

Selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales en condominios residenciales:

Caso Mensulí (Santander, Colombia)

Silvia Marcela Rodríguez Arenas

Trabajo de Grado para Optar el título de Magíster en Recursos Hídricos y Saneamiento

Ambiental

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Dr. Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Fisicomecánica

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Bucaramanga

2019

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	14
1. Objetivos.....	18
1.1 Objetivo general	18
1.2 Objetivos específicos	18
2. Marco referencial.....	19
2.1 Marco Conceptual.....	19
2.1.1 Tratamiento de Aguas Residuales.	19
2.1.2 Sistemas Descentralizados para el Tratamiento de Aguas Residuales.	20
2.1.3 Metodologías de Apoyo a la Selección de Tecnologías de Tratamiento de Aguas Residuales.	22
2.2 Revisión del Estado del Arte	24
3. Metodología.....	30
3.1 Identificación de Opciones Tecnológicas para el Tratamiento de Aguas Residuales	31
3.2 Determinación de Metodología para la Selección de Tecnología de Tratamiento de Aguas Residuales	33
3.3. Propuesta de Sistema Tecnológico para el Tratamiento de Aguas Residuales	34
3.3.1 Descripción del Sector de Estudio.....	35

3.3.2 Selección de Criterios e Indicadores.	35
3.3.3 Planteamiento de Escenarios para la Toma de Decisiones.	37
3.3.4 Aplicación de Metodología para la Selección de Alternativas de Tratamiento de Agua Residual.	37
3.3.4.1 Construcción de Matriz de Decisión Normalizada.	38
3.3.4.2 Construcción de Matriz de Decisión Normalizada Ponderada.	38
3.3.4.3 Determinar Soluciones Ideales Positivas y Negativas.	39
3.3.4.4 Calcular la Medida de Separación entre cada Alternativa.	39
3.3.4.5 Calcular la Proximidad Relativa a la Solución Ideal.	40
3.3.4.6 Clasificar el Orden de Preferencia.	40
4. Resultados y Discusión.	41
4.1 Opciones Tecnológicas para el Tratamiento de Aguas Residuales.	41
4.2 Metodologías para la Selección de Tecnologías de Tratamiento de Agua Residual.	56
4.3. Propuesta de Sistema Tecnológico para el Tratamiento de Aguas Residuales Caso Mensulí.	61
4.3.1 Descripción del Caso Mensulí.	61
4.3.2 Criterios e Indicadores Seleccionados para la Evaluación de Alternativas Tecnológicas para el Tratamiento de Aguas Residuales.	65
4.3.2.1 Criterios Ambientales.	74
4.3.2.2 Criterios Económicos.	75
4.3.2.3 Criterios Técnicos.	75
4.3.2.4 Criterios Sociales.	77
4.3.3 Planteamiento de Escenarios para la Toma de Decisiones.	77

4.3.4 Aplicación de Metodología y Propuesta de Alternativa Tecnológica para el Tratamiento de Aguas Residuales.....	81
4.3.4.1 Resultados de Aplicación Topsis Nivel de Tratamiento Primario.	81
4.3.4.2 Resultados de Aplicación Topsis Nivel de Tratamiento Secundario.	87
4.3.4.3 Resultados de Aplicación Topsis Nivel de Tratamiento Terciario.....	91
5. Conclusiones.....	98
6. Recomendaciones	101
Referencias Bibliográficas.....	102
Apéndices	112

Lista de Tablas

Tabla 1. Experiencias relacionadas con la aplicación de métodos de análisis de decisión para la selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales	28
Tabla 2. Descripción cualitativa métodos de análisis de decisión.....	61
Tabla 3. Criterios e indicadores usados para la selección de tecnología de tratamiento de aguas residuales caso Mensulí	66
Tabla 4. Funciones de referencia para calificación de indicadores ambientales y económicos ...	68
Tabla 5. Rangos de referencia eficiencia de remoción de contaminantes	70
Tabla 6. Indicadores y puntuaciones utilizadas para la selección de tecnología de tratamiento de aguas residuales - Nivel primario	71
Tabla 7. Indicadores y puntuaciones utilizadas para la selección de tecnología de tratamiento de aguas residuales - Nivel secundario.....	72
Tabla 8. Indicadores y puntuaciones utilizadas para la selección de tecnología de tratamiento de aguas residuales - Nivel terciario.....	73
Tabla 9. Planteamiento de escenarios aplicación metodología selección tecnología de tratamiento caso Mensulí	78
Tabla 10. Escenarios de aplicación de metodología y respectivas ponderaciones asignadas	80
Tabla 11. Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento primario – Escenario I	84

Tabla 12. Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento primario – Escenario III	84
Tabla 13. Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento primario – Escenario II	86
Tabla 14. Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento primario – Escenario IV	86
Tabla 15. Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento secundario – Escenario I.....	89
Tabla 16. Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento secundario – Escenario III	89
Tabla 17. Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento secundario – Escenario II	90
Tabla 18. Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento secundario – Escenario IV	90
Tabla 19. Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento terciario – Escenario I.....	93
Tabla 20. Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento terciario – Escenario II	93
Tabla 21. Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento terciario – Escenario III	94
Tabla 22. Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento terciario – Escenario IV	94

Lista de Figuras

Figura 1. Clasificación de alternativas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales.....	20
Figura 2. Clasificación métodos de análisis de decisión.	23
Figura 3. Esquema del proceso metodológico.....	30
Figura 4. Distribución de alternativas tecnológicas por niveles de tratamiento provenientes de casos de estudio revisados en literatura.....	42
Figura 5. Distribución de alternativas tecnológicas por procesos en el sistema proveniente de casos de estudio revisados en literatura.....	43
Figura 6. Distribución de tratamientos por procesos biológicos provenientes de casos de estudio revisados en literatura.....	45
Figura 7. Distribución de sistemas de alternativas tecnológicas de sistemas naturales provenientes de casos de estudio revisados en literatura.....	46
Figura 8. Distribución de alternativas tecnológicas de procesos biológicos anaerobios provenientes de casos de estudio revisado en literatura.....	48
Figura 9. Distribución de sistemas de alternativas tecnológicas de procesos biológicos aerobios provenientes de casos de estudio revisados en literatura.....	49
Figura 10. Distribución de alternativas tecnológicas de procesos fisicoquímicos provenientes de casos de estudio revisados en literatura.....	51

Figura 11. Alternativas tecnológicas de tratamiento de aguas residuales seleccionadas para aplicación de metodología	52
Figura 12. Distribución de metodologías de selección de tratamiento de aguas residuales provenientes de casos de estudio revisados en literatura.....	56
Figura 13. Distribución de metodologías de selección de tratamiento de aguas residuales provenientes de casos de estudio revisados en literatura.....	57
Figura 14. Localización geográfica Floridablanca, Santander.	62
Figura 15. Ubicación caso Mensulí	63
Figura 16. Distribución condiciones socioeconómicas población proyectada caso Mensulí	65
Figura 17. Trenes de tratamiento resultantes Caso Mensulí.....	95

Lista de Apéndices

Apéndice A. Fichas técnicas tecnologías de tratamiento de aguas residuales.....	112
Apéndice B. Fichas técnicas metodologías de análisis de decisión	128
Apéndice C. Listado de artículos de revisión de tecnologías de tratamiento de aguas residuales en contextos similares.....	131
Apéndice D. Listado de artículos de aplicación de métodos de análisis de decisión para la selección de alternativas tecnológicas de tratamiento de aguas residuales	137

Resumen

Título: Selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales en condominios residenciales: Caso Mensulí (Santander, Colombia)*

Autor: Silvia Marcela Rodríguez Arenas **

Palabras clave: aguas residuales domésticas, métodos de análisis de decisión, selección de tecnología, tratamientos descentralizados

Descripción:

El acceso a agua apta para consumo y a sistemas básicos de saneamiento es esencial para la salud humana. En consecuencia, los Objetivos de Desarrollo Sostenible presentan estrategias que permiten garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento integral. No obstante, el tratamiento de aguas residuales domésticas (ARD) en países en desarrollo registra bajas coberturas y eficiencias de tratamiento, generando vertimientos contaminantes a sistemas hídricos. Esta situación es más crítica considerando el crecimiento y expansión de las áreas urbanas, en las cuales los sistemas descentralizados de gestión de ARD constituyen una alternativa que facilita las condiciones operativas y diseño de redes. Con el propósito de contribuir con el manejo del agua residual en sectores suburbanos, este estudio evalúa sistemas tecnológicos de tratamiento de aguas residuales (STAR) acordes con este contexto, instalando STAR descentralizados. En este proyecto se realizó la selección de STAR en una zona de desarrollo urbanístico del municipio de Floridablanca. Se usaron los siguientes aspectos metodológicos: i) se identificaron las opciones tecnológicas con potencial de aplicación en el sector; ii) se seleccionó el método de análisis de decisión más adecuado para evaluar parámetros característicos de los STAR; iii) se aplicó el método seleccionado con los sistemas definidos y se propuso el STAR más acorde al contexto de estudio. Como resultado se obtuvo el tren de tratamiento conformado por tanque séptico, biodiscos y lagunas de maduración para zonas con restricciones de área; y lagunas anaerobias y humedales subsuperficiales de flujo horizontal en serie para sectores con disponibilidad de terreno. Cabe señalar que el presente estudio puede ser una guía de implementación y aplicación en contextos similares, contribuyendo en la búsqueda de soluciones que permitan la disminución de brechas entre la generación, disponibilidad y eficiencia de STAR, de impactos ambientales, y el desarrollo integral de zonas urbanísticas.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingeniería físico mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Maestría en recursos hídricos y saneamiento ambiental. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Abstract

Title: Wastewater treatment technology selection in residential condominium: Mensulí case (Santander, Colombia)*

Author: Silvia Marcela Rodríguez Arenas **

Keywords: domestic wastewater, decision analysis methods, technology selection, decentralized treatment

Description:

Access to safe drinking water and basic sanitation systems are essential to human health. As a result, the sustainable development goals have strategies used to guarantee the availability of water, its sustainable management and total sanitation. However, domestic wastewater treatment in developing countries is low covered and efficient, generate contaminating discharge to surface water bodies. This situation is more critical considering the growth and expansion of urban areas, under which wastewater management decentralized systems are an alternative that can facilitate the operational conditions and the network design. In order to contribute with wastewater management in suburban areas, this study assesses wastewater treatment systems consistent with this context, through the installation of decentralized treatment systems. In this project was chose a wastewater treatment in a development area located in the municipality of Floridablanca. From this perspective, the following methodological aspects were used: i) the technological options with application potential in the case study were identified; ii) the most appropriate decision analysis method was selected to evaluate characteristic and parameters of the treatment systems; iii) the method was applied with each of the defined systems and the most appropriate wastewater treatment system was proposed to be installed in the sector studied. As a result, the treatment train resulting was septic tank, Rotating Biological Contactor and maturation ponds for places with area restrictions; and anaerobic ponds and horizontal subsurface flow wetland in series for sectors with availability of land to implement the system. It should be noted that this was intended to be an implementation guide for the application of this type of study in similar contexts, which allows contributing to the reduction of gaps between the generation, availability and efficiency of wastewater treatment, environmental impacts, and the integral development of urban areas.

* Degree work

**Facultad de ingeniería físico mecánica. Escuela de ingeniería civil. Maestría en recursos hídricos y saneamiento ambiental. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Introducción

Acorde con la Organización de Naciones Unidas (2018), el agua y los sistemas de saneamiento son vitales para el desarrollo del ser humano; la falta de estos servicios básicos obstaculiza la erradicación de la pobreza extrema y algunas enfermedades específicas asociadas con el agua, saneamiento e higiene. Generalmente, esto ocurre en los países de bajos ingresos económicos; en donde, según el programa conjunto de monitoreo del abastecimiento de agua y saneamiento OMS – UNICEF (2017) por lo menos 1.800 millones de personas en todo el mundo beben agua que no está protegida de la contaminación de las heces y 2.300 millones de personas no disponen de instalaciones básicas de saneamiento (Organización Mundial de la Salud, 2018).

Ahora bien, se estima que el 80% del total de las aguas residuales industriales y municipales se vierte al medio ambiente sin ningún tipo de tratamiento previo, generando el deterioro de la calidad del agua. Esta situación incrementa las probabilidades de riesgos asociados a problemas ambientales, sociales y económicos y tiene impactos perjudiciales para la salud humana, para las limitaciones en la producción de alimentos, y con ello en la reducción de la funcionalidad de los ecosistemas y el impedimento en el crecimiento económico de las naciones (ONU, 2018).

En relación al contexto nacional, según lo registrado en el reporte de avance del Estudio Nacional del Agua (2018), se presentó un aumento de alrededor del 16% en la carga doméstica de las aguas residuales (materia orgánica) respecto al año 2010. Asimismo, de la totalidad de cargas contaminantes vertidas a los sistemas hídricos, el sector doméstico aporta la mayor carga

de materia orgánica; de ésta, el 50% está representada por la demanda biológica de oxígeno (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, 2018).

Al respecto, las Naciones Unidas establecen en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), metas de mejoramiento de la calidad del agua proyectadas al 2030, las cuales aporten proyectos enfocados a la reducción en la contaminación, eliminando vertimientos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar. Lo anterior tiene el propósito fundamental de garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos, el cual, en conjunto, aporta a la reducción de la carga mundial de enfermedades, a la mejora de la salud, la educación y la productividad económica de las poblaciones (ONU, 2016).

Por lo anterior, se hace necesario ejecutar planes y proyectos encaminados al tratamiento de aguas residuales, en zonas de baja o inexistente cobertura de sistemas de depuración de dichos vertimientos; de esta forma, se contribuye con el mejoramiento en la calidad del agua en las fuentes receptoras, eliminando materiales contaminantes, orgánicos e inorgánicos, en sus diferentes formas y cargas, mediante la integración de procesos físicos, químicos y biológicos.

Asimismo, la importancia de realizar una adecuada selección de tecnología radica en lograr la sostenibilidad del sistema de tratamiento implantado, mediante procesos de arranque, administración, operación y mantenimiento, al alcance de los entes encargados; de manera que se logre el cumplimiento de los objetivos planteados por el sistema desde su concepción. De igual forma, disminuyendo el deterioro en la calidad del agua y mitigando los problemas de disponibilidad del recurso hídrico. Por lo anterior, uno de los retos de la instalación de sistemas de tratamiento, está relacionado con la selección de tecnología, en la cual es de suma importancia la integración de aspectos técnicos económicos, ambientales y sociales, para la toma de decisiones (Noyola *et al.*, 2013).

El presente estudio plantea la evaluación de alternativas de tratamiento de aguas residuales generadas por un desarrollo urbanístico proyectado en la zona de expansión suburbana del municipio de Floridablanca, Santander, denominado Mensulí. Se proyecta que el desarrollo de este proyecto albergue alrededor de 6560 habitantes, para lo cual se tendría una producción de aproximadamente 9.0 L/s de aguas residuales distribuidos socioeconómicamente en estratos tres (20%), cuatro (39%) y cinco (41%).

Dicha zona de estudio no cuenta con redes de alcantarillado para el transporte de aguas residuales hacia la planta de tratamiento existente en el municipio de Floridablanca – Santander. Sin embargo, a pesar de que es probable la futura conexión del proyecto a un interceptor en proceso de construcción, el cual beneficiará al sector, el presente estudio pretende identificar una alternativa diferente del enfoque tradicional, que permita el análisis de qué tipo de tecnología puede ser la más adecuada para el manejo de las aguas residuales en dicho lugar; además se busca lograr que los sistemas seleccionados e instalados sean sostenibles.

