO*. p. XV. <https://www.fao.org/3/i1629s/i1629s.pdf>

World Bank Group. (19 de marzo de 2020). *El agua residual puede generar beneficios para la gente, el medioambiente y las economías, según el Banco Mundial*. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/03/19/wastewater-a-resource-that-can-pay-dividends-for-people-the-people-the-environment-and-economies-says-world-bank>

Worldbank. (2019). *Quality Unknown: The Invisible Water Crisis*.

<https://www.worldbank.org/en/news/feature/2019/08/20/quality-unknown>