Es importante recalcar, que la implantación de sistemas de tratamiento descentralizados se ha venido convirtiendo en alternativas viables para la gestión de aguas residuales, lo cual aporta a minimizar impactos ambientales y facilita la recuperación de recursos naturales (Nhapi, 2004); por otro lado, el interés de su instalación se relaciona también, con las reducciones en los costos de tratamiento a largo plazo y el potencial de reutilización de las aguas residuales (Daigger, 2009).

El enfoque alternativo de gestión de aguas residuales para el condominio pretende abarcar diversas opciones entre ellas evaluar el reúso de aguas residuales. Dicho estudio está vinculado con la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010) en ella se establece como estrategia, el uso eficiente y

sostenible del agua mediante la implementación de procesos de tecnología de ahorro y uso de agua bajo el enfoque de seis objetivos: la oferta, la demanda, la calidad, los riesgos, el fortalecimiento institucional y la gobernabilidad; a su vez, una medida relacionada con dicha política es el reúso de agua residual la cual es considerada como una solución ambientalmente amigable, capaz de reducir los impactos asociados con la extracción y vertimiento a fuentes de agua naturales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014). Según Santasmasas *et al.* (2013) estas técnicas de reúso de aguas residuales tratadas son catalogadas como procesos de gran importancia y desarrollo para lograr un consumo sostenible de agua en las urbanizaciones y disminuciones en las presiones a los recursos hídricos.

Este documento está estructurado en 6 capítulos; en el capítulo 1 se presenta el planteamiento de los objetivos; el capítulo 2 contiene el marco de referencia, compuesto por un marco conceptual en donde se realizó una revisión general de conceptos clave para el entendimiento de los temas planteados, y posteriormente una revisión del estado del arte en la que se ahondó en estudios realizados para casos similares a los temas abordados en el estudio; el capítulo 3 presenta el desarrollo metodológico en el que se incluyeron cada una de las actividades realizadas para la elaboración del estudio y que permiten obtener los resultados del mismo; el capítulo 4 integra los resultados y discusión; y finalmente, en los capítulos 5 y 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones, respectivamente, surgidas de lo evidenciado en el desarrollo del trabajo.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Seleccionar una tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas en el condominio residencial Mensulí (Floridablanca), integrando aspectos ambientales, técnicos, económicos y sociales.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar las opciones tecnológicas con mayor potencial de aplicación para el tratamiento de aguas residuales domésticas en el contexto de estudio.

Determinar una metodología existente para la selección de tecnologías de aguas residuales domésticas en el contexto de estudio.

Proponer un sistema tecnológico para el tratamiento de las aguas residuales domésticas acorde con las condiciones del contexto.

2. Marco Referencial

2.1 Marco Conceptual

2.1.1 Tratamiento de aguas residuales. Las aguas residuales domésticas son las aguas que han sido usadas por una comunidad y que contienen todo tipo de materiales agregados a estas durante su uso. El tratamiento de estas aguas busca reducir la contaminación y los posibles daños relacionados con el ecosistema y la salud humana que estas podrían llegar a ocasionar (Mara, 2004).

Aún más, el tratamiento de aguas residuales busca mediante diferentes procesos remover material contaminante, orgánico e inorgánico, con objeto de alcanzar una calidad de agua requerida por la normativa de descarga o por el tipo de reutilización a la que se destinará (Noyola *et al.*, 2013).

La remoción de contaminantes durante el tratamiento está asociada con el concepto de nivel de tratamiento, lo cual permite alcanzar la calidad deseada o los estándares requeridos para vertimientos. Se pueden encontrar los siguientes niveles: i) tratamiento preliminar en el cual se da la remoción de sólidos grandes; ii) tratamiento primario caracterizado por la remoción de sólidos sedimentables y un pequeño porcentaje de materia orgánica; iii) tratamiento secundario con el propósito de remoción de materia orgánica y en menor porcentaje nutrientes; y iv)

terciario en donde se realiza la remoción de contaminantes específicos generalmente no biodegradables y remanentes de los procesos anteriores (Sperling, 2007).

Adicionalmente, con base en la figura 1, el tratamiento está clasificado según las operaciones, procesos y su interacción en el sistema, estos pueden ser físicos, químicos y biológicos dentro ellos se pueden mencionar los sistemas aerobios, anaerobios y naturales (Metcalf y Eddy, 1995b).

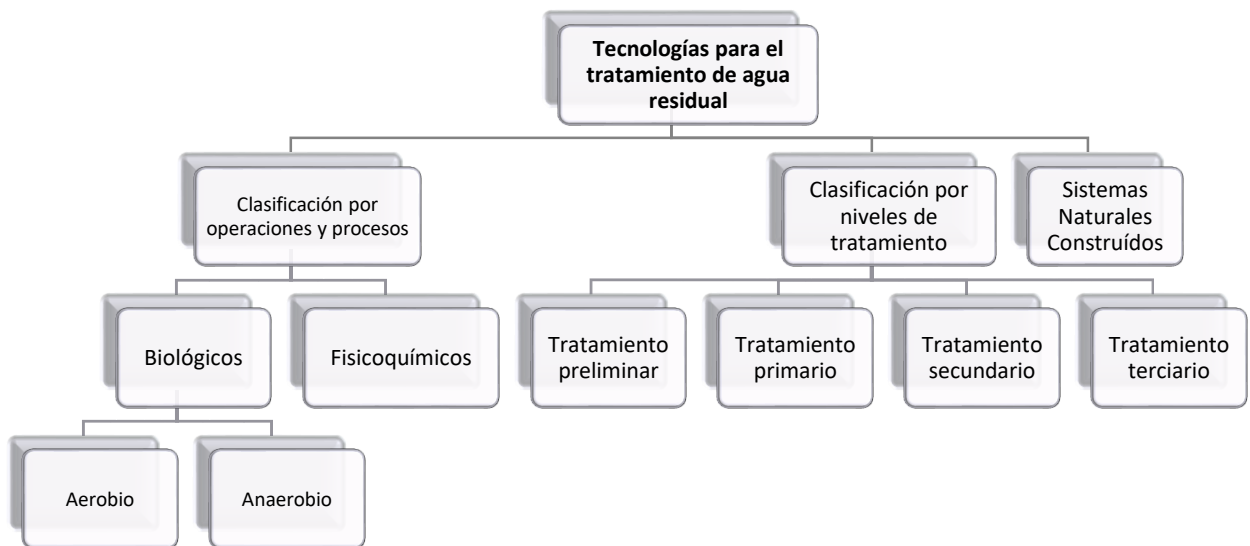


Figura 1. Clasificación de alternativas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales. Adaptado de Noyola, A., Morgan-sagastume, J. M., & Guereca, L. P. (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales : guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas. México, D.F: Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Ingeniería.

2.1.2 Sistemas descentralizados para el tratamiento de aguas residuales. Según Suriyachan *et al.* (2012a) de las técnicas de gestión existentes para las aguas residuales, los dos conceptos más importantes son la gestión centralizada y descentralizada. La gestión centralizada

de aguas residuales es un concepto que se ha implementado como una forma de tratar estas en áreas altamente pobladas o urbanizadas, por lo cual administran grandes volúmenes. Dichos sistemas implican una gran inversión y costos asociados. Alternativamente, la gestión descentralizada de aguas residuales es un concepto que recolecta, trata, desecha o reutiliza las aguas residuales, tratadas en o cerca de la fuente de generación. Estos sistemas normalmente comprenden tratamientos en sitios de casas, condominios y edificios individuales.

La gestión descentralizada es una alternativa para los sectores no abarcados por redes colectoras de alcantarillado y, por ende, no conectados a plantas de tratamiento municipales. Así mismo, se emplea en zonas de desarrollos urbanísticos distantes de sistemas de tratamiento existentes, permitiendo así disminuir vertimientos directos a cuerpos de agua superficiales.

De igual modo, esta gestión de tratamiento es una alternativa para aquellos lugares en los que no existen redes de alcantarillado, conducidas y conectadas a plantas de tratamiento municipales, desarrollos urbanísticos retirados de sistemas de tratamiento centralizado existentes, gestión que aporta en la disminución de impactos por vertimientos directos a cuerpos de agua superficiales (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2017).

Libralato *et al.* (2012) exponen diferentes variables que pueden influir en la implementación de estos sistemas descentralizados, entre los que se mencionan el crecimiento de la población en áreas rurales, centros poblados urbanos y en países en desarrollo, la disminución de la calidad del agua superficial, la construcción de conjuntos residenciales en áreas metropolitanas, el desarrollo planificado de comunidades aisladas, la creciente escasez de recursos hídricos y la atención prestada a la recuperación y reutilización del agua.

2.1.3 Metodologías de apoyo a la selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales. Las decisiones ambientales a menudo son complejas y se basan en conocimientos multidisciplinarios, por las cuales el uso de metodologías para la evaluación de dichos aspectos permiten un proceso sistemático para combinar los diversos insumos existentes incluida información costo – beneficio y opiniones de interesados para clasificar alternativas de solución (Huang *et al.*, 2011).

Kalbar *et al.* (2013) mencionan que el problema de seleccionar tecnologías de tratamiento de aguas residuales ha sido abordado aplicando diversidad de métodos de toma de decisiones, dado que esta decisión es de suma importancia para el desarrollo de una comunidad y la mejora en la calidad de vida de sus habitantes; para esto se hace necesario adoptar procedimientos racionales que permitan el mejor planteamiento de la solución.

Huang *et al.* (1995) mencionan que el análisis de decisiones se ocupa de tomar decisiones con resultados inciertos y concesiones difíciles. Este proceso se efectúa por medio de una metodología formal para el examen sistemático de diversas situaciones, involucrando variedad de alternativas, tratamiento de información e incertidumbre, preferencias y evaluación de presuntamente la "mejor" opción. Por consiguiente, clasifican los métodos en tres grupos según lo mostrado en la figura 2, a saber: i) métodos de toma de decisiones objetivas únicas o toma de decisiones bajo incertidumbre; ii) métodos de sistema de apoyo a las decisiones; y iii) métodos de criterios múltiples.

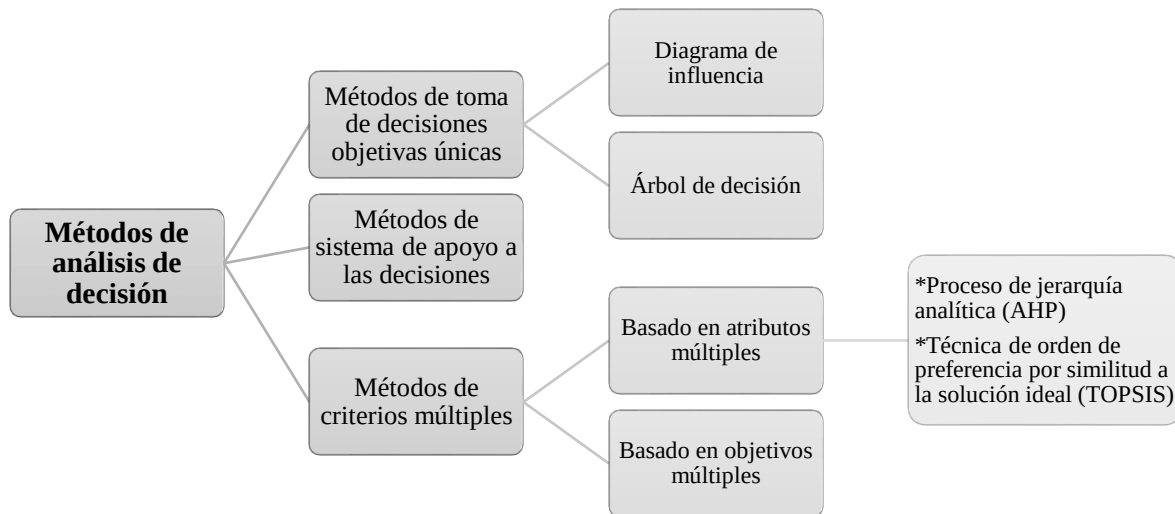


Figura 2. Clasificación métodos de análisis de decisión. Adaptado de Zhou, P., Ang, B., & Poh, K. (2006). Decision analysis in energy and environmental modeling: an update. *Energy*, 2604–2621.

La toma de decisiones, bajo incertidumbre, comprende técnicas en donde los resultados son inciertos y las evaluaciones de las compensaciones son difíciles. Estos tienen el propósito de evaluar las alternativas disponibles y clasificarlas a la luz de su información y preferencias, siendo el método clásico el árbol de decisión (Huang *et al.*, 1995).

Zhou *et al.* (2006) definen los métodos de sistema de apoyo a las decisiones como técnicas de software interactivos, flexibles y adaptables que integran modelos, bases de datos y otras herramientas de ayuda para que puedan ser usadas por los responsables de la toma de decisiones. En este método generalmente se depende del conocimiento experto para elegir los parámetros y modelos apropiados.

Hwang y Yoon (1981) clasifican los métodos de toma de decisiones con criterios múltiples en dos categorías: i) métodos basados en múltiples atributos (MADM); y ii) métodos basados en múltiples objetivos (MODM). Para este caso, las alternativas no están predefinidas dado que

involucran un número infinito de estas alternativas factibles; estos son modelos de programación matemática con múltiples objetivos en los que se optimiza un conjunto de objetivos en conflicto y se los somete a un conjunto de restricciones definidas.

Los métodos de múltiples atributos (MADM) manejan problemas de decisión discretos que involucran un conjunto finito de alternativas bien definidas. Estos se enfocan en la toma de decisiones mediante la evaluación y priorización de alternativas que generalmente se caracterizan por múltiples atributos conflictivos; esto es, métodos populares utilizados en estudios de caso: teoría de utilidad de atributos múltiples (MAUT), proceso de jerarquía analítica (AHP), eliminación y elección de traducción de realidad (ELECTRE), organización de clasificación de preferencia para evaluación de enriquecimiento (PROMETHEE) y técnica de orden de preferencia por similitud a la solución ideal (TOPSIS) entre otros (Zhou *et al.*, 2006).

2.2 Revisión del estado del arte

La literatura científica reporta diferentes experiencias relacionadas con estudios para la selección de alternativas de tratamiento de aguas residuales en diferentes contextos empleando diferentes metodologías de decisión; esta revisión evidencia la complejidad y los retos que afrontan los encargados de la toma de este tipo de decisiones.

En relación con los estudios planteados con la aplicación de los métodos de toma de decisiones objetivos únicos, Bernal *et al.* (2003) plantearon una guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales, en la cual analizaron para diez tecnologías de tratamiento 18 variables de aspectos demográficos y socioculturales, características de agua residual, factores climáticos, características del terreno, capacidad y

disponibilidad a pagar, costos, objetivos de tratamiento, disponibilidad de recursos, y aspectos tecnológicos obtenidas a partir de revisiones bibliográficas. El modelo fue organizado en diez fases y fue considerado como un aporte en el proceso de construcción de un sistema experto para la selección de tecnologías.

Además, se cuenta con estudios en donde se plantearon revisiones generales del estado del arte y menciones de casos exitosos para la identificación de aspectos tecnológicos, sociales, económicos y ambientales lo cuales han sido tomados en cuenta para la implementación de sistemas descentralizados para el tratamiento de aguas residuales en municipios colombianos, siendo estos relevantes para crear un modelo conceptual base para su aplicación en contextos similares (Bernal y Restrepo, 2012).

Por otro lado, Bernal (2018) propuso un modelo conceptual con el fin de evaluar el nivel de centralización de la gestión de aguas residuales en áreas urbanas. Este caso de estudio fue validado en tres municipios de Colombia, en donde se contempló un análisis jerárquico de alternativas (AHP) incluyendo criterios tecnológicos, ambientales, sociales e institucionales, seguido de un análisis de costo beneficio de las alternativas evaluadas; como conclusión se obtuvo criterios clave para determinar: i) el potencial de reúso de aguas residuales; ii) el nivel de centralización del sistema (i.e. centralizado, descentralizado, semicentralizado o en sitio); y iii) la cobertura del sistema de alcantarillado de los sistemas de tratamiento evaluados o a evaluar.

Castillo *et al.* (2016), con el uso de métodos de sistemas de apoyo a las decisiones, realizaron un análisis junto con modelos matemáticos para generar una lista de tratamientos factibles para diversos escenarios en pequeñas comunidades de España. En este estudio los expertos identificaron cinco tecnologías potenciales a las cuales se le ponderaron criterios de tipo

económico, ambiental y tecnológico, de esta forma proporcionaron una base confiable para la toma de decisiones.

En relación a las experiencias con los métodos de criterios múltiples, Kalbar *et al.* (2012a) tomaron cuatro de las alternativas tecnológicas más comunes para el tratamiento de aguas residuales municipales en India, evaluaron aspectos sociales, regionales y locales de las áreas urbanas, suburbanas y rurales aplicadas en seis diferentes escenarios y traducidas en un logaritmo matemático; posteriormente, mediante la aplicación de la técnica por orden de preferencia por similitud a la solución ideal (TOPSIS) clasificaron las opciones más pertinentes para el contexto, con base en criterios con diversos indicadores. El estudio incluyó la evaluación del ciclo de vida y el ciclo de vida de los costos para la evaluación de cada una de las alternativas seleccionadas. Con esta información fueron analizadas cada una de las alternativas mediante ponderaciones y opiniones de expertos.

Con base en lo anterior, Kalbar *et al.* (2012b) plantearon otro caso de aplicación de la técnica por orden de preferencia por similitud a la solución ideal (TOPSIS), enfocado en la selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales para edificios de gran altura en centros urbanos de India. Conforme al caso anterior, plantearon las posibles tecnologías de tratamiento como resultado de la evaluación de diversos criterios que tenían indicadores derivados de la evaluación del ciclo de vida y ciclo de vida de costos. El caso de estudio incluyó un escenario en el que tenía por objeto el reciclar aguas residuales tratadas para diferentes aplicaciones. En consecuencia, la aplicación de la metodología determinó el biorreactor de membrana como la alternativa mejor puntuada.

Otra metodología de toma decisiones de múltiples atributos comúnmente utilizada es el proceso de jerarquía analítica (AHP). Por mencionar, Molinos *et al.* (2014) evaluaron la

sostenibilidad de pequeños sistemas de aguas residuales usados en pequeñas comunidades de España, mediante la aplicación el análisis del comportamiento de 18 indicadores distribuidos en tres dimensiones económico, ambiental y social, aplicados a siete tecnologías. En este caso, se asignaron ponderaciones a cada indicador permitiendo jerarquizar las metodologías preseleccionadas y obtener la de mayor aplicabilidad en el contexto estudiado.

Las diversas ventajas del proceso de jerarquía analítica, su flexibilidad, la capacidad de verificar inconsistencias y posibilidad de jerarquizar los indicadores permiten la interrelación de estas con diversas técnicas. Por ejemplo, Zeng *et al.* (2007) plantearon un enfoque sistemático para la selección de alternativas de tratamiento de aguas residuales, con resultados científicos y razonables, basados en la aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) y el análisis relacional gris (GRA). En este estudio evaluaron cuatro alternativas de tratamiento de aguas residuales, con múltiples criterios de desempeño económico, técnico y administrativo. A causa de ello, determinaron el esquema óptimo que obtendría los máximos beneficios generales para la planta de tratamiento de aguas residuales a construir.

La Tabla 1 relaciona diversas experiencias de aplicación de las diferentes herramientas metodológicas utilizadas para la selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales en diferentes contextos.

Tabla 1.

Experiencias relacionadas con la aplicación de métodos de análisis de decisión para la selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales

Escenario evaluado	Sistemas evaluados	Criterios de selección		Referencia
	Método de toma de decisiones	objetivas únicas – modelos conceptuales	Sistema seleccionado	
Pequeñas y medianas poblaciones en Colombia y América Latina	*Infiltración rápida *Infiltración lenta *Flujo superficial *Laguna de maduración *Laguna facultativa *Humedal de flujo libre *Humedal de flujo subsuperficial *Plantas acuáticas – jacintos *Plantas acuáticas - duckweed	*Remoción de DBO, sólidos, nitrógeno, fósforo, coliformes fecales *Calidad efluente reuso en agricultura *Simplicidad operación y mantenimiento *Capacitación personal operación y mantenimiento *Generación de lodos, olores y vectores *Contaminación aguas subterráneas *Cambios en propiedades del suelo *Generación de subproductos con potencial económico *Requerimiento de energía, área, vegetación tolerante agua *Dependencia de características del suelo	Se plantea la guía sin embargo, no se aplica en ningún contexto	(Bernal <i>et al.</i> , 2003)
Pequeña ciudad Latinoamericanas y del caribe	*UASB + Filtro percolador *Lodos Activados tipo aireación extendida	*Aplicabilidad del proceso *Generación de residuos *Aceptación por parte de la comunidad y entorno *Generación de subproductos *Vida útil y operación *Requerimiento de área, costo, diseño y construcción	UASB + Filtro percolador	(Noyola <i>et al.</i> , 2013)
Áreas urbanas municipios Colombianos	Se evalúan tres escenarios diferentes, sin embargo estos se enfocan en conocer el nivel de centralización del sistema, mas no la tecnología de tratamiento a usar	ECONÓMICOS E INSTITUCIONALES *Costos inversión, operación y mantenimiento tratamiento *Costos inversión, operación y mantenimiento de sistema de alcantarillado *Apoyo sistemas descentralizados *Existencia zonas sin cobertura gestión aguas residuales TÉCNICO *Potencial reutilización *Cobertura alcantarillado *Nivel de centralización *Disponibilidad área *Eficiencia tratamiento *Distancia al tratamiento SOCIALES *Aceptación, Participación *Tamaño, distribución y densidad de población AMBIENTALES *Impacto *Recuperación nutrientes *Disponibilidad agua *Producción de lodos *Olor, ruido, paisaje	N/A	(Bernal, 2018)

(Continúa)

Escenario evaluado	Sistemas evaluados	Criterios de selección	Sistema seleccionado	Referencia
Método de sistema de apoyo a las decisiones				
Ciudad de mediano tamaño al Norte de España. Tres escenarios: *Vertimientos en zonas sensibles *Concentración efluente de nitrógeno especial *Efluente para reutilización agrícola	*Modified Ludzack-Ettinger *Zanjas de oxidación *Reactor de flujo discontinuo secuencial (SBR) *Lodo activado de película fija integrada *Biorreactor de membrana (MBR)	ECONÓMICOS *Costos *Externalidades ambientales AMBIENTALES *ACV-impacto ambiental en el ciclo de vida TÉCNICO *Confiabilidad *Simplicidad *Flexibilidad	Reactor de flujo discontinuo secuencial	(Castillo et al., 2016)
Métodos de criterios múltiples – técnica de orden de preferencia por similitud a la solución ideal - TOPSIS				
Seis escenarios planteados: *Zona Urbana restricción de tierra y vertimiento *Zona Urbana restricción de tierra y vertimiento *Zona Urbana restricción de tierra y reúso de agua *Zona Suburbana *Zona Suburbana con reúso de agua *Zona rural	*Lodos activados Convencional *Reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos (UASB) + Laguna facultativa *Reactor de flujo discontinuo secuencial (SBR) *Humedales artificiales	*Calentamiento global *Eutrofización *Ciclo de vida de costos *Requisitos de tierra *Requisitos de operación *Robustez del sistema *Sostenibilidad	Escenario 1: Lodos activados	(Kalbar et al., 2012a)
Tratamiento para grandes edificaciones en centros urbanos de India	*Lodos activados *Reactor de flujo discontinuo secuencial (SBR) *Biorreactor de membrana (MBR)	*Calentamiento global *Eutrofización *Ciclo de vida de costos *Requisitos de tierra *Requisitos de operación *Robustez del sistema *Sostenibilidad	Biorreactor de membrana	(Kalbar et al., 2012b)
Métodos de criterios múltiples – proceso de jerarquía analítica - AHP				
Pequeñas plantas de tratamiento de Aguas residuales en España	*Humedales artificiales *Sistema de lagunas *Aireación extendida *Biorreactor de membrana *Contactor de rotación biológica ana percolador *Reactor de flujo discontinuo secuencial	ECONÓMICO *Costo inversión, mantenimiento y operación AMBIENTAL *Remoción materia orgánica, sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo *Consumo de energía *Área de tierra requerida *Producción de lodos *Reutilización de agua *Recuperación productos *Confiabilidad SOCIAL *Olores, Ruido, Impacto visual, Aceptación pública, Complejidad	*Aireación extendida	(Molinos et al., 2014)

3. Metodología

El proyecto se desarrolló en tres fases: i) identificación de opciones tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales; ii) determinación de metodología para la selección de tecnología de tratamiento de aguas residuales; y iii) propuesta de sistema tecnológico el tratamiento de aguas residuales. La Figura 3 presenta un esquema metodológico general con el desarrollo del proyecto.

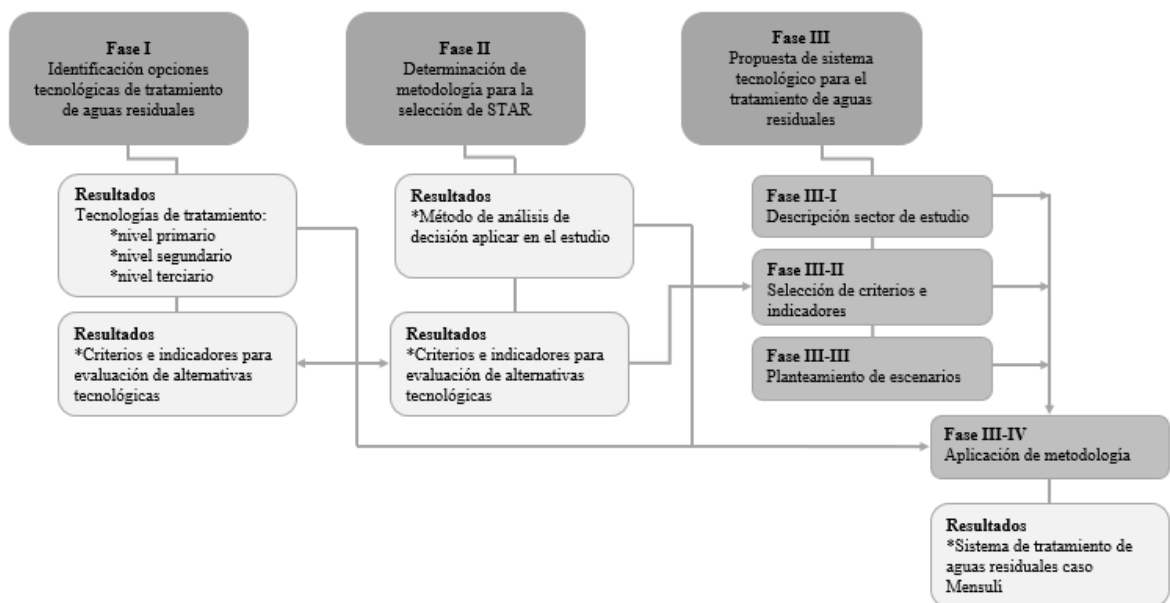


Figura 3. Esquema del proceso metodológico

3.1 Identificación de opciones tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales

El desarrollo del objetivo comenzó con una revisión de la literatura enfocada en la búsqueda de estudios aplicados, provenientes de bases de datos científicas como ScienceDirect®, Scopus®, Elsevier® y Springer®. En esta se evaluaron tecnologías de tratamiento de agua residual doméstica en pequeñas poblaciones, en zonas suburbanas y en áreas en donde no existía o fuera insuficiente la infraestructura para la recolección, transporte y tratamiento de estas.

Se emplearon palabras clave como domestic wastewater AND decentralized treatment, se seleccionaron artículos con las características ya mencionadas. Los resultados de la búsqueda fueron organizados y tabulados en Excel®, incluyendo información básica del artículo como título, resumen, autor, lugar de aplicación, tecnología de tratamiento y criterios técnicos.

La revisión de cada uno de los artículos seleccionados se enfocó en: i) la tecnología o el tren de tratamiento aplicado; ii) la población servida, que dado el filtro de búsqueda de tratamiento descentralizado, correspondía a zonas urbanas, pequeñas poblaciones en zonas metropolitanas y unidades residenciales; iii) las características fisicoquímicas del afluente y efluente; iv) los usos del agua residual tratada; v) los parámetros técnicos relacionados con las tecnologías.

Con lo anterior, se procedió a clasificar cada sistema por nivel de tratamiento en: i) Tratamiento primario; ii) Tratamiento secundario y iii) Tratamiento terciario. A esto se añadió, la categorización por grupos según las operaciones y procesos llevados a cabo para la depuración de las aguas residuales, así: i) Tratamiento biológico; ii) Tratamiento fisicoquímico; y iii) artículos con información de revisión de tecnologías de tratamiento, en este tipo de artículos, la información consignada allí correspondía a revisiones del estado del arte relacionada con la gestión del tratamiento de aguas residuales y/o reportes de aplicabilidad de las diversas

tecnologías de tratamiento a nivel mundial. A partir de los artículos de tratamiento biológico, se planteó una categoría adicional, distribuyendo los tipos de tratamiento en: i) sistemas aerobios, y ii) sistemas anaerobios. Una tercera clasificación abarcó los sistemas naturales de tratamiento construidos. Por último, la clasificación fue más detallada y cualitativa, la cual relacionó cada alternativa de tratamiento con cada uno de los grupos mencionados en la anterior distribución.

A partir de la información normalizada y clasificada en grupos predefinidos, y mediante el uso de criterios estadísticos, definiendo del conjunto de datos revisado la mayor cantidad de aplicaciones en cada una de las clasificaciones; de esta forma, se tomó como criterio de selección las tecnologías más empleadas en poblaciones como el contexto de estudio y representativas en los grupos de tecnologías por procesos, biológicos, fisicoquímicos y sistemas naturales de tratamiento, los cuales fueron posteriormente clasificados en los niveles de tratamiento correspondientes. Como resultado se obtuvo el listado de tecnologías de mayor aplicación, por niveles de tratamiento en contextos similares al del presente estudio.

De manera análoga, con las tecnologías de tratamiento seleccionadas, se examinaron minuciosamente experiencias relacionadas con sistemas de tratamiento de aguas residuales en contextos similares reportadas para comunidades y poblaciones en Colombia. Lo anterior, con el fin de validar la aplicabilidad y uso de las alternativas seleccionadas en contextos nacionales y revisar la opción de incluir tecnologías adicionales que condujeran a una evaluación integral de alternativas tecnológicas aplicables en la región estudiada.

Por otra parte, se realizó una caracterización del grupo de tecnologías seleccionadas, incluyendo: i) descripción de generalidades del sistema; ii) requerimientos técnicos; iii) configuraciones especiales; iv) costos de inversión, operación y mantenimiento; v) requerimientos sociales; y vi) requerimientos ambientales. El Apéndice A presenta la

caracterización de las tecnologías seleccionadas, la cual fue fundamental para la aplicación de la metodología para selección de tecnología.

3.2 Determinación de metodología para la selección de tecnología de tratamiento de aguas residuales

El desarrollo de esta fase partió de una revisión del estado del arte, mediante la búsqueda de artículos de investigación científica provenientes de bases de datos como ScienceDirect[®], Scopus[®] y Elsevier[®]. Además, se revisaron documentos provenientes de redes y herramientas de colaboración, como IWA[®] Publishing y ResearchGate[®]. Para la búsqueda se recurrió al uso de palabras clave como Wastewater treatment AND selection, choice, assesment y evaluation.

Con los resultados obtenidos, se filtró y recopiló información en cada uno de los artículos, partiendo de una revisión inicial, tomando en cuenta la existencia de palabras como selection, assesment y evaluation. Los artículos fueron organizados en un documento de Excel[®], junto con información particular como: i) resumen; ii) sector y lugar de aplicación; iii) autores; iv) metodología aplicada para el análisis y toma de decisiones; v) tecnologías de tratamiento evaluadas con cada uno de sus criterios técnicos, ambientales, sociales, económicos, según cada caso.

Posteriormente, mediante la agrupación de experiencias que aplicaran los mismos métodos de análisis de decisiones, se determinaron las metodologías más aplicadas en procesos de selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales en contextos similares. Las metodologías seleccionadas fueron caracterizadas, incluyendo: las generalidades de cada uno de los métodos,

los criterios específicos de su aplicación, las restricciones y las ventajas que puedan influir en el desarrollo del presente estudio. Esta información se encuentra relacionada en el Apéndice B.

Conviene precisar que el enfoque metodológico base para el desarrollo del presente estudio fue fundamentado en la revisión de diversos autores con experiencias documentadas en contextos similares. Por consiguiente, para la selección de la metodología de aplicación, se tomaron en cuenta criterios como: i) cantidad de artículos representativos por metodología; ii) limitaciones y fortalezas de las metodologías; iii) disponibilidad de información requerida para la aplicación del método seleccionado.

Con la metodología seleccionada, se recapitularon los artículos base para su escogencia, con el fin de identificar una guía para el desarrollo del presente estudio; además, un caso que evidenciara detalladamente la aplicación de la metodología, listando la información requerida por el método y los factores de influencia en el proceso de aplicación.

3.3. Propuesta de sistema tecnológico para el tratamiento de aguas residuales

El desarrollo de esta fase del trabajo se dividió en diferentes etapas, contempladas así: i) la revisión del contexto a estudiar; ii) la selección de criterios e indicadores a evaluar; iii) el planteamiento y descripción de cada uno de los escenarios en los que se contempla aplicar el método de análisis de decisión; iv) la aplicación de la metodología de análisis de decisiones seleccionada; v) el planteamiento de los resultados y respectiva propuesta de sistema de tratamiento de aguas residuales para el caso Mensulí.

A continuación, se describen los aspectos metodológicos tomados en cuenta para el desarrollo de cada una de las fases mencionadas anteriormente:

3.3.1 Descripción del sector de estudio. Se realizó inicialmente la búsqueda de información relacionada con el sector en estudio. Se tuvo en cuenta que el caso de estudio (Mensulí) era un proyecto en la fase de estudios iniciales, por lo tanto, su alcance, detalle y características específicas no se encontraban totalmente definidas. Por lo anterior, la existencia y suministro de información secundaria hace parte de las restricciones encontradas en el desarrollo del proyecto.

Fue considerada como información relevante para la aplicación del método de selección de tecnología de tratamiento de aguas residuales aplicable al caso Mensulí, temas como: i) tamaño poblacional; ii) características socioeconómicas de la población; iii) conocimiento de infraestructura existente relacionada con servicio de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales; iv) aspectos ambientales del sector (fuentes receptoras, calidad de agua, entre otras).

Esta información se obtuvo mediante la revisión de documentos de estudios previos relacionados con caso Mensulí, correspondientes a entidades privadas interesadas en el desarrollo del sector, además de información secundaria de entidades públicas, tales como: i) diagnósticos ambientales del sector (Arismendi, 2008), ii) planes de desarrollo de empresas prestadoras del servicio (Empresa Pública de Alcantarillado de Santander , 2015), iii) planes de desarrollo municipales (Alcaldía Municipal Floridablanca, 2016).

3.3.2 Selección de criterios e indicadores. La selección de alternativas de tratamiento de aguas residuales involucra un conjunto de indicadores, que al ser evaluados para cada alternativa se convierte en un análisis articulado. Es importante tener en cuenta que dichos indicadores deben caracterizar todos los aspectos de las tecnologías a evaluar con ayuda de los métodos de análisis de decisión.

La selección de indicadores se realizó con base en revisión de literatura científica, para lo cual se tomó como base los artículos científicos estudiados y relacionados en el Apéndice D, los cuales corresponden a experiencias de selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales en contextos similares al del presente caso de estudio. De cada uno de los artículos revisados se extrajo información relacionada con los indicadores aplicados en el estudio, junto con su forma de evaluación y estimación. Lo anterior fue listado y clasificado según el grupo de criterios al cual correspondiera en: i) ambiental; ii) económico; iii) técnico; y, iv) social.

Con base en la información mencionada anteriormente, se procedió a seleccionar los indicadores que se consideraron relevantes para la evaluación de cada una de las alternativas tecnológicas a estudiar, mediante la aplicación de la herramienta metodológica seleccionada. Asimismo, se asignaron las clasificaciones y calificaciones correspondientes según los requisitos metodológicos de la herramienta seleccionada, los cuales serán descritos y expuestos en la sección de resultados y discusión.

Un aspecto importante a resaltar, está relacionado con la medición de las calificaciones de cada uno de los indicadores para cada alternativa tecnológica seleccionada., para lo cual se debe tener en cuenta que dichos criterios pueden ser cuantitativos o cualitativos. De esta forma, dados los alcances planteados en la propuesta de trabajo para el presente estudio, la cuantificación de cada uno de estos indicadores en cada uno de los escenarios de aplicación se obtuvo de información secundaria, relacionada con revisión del estado del arte, documentos de experiencias científicas reportadas, caracterizaciones de alternativas tecnológicas de tratamiento y literatura en general, descrita en los resultados; por ello es importante recalcar que un paso adicional para perfeccionar el presente estudio sería la validación de dichos porcentajes de relevancia por medio de la inclusión del criterio y de evaluación de expertos.

3.3.3 Planteamiento de escenarios para la toma de decisiones. Los escenarios son conjuntos de ponderaciones de indicadores que muestran las prioridades del estudio de caso en una determinada situación de toma de decisiones. Puesto que las condiciones reales del caso de estudio Mensulí no están totalmente definidas se hizo necesario el planteamiento de diversos escenarios que permitan a futuro la toma de decisiones de manera eficiente a los encargados del proyecto (ej. área disponible para la ubicación del sistema de tratamiento o posibilidad de reúso del agua residual tratada).

Estos escenarios fueron planteados resaltando temas como la búsqueda de alternativas diferentes a las convencionales en materia de tratamiento de aguas residuales. Asimismo, por fines prácticos y según los alcances planteados para la aplicación de la metodología y desarrollo del presente estudio, dichas ponderaciones fueron definidas con base en revisiones de literatura y a consideración del autor. En virtud de lo anterior, se resalta nuevamente la importancia de la validación de los respectivos porcentajes de relevancia mediante la inclusión del criterio y la evaluación de expertos.

3.3.4 Aplicación de metodología para la selección de alternativas de tratamiento de agua residual. Con la información anteriormente descrita se procedió con la aplicación de la metodología seleccionada como entregable en el segundo objetivo específico del presente estudio.

Tal y como se describió en la parte metodológica, la segunda fase consistió en la búsqueda y selección de la metodología de análisis de decisión a aplicar en el presente estudio, por lo cual el detalle y justificación de dicha selección será descrito en la sección de resultados y discusión. Sin embargo, para poder describir metodológicamente esta etapa del trabajo, es importante

mentonar que la metodología seleccionada fue la técnica de orden de preferencia por similitud con la solución ideal (TOPSIS). TOPSIS utiliza una perspectiva basada en la distancia para cuantificar y comparar las preferencias de las alternativas sobre el conjunto de atributos (Kalbar *et al.*, 2012).

El método TOPSIS se evalúa con el planteamiento de una matriz de decisión que involucra el número de alternativas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales con el número de indicadores a evaluar de cada una de dichas opciones, a continuación, se describirá paso a paso la técnica de orden de preferencia por similitud a la solución ideal planteada por Hwang y Yoon (1981).

3.3.4.1 Construcción de matriz de decisión normalizada. Este proceso intenta transformar las diferentes dimensiones de indicadores en no dimensionales, lo que permite la comparación de estos. Una forma es tomar el resultado de cada uno dividido por la normal del vector resultado total del indicador en cuestión.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

Donde $i = 1, \dots, m$; $j = 1, \dots, n$. Siendo x_{ij} la calificación del indicador, m el número de alternativas tecnológicas de tratamiento y n el número de indicadores evaluados; con lo anterior cada indicador tiene la misma unidad de vector.

3.3.4.2 Construcción de matriz de decisión normalizada ponderada. El conjunto de ponderaciones determinados en el planteamiento de escenarios es incluido en la matriz de

decisión en este punto. Esta matriz puede ser calculada multiplicando cada columna con su respectivo peso asociado, así:

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{1j} & v_{1n} \\ v_{i1} & v_{ij} & v_{in} \\ v_{m1} & v_{mj} & v_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_j r_{1j} & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{i1} & w_j r_{ij} & w_n r_{in} \\ w_1 r_{m1} & w_j r_{mj} & w_n r_{mn} \end{bmatrix}$$

Donde $w = (w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_n), \quad \sum_{j=1}^n w_j = 1$

3.3.4.3 Determinar soluciones ideales positivas y negativas. Dichos parámetros se determinan así:

$$\begin{aligned} A^+ &= \{(max_i v_{ij} \mid j \in J), (min_i v_{ij} \mid j \in J') \mid i = 1, 2, \dots, m\} \\ &= \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+, \dots, v_n^+\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A^- &= \{(min_i v_{ij} \mid j \in J), (max_i v_{ij} \mid j \in J') \mid i = 1, 2, \dots, m\} \\ &= \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^-\} \end{aligned}$$

Donde $J = \{j = 1, 2, \dots, n; j\}$ asociados con atributos de beneficio

$J' = \{j = 1, 2, \dots, n; j\}$ asociados con atributos de costo

Entonces las dos alternativas indican la alternativa más preferible (solución ideal) y la menos preferible (solución ideal negativa).

3.3.4.4 Calcular la medida de separación entre cada alternativa. La separación entre cada alternativa se puede medir por la distancia euclidiana n-dimensional, la cual está dada por:

$$S_{i+} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$S_{i-} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

3.3.4.5 Calcular la proximidad relativa a la solución ideal. La proximidad relativa de A_i respecto a A^+ está definida como:

$$C_{i+} = S_{i-} / (S_{i+} + S_{i-}), \quad 0 < C_{i+} < 1, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Está claro que $C_{i+} = 1$ si $A_i = A^+$ y $C_{i+} = 0$ si $A_i = A^-$. una alternativa A_i está más cercana a A^+ como C_{i+} se acerca a 1.

3.3.4.6 Clasificar el orden de preferencia. El conjunto de alternativas puede ser clasificado de acuerdo con el orden descendente de C^+ .

La metodología anteriormente descrita fue aplicada para la selección de alternativas por niveles de tratamiento según las alternativas tecnológicas seleccionadas en el primer objetivo del presente estudio, así como para cada uno de los escenarios planteados en esta etapa del estudio.

Finalmente, se procedió con el respectivo análisis de la información y planteamiento del sistema tecnológico para el tratamiento de aguas residuales domésticas para el caso Mensulí.

4. Resultados y Discusión

4.1 Opciones tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales

Se realizó la revisión de 65 casos de estudio, aplicados en la evaluación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales domésticas en pequeñas poblaciones (Apéndice C). Los distintos sistemas fueron clasificados en tres grandes grupos; por un lado, clasificados por niveles de tratamiento; por otro, por grupos de operaciones y procesos, entre los que se encuentran los tratamientos fisicoquímicos y biológicos, y a su vez, dentro de estos últimos se consideraron los sistemas aerobios, anaerobios; y otro grupo fueron los sistemas naturales construídos, los cuales si bien es cierto pueden requerir o no oxígeno para realizar el tratamiento, se consideraron con una clasificación independiente por sus condiciones de aprovechamiento de las transformaciones llevadas a cabo en el medio natural.

Inicialmente, la distribución de los artículos estudiados arrojó la información expuesta en la figura 4, en ella se expone la distribución de las tecnologías por niveles de tratamiento. Es importante tener en cuenta situaciones como: i) los casos de estudio revisados manejaban combinaciones de niveles de tratamiento; ii) que el mayor porcentaje registrado corresponde a experiencias relacionadas con revisiones de las diversas tecnologías aplicables en las diferentes zonas estudiadas, para lo cual es importante mencionar, que estos artículos incluían reportes de la gestión del tratamiento de aguas residuales, su aplicabilidad en contexto similares al del

presente estudio y detalles conceptuales y técnicos sin definir una única tecnología de tratamiento. Por otro lado, un aspecto relevante por recalcar está relacionado con el hecho de que 14 de los 65 artículos reportan tecnologías con niveles de tratamiento terciario. Esto puede estar relacionado con el interés de tener sistemas de tratamiento que permitan la reutilización de las aguas residuales domésticas ante los problemas de escasez de agua dulce (Teh *et al.*, 2015 y Lutterbeck *et al.*, 2017).

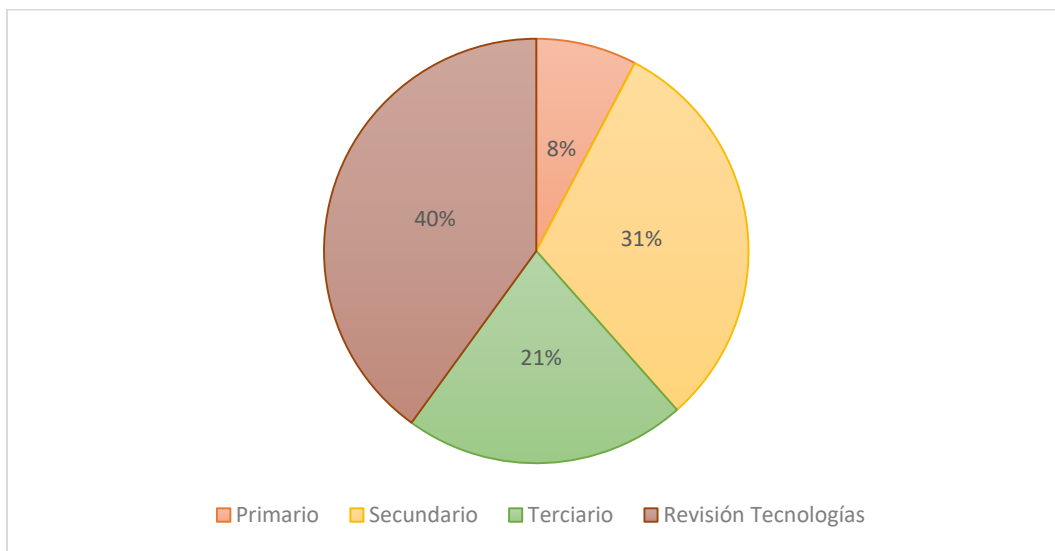


Figura 4. Distribución de alternativas tecnológicas por niveles de tratamiento provenientes de casos de estudio revisados en literatura

De igual manera se identificó que la aplicabilidad de tratamientos en nivel primario es muy baja, comparada con las experiencias reportadas para niveles de tratamiento secundario y terciario, lo cual podría estar relacionado por diversas razones, entre las cuales podrían estar: i) la disponibilidad de opciones tecnológicas para estos contextos, ii) la búsqueda de alcanzar altas eficiencias de remoción de contaminantes, que permitan el cumplimiento de parámetros requeridos para verter efluentes a sistemas superficiales de agua, acatando los requisitos

consignados en la normativa aplicable y iii) el objetivo de minimizar impactos ambientales causados por el no tratamiento de aguas residuales (Lutterbeck *et al.*, 2018)

Continuando con la clasificación de los artículos seleccionados, la figura 5 muestra la distribución de experiencias, relacionadas por tipo de procesos para el tratamiento de aguas residuales, en este, al igual que el caso anterior se cuenta con casos en los que: i) donde solo se exponía una revisión general de las diversas tecnologías sin ahondar o determinar una explícita para los casos abordados; y ii) aplicaciones con diversos procesos usados para el tratamiento del agua residual. Tal cual lo expresan Liang *et al.* (2010), los procesos biológicos son ampliamente usados para el tratamiento de aguas residuales. Igualmente, Han *et al.* (2013) mencionan que dichos sistemas son usados considerablemente para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en zonas rurales y suburbanas de todo el mundo, presentando la ventaja de eliminar de manera efectiva contaminantes como la materia orgánica, el nitrógeno y el fósforo de las aguas residuales.

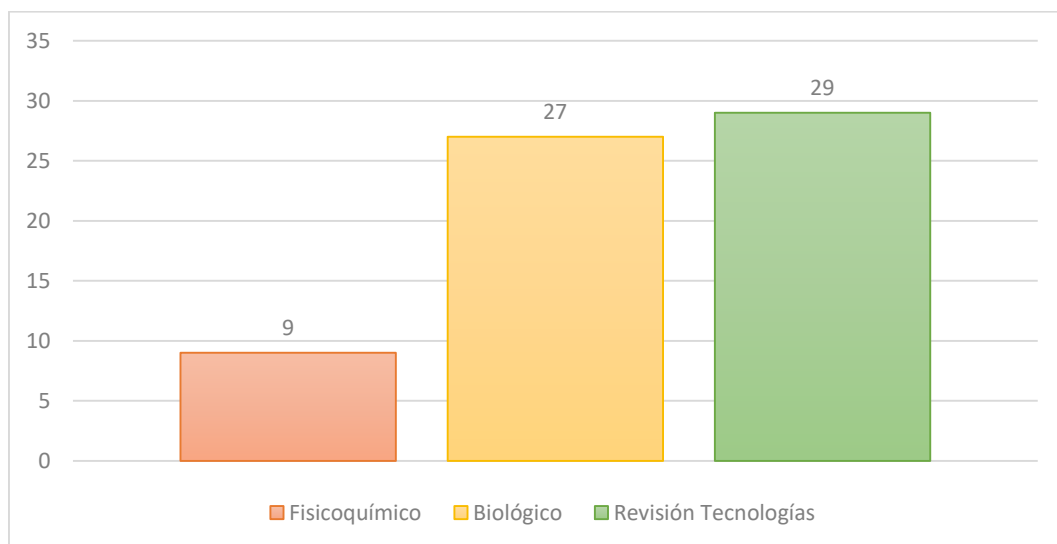


Figura 5. Distribución de alternativas tecnológicas por procesos en el sistema proveniente de casos de estudio revisados en literatura

Por otro lado, se evidencia la poca aplicación de procesos fisicoquímicos para el tratamiento de aguas residuales en dichos contextos, Yoon *et al.* (2008) referencia los procesos de tratamiento biológico como más eficientes y menos costosos que los procesos fisicoquímicos. Sin embargo, autores como Rashidi *et al.* (2015) consideran los métodos físicos como una de las técnicas más populares para el tratamiento de aguas residuales municipales, esto aparece relacionado con su facilidad de aplicación comparada con otros enfoques. Hechas las anteriores salvedades, es importante tener en cuenta que la aplicabilidad de cualquier alternativa tecnológica y su tipología es específica y está relacionada con las características de diversos aspectos particulares del sector estudiado.

En relación a los sistemas de tratamiento que usan procesos biológicos para la depuración de aguas residuales, la figura 6 evidencia una mayor aplicabilidad de los sistemas aerobios. Acorde con Teh *et al.* (2015) este tipo de sistemas podían lograr alta eliminación orgánica y de sólidos, y no presenta requisito de usos de productos químicos. No obstante, autores como Han *et al.* (2013) reportan las graves problemáticas que afectan la estabilidad de estos sistemas, en zonas rurales y de desarrollo principalmente, entre ellas está el alto consumo energético de sus instalaciones para garantizar la eficiencia en los diversos procesos.

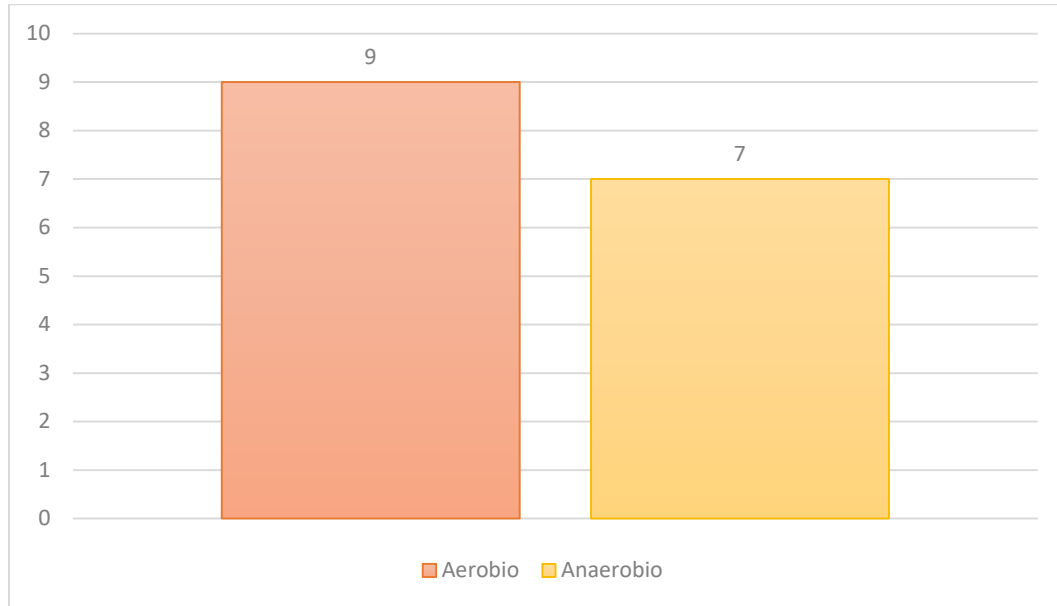


Figura 6. Distribución de tratamientos por procesos biológicos provenientes de casos de estudio revisados en literatura

En contraste, el uso de tecnologías con procesos biológicos anaerobios se presentó en menor cantidad según las experiencias revisadas. Autores como Li y Lu (2017) reportan que en los últimos años se ha centrado cada vez más la atención en las técnicas anaeróbicas para el tratamiento de aguas residuales domésticas descentralizadas en países de desarrollo; en este resaltan ventajas como la recuperación de energía y la baja producción de lodos, sin embargo, mencionan que el uso de estas no se ha adoptado ampliamente debido a la falta de capacidad de eliminación de nitrógeno.

Mientras tanto, Pang *et al.* (2017) resaltan la sostenibilidad de los procesos anaeróbicos realizados en el sitio debido a su simplicidad, rentabilidad, pequeña huella, baja producción de lodos, baja demanda de energía y menores requisitos de operación especializada.

Prosiguiendo con los resultados, la aplicabilidad registrada con el uso de sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales, fue representada en un 17% de los artículos revisados.

Garfí *et al.* (2017) reportan que este tipo de sistemas ha ido ganando interés durante las últimas décadas, ya que son una alternativa atractiva comparada con los sistemas de tratamiento convencionales para su aplicación en pequeñas comunidades; se caracterizan por presentar un bajo consumo de energía, una operación simple y menores costos de inversión, operación y mantenimiento, también son la opción tecnológica más respetuosa con el medio ambiente.

En la figura 7 se evidencia la mayor aplicabilidad de los diferentes tipos de humedales construidos. Lutterbeck *et al.* (2018) reporta los humedales construidos como una de las tecnologías más eficientes probadas para el tratamiento de aguas residuales con gran aplicación en países en desarrollo, así como una alternativa para el tratamiento descentralizado en comunidades rurales y suburbanas a causa del bajo consumo de energía, costos de mantenimiento, impacto visual, generación de lodos, entre otros.

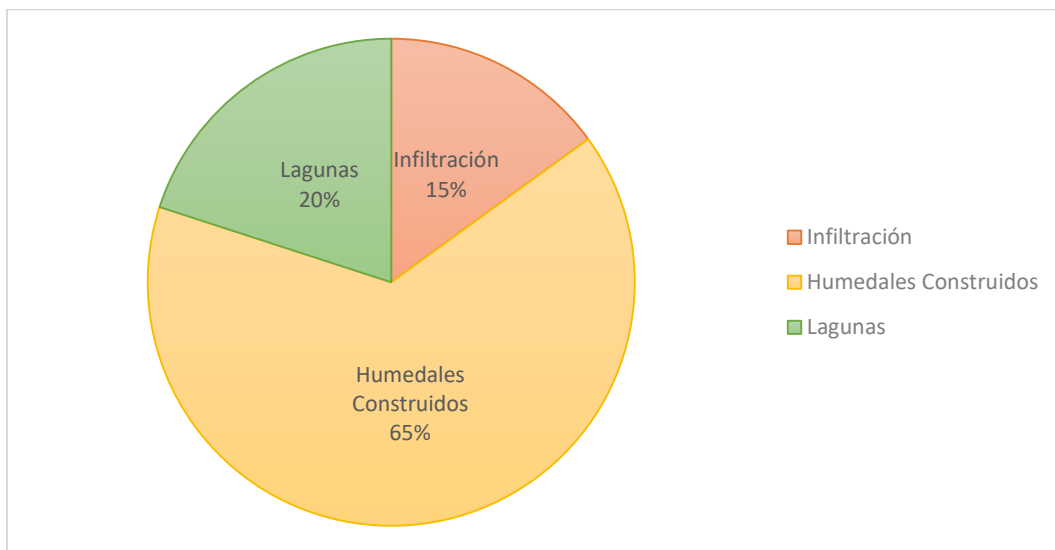


Figura 7. Distribución de sistemas de alternativas tecnológicas de sistemas naturales provenientes de casos de estudio revisados en literatura

A pesar de no registrarse una alta aplicabilidad en los resultados del presente estudio, el sistema de tratamiento conformado por lagunas es reportado como una de las opciones de mayor aplicación para el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe (Suarez, 2011).

Asimismo, Li *et al.* (2011) describen el proceso de infiltración como una buena alternativa para el tratamiento de aguas residuales en sitio, teniendo en cuenta la eficiencia y sus costos, por ello su aplicación es especialmente adecuada para sistemas de tratamiento descentralizados en zonas rurales.

Dada la amplia variedad de ofertas tecnológicas, desarrolladas y existentes, se contó con diversos sistemas de tratamiento para cada una de las clasificaciones expuestas, las cuales se presentan a continuación.

En la figura 8 se muestran las diferentes alternativas tecnológicas para los sistemas de tratamiento biológico anaerobio. Se evidencia en mayor porcentaje la aplicación de tanques sépticos y filtros anaerobios, lo cual es coincidente con las tecnologías de mayor aplicación en países en desarrollo para enfoques descentralizados (Lutterbeck *et al.*, 2017). Por su parte, Luo *et al.* (2014) recalcan que generalmente la gestión descentralizada de aguas residuales para hogares está relacionada con el uso de este tipo de reactores en los cuales se realiza un tratamiento previo de las aguas generadas. Por otra parte, Jorsaraei *et al.* (2014) considera que el proceso más simple, antiguo y aplicable de los sistemas de tratamiento anaerobio en sitio es el tanque séptico, pero infortunadamente su eficiencia es baja por lo que se conoce como una unidad de tratamiento previo con la función de almacenar y sedimentar sólidos suspendidos.

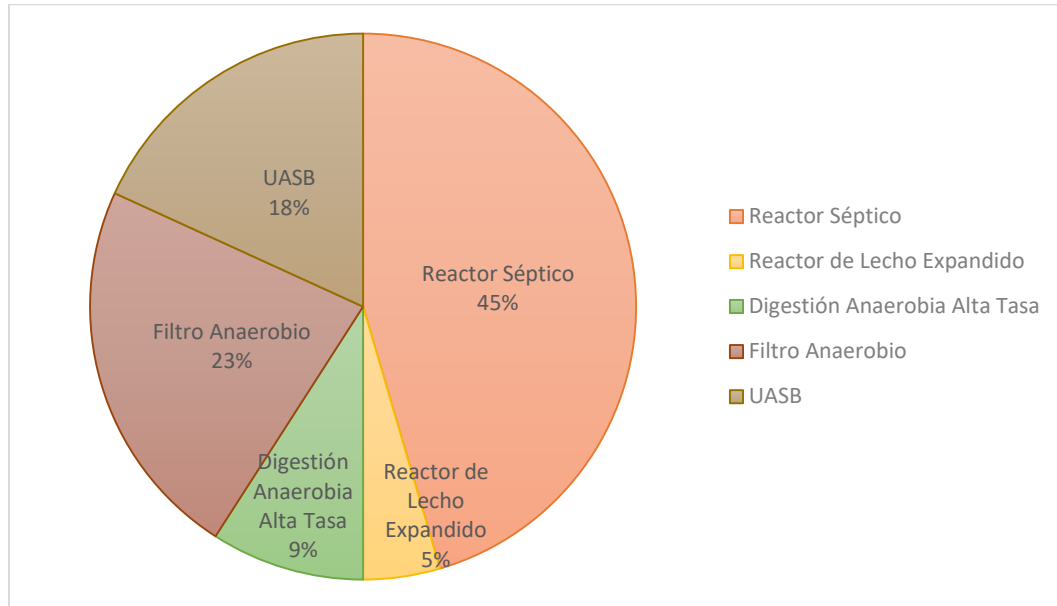


Figura 8. Distribución de alternativas tecnológicas de procesos biológicos anaerobios provenientes de casos de estudio revisado en literatura

Otro de los sistemas de aplicabilidad considerable es el proceso ascensional de manto de lodos anaerobio (UASB); esta alternativa tecnológica fue catalogada por Bdour *et al.* (2009) como uno de los digestores más adecuados para condiciones tropicales dado que su aplicabilidad es factible en sectores de desarrollo urbano por su alta eficiencia de eliminación de materia orgánica, simplicidad, costos de inversión medios, sencillez en la operación y mantenimiento, así como los bajos requerimientos de área para su implantación.

Respecto de las alternativas relacionadas con procesos aerobios (ver figura 9) se evidencia que más del 50% de experiencias revisadas aplicaron la técnica de lodos activados en alguna de sus variantes, debido posiblemente a la alta eliminación orgánica y de turbidez (Teh *et al.*, 2015). No obstante, algunos autores, Garfí *et al.* (2017) reportan desventajas como los altos costos de construcción y operación, altos requerimientos de personal calificado para la operación y mantenimiento y altos consumos de energía.

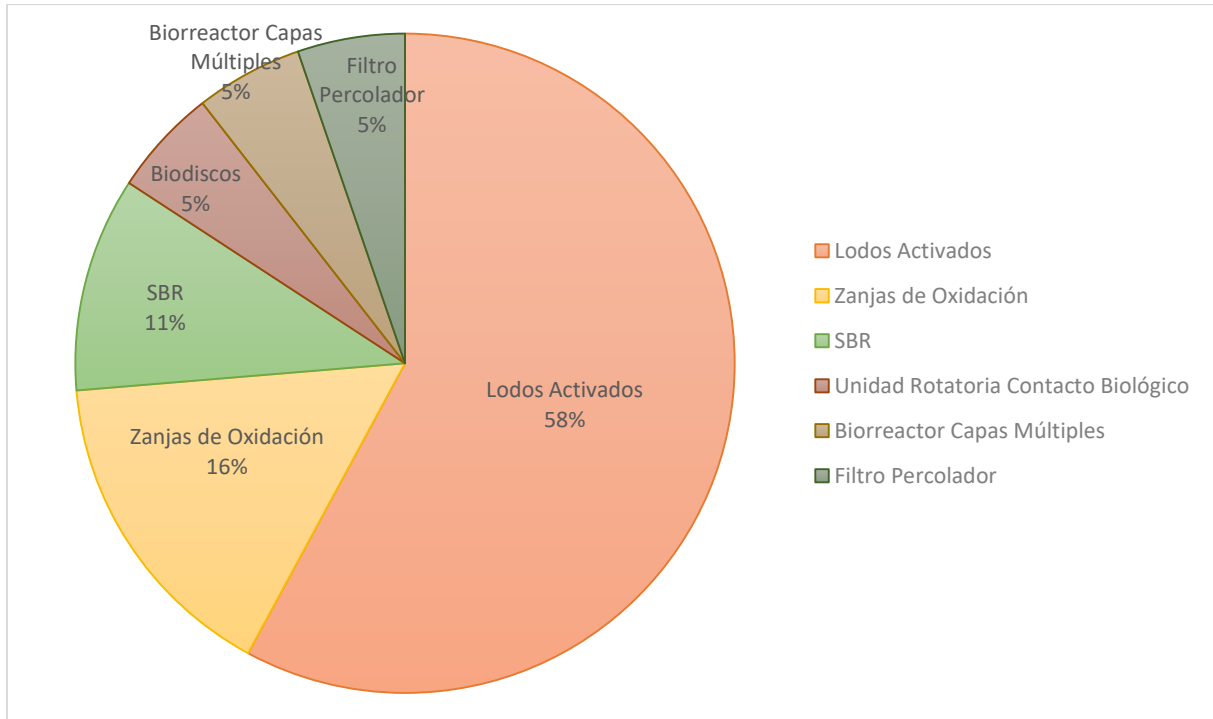


Figura 9. Distribución de sistemas de alternativas tecnológicas de procesos biológicos aerobios provenientes de casos de estudio revisados en literatura

A propósito de las variantes de lodos activados, Fernandes *et al.* (2013) catalogan el reactor biológico secuencial (SBR) como el más prometedor y viable de las modificaciones propuestas de lodo activado, hechas para la eliminación de carbono orgánico y nutrientes, siendo este considerado como un sistema de tratamiento eficaz debido a su simplicidad y flexibilidad de operación. Un ejemplo de su aplicación corresponde a un reactor instalado en un condominio residencial, ubicado en la ciudad de Florianópolis, en el estado de Santa Catarina al sur de Brasil, mostrando eficiencias de eliminación de materia orgánica y nutrientes satisfactoria, produciendo efluentes ajustados a los estándares de calidad establecidos en la legislación brasileña (Fernandes *et al.*, 2013).

En los resultados expuestos en la figura 9, se observa la poca aplicabilidad de alternativas tecnológicas como lo son: el filtro percolador, los biodiscos y el biorreactor de capas múltiples.

Ahora bien, en la metodología fue señalada la importancia de ahondar experiencias reportadas en municipios de Colombia. Para lo cual, Suarez (2011) reporta diversas experiencias con el uso de alternativas tecnológicas en niveles de tratamiento secundario, entre los cuales contempla lagunas de estabilización, filtro percolador, sistemas de lodos activados, biodiscos, humedales construidos, reactores de biomasa inmovilizada y reactores biológico secuenciales. Asimismo, relaciona las lagunas de estabilización, los filtros biológicos, los reactores anaerobios UASB y los lodos activados como las tecnologías más construidas en los municipios colombianos.

Mientras tanto, Lizarazo y Orjuela (2013) referencian las tecnologías de lodos activados, filtros percoladores y lagunas de estabilización como los sistemas secundarios más usados en el tratamiento de aguas residuales en Colombia.

Acontece lo mismo, con lo reportado por Noyola *et al.* (2013) quienes reportan la situación del tratamiento de aguas residuales en América Latina y El Caribe (ALC), en la cual incluye las tecnologías de tratamiento más usadas en la región con base en la revisión de plantas de tratamiento en seis países (i.e. Brasil, Chile, Colombia, Guatemala, México y República Dominicana). De dicha revisión se menciona que las tres tecnologías más usadas representadas por el 80% son el proceso de lodos activados, lagunas de estabilización y el proceso ascensional de manto de lodos anaerobio (UASB).

Con base en lo anterior, para el presente estudio se incluyeron alternativas tecnológicas como filtro percolador y biodiscos, dada su reportada aplicabilidad en contextos locales.

Los sistemas de tratamiento con procesos fisicoquímicos, representan el 9% de la totalidad de experiencias de alternativas de tratamiento de aguas residuales revisadas. La figura 10 muestra que alrededor del 50% aplica técnicas que involucran el uso de membranas de diversos tipos para los procesos de filtración y pulimento de las aguas residuales. Según Rashidi *et al.* (2015) la utilización de membranas es uno de los métodos básicos de tratamiento utilizados para la separación de componentes químicos y físicos de las aguas residuales de acuerdo con el tamaño de sus poros.

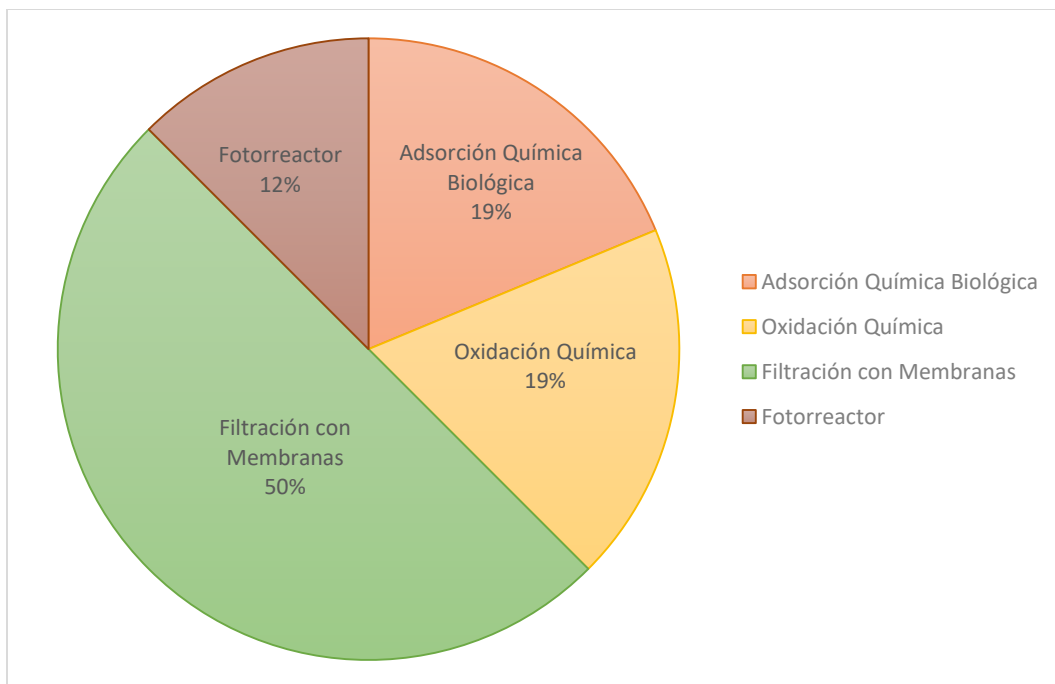


Figura 10. Distribución de alternativas tecnológicas de procesos fisicoquímicos provenientes de casos de estudio revisados en literatura

El uso de las membranas se realiza en conjunto con diversos digestores que permitan maximizar las efectividades en remociones esperadas, Wu *et al.* (2011) catalogan las unidades de tratamiento biológico junto con el uso de membranas, como sistemas altamente efectivos para

la eliminación de contaminantes; sin embargo, estos presentan altos costos de inversión, operación y mantenimiento por lo que son poco asequibles en los países en desarrollo. De otro lado, Gil *et al.* (2012) referencian dichos biorreactores de membrana aplicados en contextos descentralizados y resaltan que pueden ofrecer una huella ambiental baja, una alta calidad de efluentes y la posibilidad de reutilizar el permeado en tareas como el riego, pues estos sistemas logran una alta retención de patógenos.

Partiendo de los resultados expuestos y según el enfoque metodológico definido, la figura 11 muestra las alternativas tecnológicas consideradas en este estudio, en cada nivel de tratamiento según las diferentes experiencias revisadas en la literatura referenciada.



Figura 11. Alternativas tecnológicas de tratamiento de aguas residuales seleccionadas para aplicación de metodología

Al respecto de la caracterización de alternativas tecnológicas y por mencionar algunas generalidades de los sistemas seleccionados, los procesos biológicos involucran la degradación de materia orgánica por medio de microorganismos. Noyola *et al.* (2013) clasifican estos sistemas en aerobios y anaerobios, los primeros requieren oxígeno molecular disuelto y los otros funcionan sin oxígeno, también registran los sistemas naturales quienes aprovechan las

transformaciones que se dan en el medio natural para la degradación de contaminantes presentes en las aguas residuales.

Existen diversas clasificaciones de los sistemas anaerobios respecto a la configuración de sus procesos y a las generaciones coexistentes. Los reactores de primera generación son sistemas con biomasa sedimentada y sin mezclado; en esta se encuentra el tanque séptico, caracterizado con la función principal de eliminar sólidos suspendidos y material flotante, mediante procesos de sedimentación y digestión (Romero, 2004).

La segunda generación se da al presentarse retención de biomasa en el sistema mediante la formación de biopelículas, en este caso el proceso ascensional de manto de lodos anaerobio, conocido en inglés como UASB. En este sistema el agua residual es introducida por el fondo del reactor garantizando el contacto de esta con las bacterias anaerobias presentes en el manto de lodo existente en el reactor y permitiendo así que se den los procesos para el tratamiento del agua y la remoción de diversos contaminantes (Romero, 2004).

Otro de los sistemas de segunda generación es el filtro anaerobio, Noyola *et al.* (2013) consideran este como un reactor inundado empacado con soportes de crecimiento (i.e piedras, anillos de plástico) en los que el agua residual atraviesa permitiendo la interacción entre el sustrato y los microorganismos.

Para el caso de los sistemas de tratamiento aerobio, se seleccionó la tecnología de lodos activados. Dicho proceso está constituido por microorganismos o conglomerados bacterianos que forman flóculos presentándose en el proceso de absorción, síntesis y oxidación de la materia orgánica (Comisión Nacional del Agua CONAGUA, 2015).

Asimismo, en este proceso los microorganismos se encuentran mezclados con la materia orgánica y por causa de la agitación tiende a agruparse y a crear dichos flóculos. Noyola *et al.*

(2013) reportan la existencia de alrededor 13 variantes de lodos activados, entre las que se encuentra el reactor biológico secuencial (sequencing batch reactor, SBR) el cual opera en forma discontinua con las etapas de alimentación, reacción, sedimentación y vaciado.

Otra de las variantes son las zanjas de oxidación, esta es considerada como una modificación directa del proceso convencional, se diferencian por proporcionar tiempos de retención más largos, producciones mínimas de exceso de lodos con un alto grado de mineralización lo que facilita su posterior tratamiento, y la forma del reactor es diferente, pues es un canal largo y continuo generalmente ovalado (Mara, 2004).

Otra de las alternativas caracterizadas por Metcalf y Eddy (1995b) como un reactor aerobio de lecho fijo es el filtro percolador. Este sistema contiene un medio de soporte permeable, al que se le adhieren microorganismos y a través del cual percola el agua residual en proceso de tratamiento. La materia orgánica presente en el agua residual es degradada por acción de dichos microorganismos adheridos al medio.

Otro sistema en el que la biomasa crece adherida a un medio de soporte son los discos biológicos rotativos o biodiscos, en este caso están conformados por una serie de discos soportados por un eje horizontal, los cuales van parcialmente inmersos en el agua residual contenida en el reactor. Dichos discos rotan y se exponen alternativamente a la superficie estando en contacto con aire y agua en su respectivo proceso (Sperling, 2007).

Respecto de los sistemas naturales, se tienen los humedales construidos siendo estos estanques poco profundos en los que se implantan especies vegetales adaptadas a la vida acuática y en los que la depuración se basa en procesos naturales de tipo microbiológico, biológico, físico y químico (Alarcón *et al.*, 2018).

Por otra parte, Mara (2004) referencia las lagunas de estabilización como estanques conformados por terraplenes de tierra en los cuales las aguas residuales son tratadas por procesos naturales que involucran tanto algas como bacterias. Se conocen tres principales tipos de lagunas, a saber: i) las lagunas anaerobias son sistemas usados para el tratamiento primario de aguas residuales, en ellas, altas concentraciones de sólidos orgánicos e inorgánicos son estabilizados mediante actividad biológica en ausencia de oxígeno; en el proceso, se da la producción de gas metano y ácido sulfhídrico causante de malos olores (Phuntsho *et al.*, 2008); ii) las lagunas facultativas diseñadas generalmente como tratamiento secundario para la remoción de materia orgánica realizada con ayuda de poblaciones de algas que generan el oxígeno por medio de procesos de fotosíntesis (Mara, 2004); iii) las lagunas de maduración contempladas para la eliminación de contaminantes patógenos resistentes a los tratamientos previos realizados, en estos sistemas la remoción de DBO₅ y sólidos suspendidos es lenta, así como la eliminación de nutrientes (Mara, 2004).

En relación a los procesos fisicoquímicos, Romero (2004) referencia la filtración como una operación utilizada para la remoción de sólidos, materiales no sedimentables, turbiedad, fósforo, DBO₅, DQO, metales pesados, virus, entre otros contaminantes. Por lo cual, para asegurar una calidad superior de efluentes secundarios, se usan diversidad de barreras, tales como, membranas las cuales restringen el movimiento de moléculas y contaminantes, adsorbiéndolo al paso del agua a través de ellas.

Cada una de las tecnologías mencionadas se encuentran descritas y detalladas en el Apéndice A. Dicha información hizo parte fundamental para el desarrollo del objetivo 3.

4.2 Metodologías para la selección de tecnologías de tratamiento de agua residual

El enfoque metodológico usado en esta etapa del estudio, se basó inicialmente en la revisión de artículos de investigación científica relacionada con la aplicación de metodologías de análisis de decisión para la selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales. Se revisaron 29 artículos (Apéndice D), distribuidos en tres categorías: i) Toma de decisiones objetivas únicas; ii) Sistemas de apoyo a las decisiones; iii) Criterios múltiples (Ver figura 12). Se observa que los métodos de criterio múltiples presentan mayor acogida con las experiencias reportadas por diversos autores y contextos. Kalbar *et al.* (2013) recalcan la importancia de adoptar procedimientos racionales de toma de decisiones para la selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales, para lo cual, han hecho muchos intentos para abordar este tipo de problemas utilizando varios métodos de toma de decisiones de criterios múltiples.

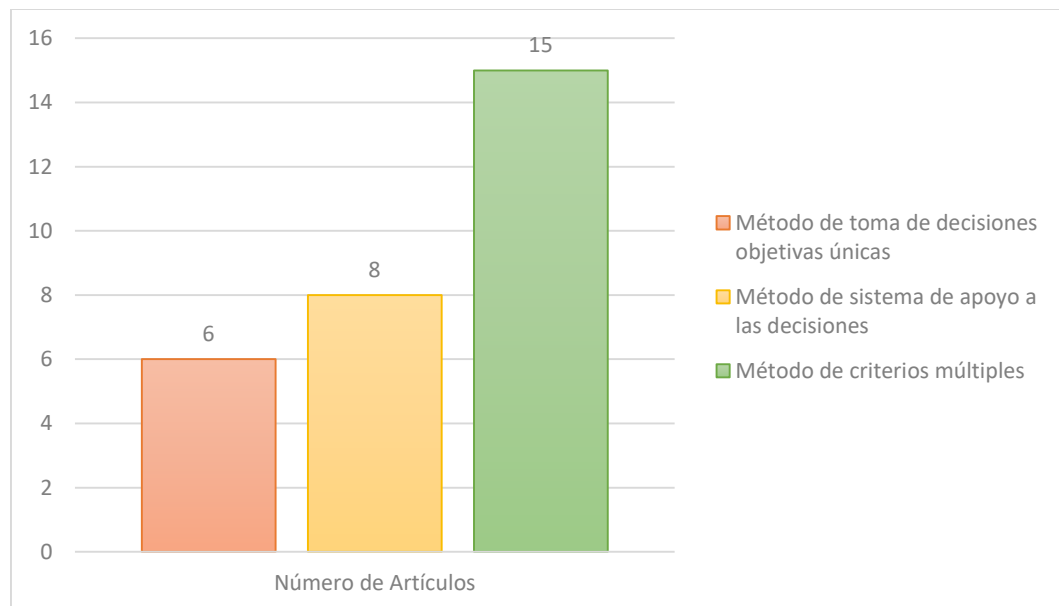


Figura 12. Distribución de metodologías de selección de tratamiento de aguas residuales provenientes de casos de estudio revisados en literatura

Paralelamente, se distribuyeron los casos registrados anteriormente según cada una de las técnicas aplicadas en los diferentes contextos evaluados. En la figura 13 se evidencia que para el caso de los métodos de toma de decisiones objetivas únicas la aplicación fue relacionada con el uso de modelos conceptuales. En relación a estos, Gálvis *et al.* (2003) resaltan de estas técnicas su forma simple de planteamiento, lo cual permite la toma de decisiones de una manera rápida y eficiente.

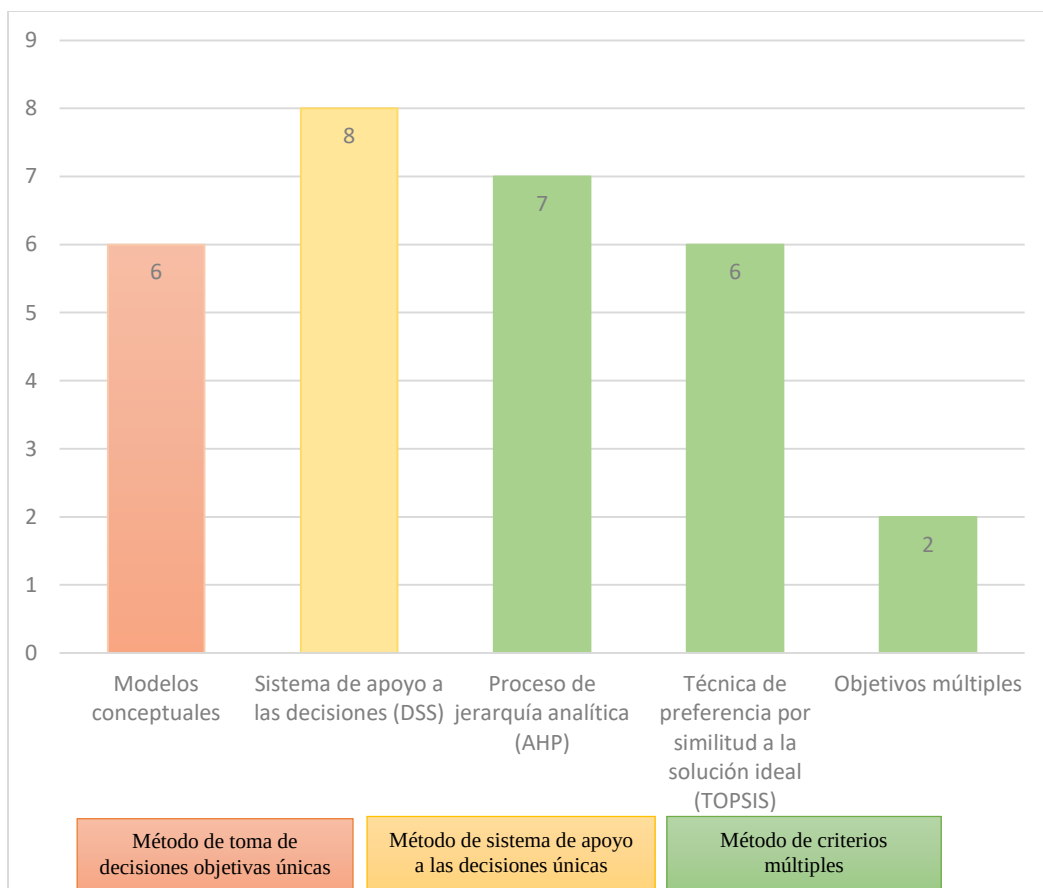


Figura 13. Distribución de metodologías de selección de tratamiento de aguas residuales provenientes de casos de estudio revisados en literatura

Respecto de la distribución de los métodos de criterios múltiples, Kalbar *et al.* (2013) resaltan que la técnica de preferencia por similitud a la solución ideal (TOPSIS) y los procesos de jerarquía analítica (AHP) son los métodos de múltiples atributos (MADM) más utilizados para la toma de decisiones grupales. De ahí, Kalbar *et al.* (2012a) consideran TOPSIS como el método preferido cuando los problemas de decisión involucran una gran cantidad de atributos y alternativas cuantitativas disponibles.

Es importante mencionar, que no se realizó clasificación de los métodos de sistemas de apoyo a las decisiones dado que en la gran mayoría de artículos fueron aplicadas diferentes herramientas, y en algunos casos softwares especializados de ayuda en la toma de decisiones. Por lo anterior, no se evidenció una tendencia de aplicación de algún instrumento metodológico y, por lo tanto, no se tomó en cuenta este tipo de métodos para la selección de la metodología en el presente estudio.

De la revisión de artículos se pre seleccionaron las tres metodologías que registraron la mayor aplicación para la selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales, estas fueron: i) modelos conceptuales, ii) proceso de jerarquía analítica (AHP) y iii) técnica de preferencia por similitud a la solución ideal (TOPSIS). Con base en los artículos seleccionados de cada una de las metodologías predefinidas se procedió con la caracterización de cada una de ellas, el detalle de dicha información puede ser revisado en el Apéndice B.

Por mencionar algunas generalidades de las metodologías seleccionadas, Bernal y Peña (2003) consideran los modelos conceptuales como parte de un sistema experto que facilita el proceso de toma de decisiones, en este caso para la selección de tecnologías. Dichos modelos son desarrollados, generalmente, en diagramas de bloque constituidos por fases secuenciales,

cada una de ellas sustentada en tablas de decisiones con soluciones en función de los parámetros evaluados.

Otra de las técnicas seleccionadas es el proceso de jerarquía analítica (AHP), este enfoque fue propuesto por primera vez por Saaty (1977) para seleccionar la alternativa de tratamiento de aguas residuales más adecuada. Este método está basado en una comparación por pares de las alternativas, tenidas en cuenta con un conjunto de criterios definidos por el tomador de decisiones. Asimismo, ha sido utilizado para ponderar varios criterios al evaluar la sostenibilidad de tecnologías determinadas (Arroyo y Molinos, 2018). Además, es considerada como una técnica de análisis de criterios múltiples que utiliza comparaciones por pares, siendo esta una de los métodos más usados y conocidos, basada en una escala numérica que permite sistematizar y estructurar el proceso de toma de decisiones (Henrique *et al.*, 2019).

El proceso de jerarquía analítica está diseñado para estructurar escenarios afectados por múltiples factores independientes, los cuales pueden ser organizados en diversos niveles jerárquicos; su análisis se basa en tres principios fundamentales: i) descomponer el problema; ii) comparar por pares las diversas alternativas formando matrices; iii) sintetizar las preferencias (Bottero *et al.*, 2011).

Una posible restricción del método es la mayor dificultad que se encuentra en el uso de entradas numéricas de criterios cuantitativos para formar puntajes en AHP, por lo que se debe conciliar los atributos tanto cuantitativos como cualitativos en matrices basadas en la escala de Saaty (Kalbar *et al.*, 2013). Asimismo, Kalbar *et al.* (2012) consideran como limitación que el número máximo de alternativas debe mantenerse en menos de siete para lograr coherencia en las preferencias, lo que hace viable el uso de otros métodos cuando se cuenta con un gran número de alternativas.

Por último, la técnica de preferencia de orden por similitud con las soluciones ideales (TOPSIS), considerado como un enfoque compensatorio fue propuesto por Hwang y Yoon (1981). Kalbar *et al.* (2012) exponen que el método utiliza una perspectiva basada en la distancia para cuantificar y comparar las preferencias de las alternativas sobre el conjunto de atributos. Con su propio algoritmo matemático lógico arroja como resultado una clasificación directa que se puede representar gráficamente. De igual forma, es importante tener en cuenta que es uno de los métodos más utilizados para los casos en que la información sobre los atributos está disponible en una escala cardinal.

Kim *et al.* (1997) plantean como ventajas de TOPSIS: i) la representación lógica de la elección humana, con valores escalares que permiten determinar las mejores y peores alternativas; ii) los algoritmos matemáticos simples de aplicar; iii) la presentación de resultados para todas las alternativas evaluadas con respecto a los atributos que permiten la revisión de estos gráficamente.

Con base en la revisión conceptual de cada uno de los métodos preseleccionados, enfocada en aspectos relacionados en la tabla 2, se definió que la técnica más aplicable al presente estudio era TOPSIS. La selección de la metodología contempló criterios entre los que se analizaron, inicialmente la aplicación de la misma en procesos de selección de tecnologías de tratamiento de agua residual y análisis de problemáticas ambientales. Por otra parte, TOPSIS no presenta restricción respecto al número de alternativas y criterios a evaluar, como sucede con AHP (i.e. para la garantía de la veracidad de los resultados limita este valor a siete alternativas). Asimismo, la evaluación de diversidad de alternativas en modelos conceptuales hace más complicado el proceso de selección y tomas de decisiones por la complejidad de este.

Otro criterio tomado en cuenta para esta selección, está relacionado con los datos existentes a evaluar, dado que se contará con información tanto cuantitativa como cualitativa, los modelos conceptuales y AHP restringen en cierta medida su evaluación, generando pasos adicionales para la transformación de información y posterior aplicación del método.

La complejidad de aplicación del método hizo parte fundamental para la selección de la técnica, sin embargo, esta no se consideró como restricción para ninguno de los modelos evaluados, pues para cada uno de ellos se considera que su implementación es poco compleja y no requiere de esfuerzos adicionales para el cumplimiento del objetivo.

La tabla 2 expone una síntesis cualitativa de los parámetros tomados en cuenta metodológicamente para la selección de la metodología aplicar en el presente estudio.

Tabla 2.

Descripción cualitativa métodos de análisis de decisión

	Datos a evaluar	Complejidad de aplicación	Restricciones del método
Modelos conceptuales	+	+	+
AHP	++	+	+
TOPSIS	+++	+	++

Nota: +++: más favorable ++: calificación intermedia +: menos favorable

4.3. Propuesta de sistema tecnológico para el tratamiento de aguas residuales caso Mensulí

4.3.1 Descripción del caso Mensulí. La zona de estudio corresponde a un sector de expansión del municipio de Floridablanca, Santander (Ver figura 14).



Figura 14. Localización geográfica Floridablanca, Santander. Adaptado de Alcaldía Municipal Floridablanca. (2016). Plan de desarrollo Municipal Floridablanca 2016-2019. Alcaldía Municipal Floridablanca, 196.

Mensulí es un desarrollo urbanístico a ser construido en dicha zona suburbana de la localidad. Ubicado entre la autopista Bucaramanga – Bogotá, sentido Piedecuesta – Floridablanca en la vereda la Guyana (Ver figura 15).



Figura 15. Ubicación caso Mensulí. Adaptado de Google maps (2018). Recuperado de <https://www.google.com/maps/@7.0442092,-73.0756457,598m/data=!3m1!1e3>

El área objeto del proyecto no es recorrida por una fuente hídrica de caudal importante, sin embargo, por el sector sur-oriental es surcado por la fuente hídrica denominada Quebrada Mensulí, la cual tiene definida su área de aislamiento.

La cuenca de la Quebrada Mensulí hace parte de la microcuenca del Río Frio, que conforma la subcuenca del Río de Oro, que es parte a su vez de la cuenca del Río Lebrija. La Quebrada Mensulí posee un caudal promedio de 0.4 L/s, generalmente las aguas de esta son utilizadas para actividades agropecuarias y para abastecimiento de acueductos veredales en la zona alta de la cuenca. El mayor grado de afectación se presenta en la zona media de la cuenca en donde es usada como sitio de vertimiento de aguas residuales de tipo doméstico e industrial (Arismendi, 2008).

La zona en estudio no cuenta con redes de alcantarillado externas para el transporte de agua residual hacia la planta de tratamiento del municipio. Es oportuno mencionar el proyecto de construcción del interceptor sanitario Mensulí – Aranzoque, planteado para permitir el desarrollo urbanístico de áreas en la zona sur y sur – occidental del casco urbano de Floridablanca, el cual conduciría los caudales sanitarios generados a la planta de tratamiento de aguas residuales identificada como PTAR Río Frio (Empresas públicas de alcantarillado de Santander, 2017).

A pesar de lo mencionado anteriormente, y según lo expuesto a lo largo del presente trabajo, el mismo pretende evaluar alternativas de tratamiento diferentes a las convencionales, con el fin de revisar tendencias crecientes para la gestión urbana del agua que estudien : i) contribuciones a minimizar el transporte de aguas residuales a sistemas de tratamiento centralizado, lo cual implique tamaños y longitudes de colectores considerables, y altas complejidades en el funcionamiento de sus sistemas de tratamiento; ii) posibles disminuciones en impactos ambientales ocasionados a los sistemas hídricos del sector, por los menores vertimientos de aguas residuales generados; y iii) la aplicación de prácticas de reúso de efluentes en actividades definidas como riego de zonas verdes.

Según estimaciones, el proyecto albergará alrededor de 6.560 habitantes, lo cual corresponde a 1.640 unidades habitacionales. La figura 16 muestra la distribución socioeconómica proyectada para el sector, en ella se observa que el estrato socioeconómico menos representativo será el tres (3) y los estratos cuatro (4) y cinco (5) contarán con el 39% y 41% de la población proyectada, respectivamente. Dado que no se cuenta con información de consumos y/o mediciones en la localidad, se realizaron las estimaciones del caudal de aguas residuales, tomando parámetros de referencia descritos en la resolución 0330 del 8 de junio de 2017. Con base en lo anterior, se proyecta un caudal diario de aproximadamente 9.1 L/s.

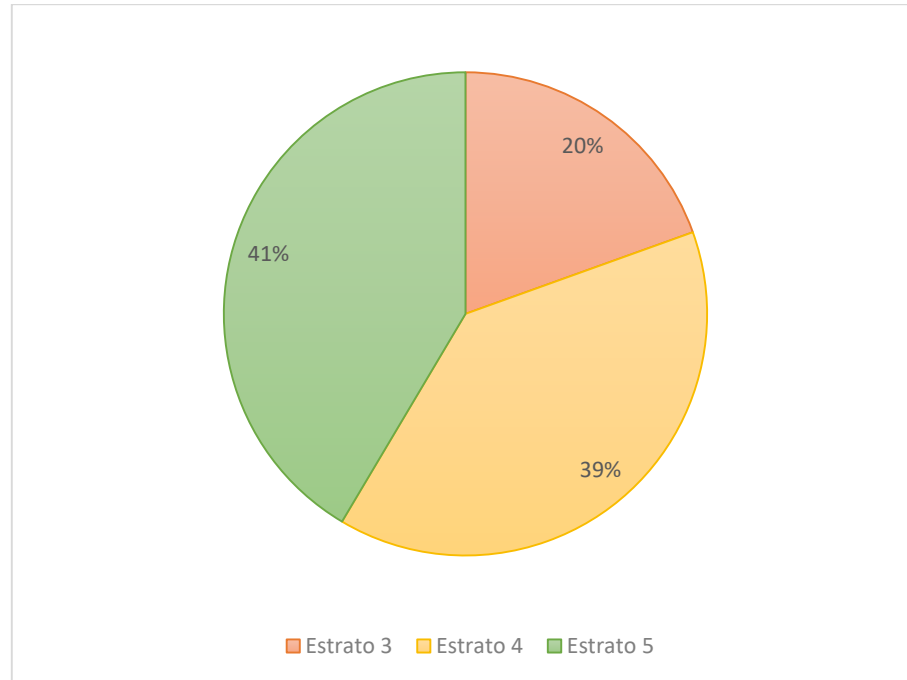


Figura 16. Distribución condiciones socioeconómicas población proyectada caso Mensulí

Se resalta nuevamente que el proyecto se encuentra en fase inicial de planeación, por lo cual no existen caracterizaciones de agua residual por tratar. Sin embargo, con base en el conocimiento previo de las condiciones socioeconómicas del sector y las características del proyecto a desarrollar se definió asumir concentraciones típicas de aguas residuales domésticas, a fin de que se pueda tomar como referencia para cualquier tipo de cálculo requerido en el desarrollo del presente estudio.

4.3.2 Criterios e indicadores seleccionados para la evaluación de alternativas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales. Para el presente estudio fueron seleccionados 13 indicadores distribuidos en criterios ambientales, económicos, técnicos y sociales que permitan seleccionar las diferentes alternativas de tratamiento de aguas residuales

consideradas en este trabajo. En la tabla 3 son relacionados dichos indicadores junto con su respectiva unidad de calificación.

Tabla 3.

Criterios e indicadores usados para la selección de tecnología de tratamiento de aguas residuales caso Mensulí

Criterio	Indicador	Unidad	Fuente de estimación
Ambiental	1. Generación de lodos	L / hab* año	(Sperling, 2007) (Romero Rojas, 2004)
	2. Requerimientos de energía para tratamiento	kW / hab * año	(Sperling, 2007) (Rosa <i>et al.</i> , 2018) (Singh & Kazmi, 2018)
	3. Requerimiento de área para implantación del sistema	m ² / año	(Sperling, 2007)
Económico	4. Costos de inversión	\$ / hab	(Sperling, 2007)
	5. Costos de operación y mantenimiento	\$ / hab*año	(Sperling, 2007)
Técnico	6. Simplicidad de operación y manejo	Cualitativo	Autor con base en revisión de literatura
	7. Eficiencia remoción materia orgánica (DBO ₅)	%	Autor con base en revisión de literatura
	8. Eficiencia remoción sólidos suspendidos (SS)	%	Autor con base en revisión de literatura
	9. Eficiencia remoción Nitrógeno (N)	%	Autor con base en revisión de literatura
	10. Eficiencia remoción coliformes fecales	(UND log)	Autor con base en revisión de literatura
Social	11. Potencial de generación de olores	Cualitativo	Autor con base en revisión de literatura
	12. Potencial de generación de ruidos	Cualitativo	Autor con base en revisión de literatura
	13. Impacto visual ante la implantación del sistema	Cualitativo	Autor con base en revisión de literatura

Cabe señalar, que las estimaciones de los indicadores tienen diversas fuentes de determinación; principalmente, corresponde a información secundaria proveniente de revisiones de literatura y de diferentes experiencias reportadas por diversidad de autores.

Los indicadores ambientales y económicos fueron cuantificados con base en la experiencia reportada por Sperling (2007), quien caracterizó los principales sistemas de tratamiento de aguas

residuales instalados en Brasil para el año 2002. Dicha experiencia consiste en un reporte en el cual se incluyeron aspectos como requerimientos de terreno, requerimientos de energía de instalación y operación, generación de lodos que requieren tratamiento y disposición, y costos de operación y mantenimiento. La información fue calculada y reportada con base en los rangos de población típicos dentro de cada sistema de tratamiento, por lo cual para la presentación de resultados dicha función es multiplicada por el número de habitantes del caso de estudio (6.560 habitantes). Es importante mencionar que, para el caso del indicador de requerimiento de energía, específicamente, se tomaron valores de referencia de las experiencias reportadas por diversos autores. A saber, Singh y Kazmi (2018) realizaron un estudio socioeconómico de 16 sistemas de tratamiento descentralizados ubicados en India, entre ellos los biodiscos. Por otra parte, Rosa *et al.* (2018) reportaron el potencial energético de subproductos producidos en un sistema de tratamiento con tecnología UASB ubicado en la ciudad de Itabira, estado de Minas Gerais (Brasil).

La tabla 4 muestra los rangos expuestos por los diversos autores para la evaluación de los indicadores y alternativas de tratamiento aplicables en el presente estudio.

Tabla 4.

Funciones de referencia para calificación de indicadores ambientales y económicos

Tecnología de tratamiento	Generación de lodos (L/hab*año)	Requerimiento de energía (kW/hab*año)	Requerimiento de área m²/hab	Costos de inversión USD/hab	Costos de operación USD/hab*año
Tanque séptico	15 - 35	0	0.03 - 0.05	12 - 20	0.5 - 1
Filtro anaerobio	25 - 50	0	0.2 - 0.35	30 - 50	2.5 - 4
UASB	10 - 35	7 – 15 *	0.03 - 0.1	12 - 20	1.0 1.5
Laguna anaerobia	30 - 60	0	1.2 - 2.0	12 - 30	0.8 - 1.5
Lodos activados	35 - 90	18 - 26	0.12 - 0.25	40 - 65	4.0 - 8.0
SBR	40 - 105	20 - 35	0.12 - 0.25	35 - 50	4.0 - 8.0
Zanjas de oxidación	35 - 90	15 - 22	0.12 - 0.25	45 - 70	4.0 - 9.0
Filtro percolador	35 - 80	1 – 7 **	0.15 - 0.3	50 - 60	4.0 - 6.0
Biodiscos	20 - 75	10 – 15 ***	0.1 0.2	50 - 60	4.0 - 6.0
Humedal subsuperficial de flujo horizontal	0 - 10	0	3.0 - 5.0	20 - 30	- 1.5
Laguna facultativa	15 - 30	0	2.0 - 4.0	15 - 30	0.8 - 1.5
Filtro de membranas	40 - 100	18 - 26	0.15 - 0.3	50 - 75	6.0 - 10.0
Laguna de maduración	0 - 10	0	3.0 - 5.0	10 - 20	1.0 - 2.0

Nota: Adaptado de Sperling, M. Von. (2007). Biological Wastewater Treatment Series Volume

1:Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal (Aptara Inc). London: IWA Publishing.

*Adaptado de Rosa, A. P., Chernicharo, C. A. L., Lobato, L. C. S., Silva, R. V, Padilha, R. F., & Borges,

J. M. (2018). Assessing the potential of renewable energy sources (biogas and sludge) in a full-scale

UASB-based treatment plant. Renewable Energy, 124, 21–26.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.025>. **Adaptado de Romero Rojas, J. A. (2004). Tratamiento

de Aguas Residuales Teoría y principios de diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería. ***Adaptado de Singh, N. K., & Kazmi, A. A. (2018).

Performance and Cost Analysis of Decentralized Wastewater Treatment Plants in Northern India: Case

Study. Water Research, 9.

Respecto a los indicadores de costos reportados por Sperling (2007) es importante tener en cuenta que dicha información fue presentada monetariamente en dólares americanos, para lo cual, en el presente ejercicio se convirtieron en pesos colombianos con la tasa representativa del mercado promedio del año 2002 reportada en \$ 2506,55; por otro lado, no se realizó la proyección de costos al presente año dado que los índices económicos afectarían en igual situación a cada una de las tecnologías consideradas, por ende los resultados globales no tendrían diferencias particulares.

En relación a los indicadores de tipo cualitativo fueron expresados en términos numéricos entre 1.0 y 5.0, siendo 1.0 la menor calificación y 5.0 la mayor calificación aplicable en cada indicador evaluado; a saber: i) para el indicador de simplicidad de operación, un resultado de 5.0 estaría relacionado con una alternativa de tratamiento de baja complejidad en operación; y, ii) para los indicadores de generación de olores, generación de ruido e impacto visual, calificaciones de 1.0 significarían un bajo potencial de impacto.

Para el caso de los indicadores incluidos en los criterios técnicos, conviene hacer mención, que su calificación fue determinada con ayuda de la caracterización realizada a las tecnologías de tratamiento de aguas residuales seleccionadas, para lo cual se revisaron diversos autores y se asignaron las respectivas calificaciones según lo validado en los documentos científicos. La tabla 5 muestra rangos de referencias de porcentajes de eficiencia para la remoción de diferentes contaminantes de las alternativas de tratamiento tomados en cuenta para el presente estudio, los cuales pueden ser sustentados con la información descrita en el Apéndice A.

Tabla 5.

Rangos de referencia eficiencia de remoción de contaminantes

Tecnología de tratamiento	Eficiencia remoción DBO₅ (%)	Eficiencia remoción sólidos suspendidos (%)	Eficiencia remoción Nitrógeno (%)	Eficiencia remoción coliformes fecales (Logs)
Tanque séptico	30-35	55-65	<30	<1
Filtro anaerobio	50-55	60-80	<60	1-2
UASB	60-75	65-80	<60	1-2
Laguna anaerobia	60 - 75	60 - 75	<60	1-2
Lodos activados	85-93	87-93	<60	1-2
SBR	90-97	87-93	<60	1-2
Zanjas de oxidación	85-93	87-93	>75	1-2
Filtro percolador	85-93	87-93	<60	1-2
Biodiscos	88-95	87-93	<60	1-2
Humedal subsuperficial de flujo horizontal	80-90	87-93	<60	3-4
Laguna facultativa	75 - 85	70 -80	<60	1-2
Filtro de membranas	93-98	93-97	<60	3-5
Laguna de maduración	10 - 30	10 - 30	50 - 65	3 - 5

Nota. Adaptado de Sperling, M. Von. (2007). Biological Wastewater Treatment Series Volume

1:Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal (Aptara Inc). London: IWA Publishing.

Las tablas 6, 7 y 8 muestran los puntajes de los indicadores obtenidos según la descripción realizada anteriormente, para cada una de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales seleccionadas en el presente caso de estudio.

Tabla 6.

Indicadores y puntuaciones utilizadas para la selección de tecnología de tratamiento de aguas residuales

- Nivel primario

Indicador	Tanque séptico	Filtro anaerobio	UASB	Laguna anaerobia
* Generación de lodos (L / hab * año)	131.200	164.000	111.520	196.800
* Requerimiento de energía operación (kW / hab * año)	0	0	55.760	0
* Requerimiento área (m ² /hab)	262,4	1.607,2	426,4	7.872
* Costos de inversión (\$/hab)	\$ 263.087.488	\$ 493.289.040	\$ 328.859.360	\$ 197.315.616
* Costos de operación y mantenimiento (\$/hab*año)	\$ 12.332.226	\$ 41.107.420	\$ 20.553.710	\$ 13.154.374
** Simplicidad de operación y manejo	5	4	3	5
** Eficiencia remoción DBO ₅ (%)	30	50	70	65
** Eficiencia remoción SS (%)	55	60	65	65
** Eficiencia remoción N (%)	20	30	50	50
** Eficiencia remoción coliformes fecales (und LOG)	0	1	1	1
*** Potencial de generación de olores	3	3	3	4
*** Potencial de generación de ruidos	1	1	1	1
*** Impacto visual implantación del sistema	2	2	4	2

Nota: * Criterios ambientales y económicos referenciar tabla 4. ** Criterios técnicos referenciar tabla 5.

*** Criterios sociales escala de 1 a 5, donde 1 indica menor potencial de ocurrencia

Tabla 7.

Indicadores y puntuaciones utilizadas para la selección de tecnología de tratamiento de aguas residuales

- Nivel secundario

Indicador	Lodos activados	SBR	Zanja de oxidación	Filtro percolador	Biodiscos	Laguna facultativa
* Generación de lodos (L / hab * año)	524.800	459.200	393.600	393.600	295.200	131.200
* Requerimiento de energía operación (kW / hab * año)	131.200	164.000	124.640	13.120	85.280	0
* Requerimiento área (m ² /hab)	1.180,8	787,2	1.312	1377,6	852,8	16.400
* Costos de inversión (\$/hab)	863.255.820	\$ 698.826.140	\$ 953.692.144	\$ 871.477.304	\$ 822.148.400	\$ 263.087.488
* Costos de operación y mantenimiento (\$/hab*año)	98.657.808	\$ 82.214.840	\$ 115.100.776	\$ 73.993.356	\$ 65.771.872	\$ 16.442.968
** Simplicidad de operación y manejo	2	4	2	4	3	5
** Eficiencia remoción DBO (%)	85	90	88	85	90	80
** Eficiencia remoción SS (%)	89	87	88	87	88	70
** Eficiencia remoción N (%)	40	50	80	50	50	50
** Eficiencia remoción coliformes fecales (und LOG)	1	1	2	1	1	1
*** Potencial de generación de olores	4	2	3	3	2	2
*** Potencial de generación de ruidos	4	3	4	2	3	1
*** Impacto visual implantación del sistema	5	4	5	4	3	2

Nota: *Criterios ambientales y económicos referenciar tabla 4. **Criterios técnicos referenciar tabla 5.

***Criterios sociales escala de 1 a 5, donde 1 indica menor potencial de ocurrencia

Tabla 8.

Indicadores y puntuaciones utilizadas para la selección de tecnología de tratamiento de aguas residuales

- Nivel terciario

Indicador	Humedal subsuperficial de flujo horizontal	Filtro de membranas	Laguna de maduración
* Generación de lodos (L / hab * año)	39.360	262.400	26.240
* Requerimiento de energía operación (kW / hab * año)	0	144.320	0
* Requerimiento área (m ² /hab)	26.240	1.443,2	19.680
* Costos de inversión (\$/hab)	\$ 411.074.200	\$ 986.578.080	\$ 328.859.360
* Costos de operación y mantenimiento (\$/hab*año)	\$ 20.553.710	\$ 131.543.744	\$ 19.731.562
** Simplicidad de operación y manejo	4	2	5
** Eficiencia remoción DBO (%)	85	93	30
** Eficiencia remoción SS (%)	87	93	30
** Eficiencia remoción N (%)	50	60	65
** Eficiencia remoción coliformes fecales (und LOG)	4	3	5
*** Potencial de generación de olores	1	3	2
*** Potencial de generación de ruidos	1	3	1
*** Impacto visual implantación del sistema	1	3	3

Nota: *Criterios ambientales y económicos referenciar tabla 4. **Criterios técnicos referenciar tabla 5.

***Criterios sociales escala de 1 a 5, donde 1 indica menor potencial de ocurrencia

A continuación, se incluyen algunas observaciones relevantes de cada uno de los criterios seleccionados para su análisis en el presente estudio:

4.3.2.1 Criterios Ambientales. La inclusión de parámetros ambientales en la toma de decisiones ha sido reportado en la literatura científica, desde la perspectiva de evaluar la eficiencia ambiental de las tecnologías de tratamiento. Gómez *et al.* (2009) resaltan la importancia de incluir este criterio con el fin de enriquecer la aplicabilidad y disminuir los impactos ambientales generados por la operación de estos sistemas.

Uno de los indicadores incluidos es la generación y disposición de lodos; en este caso se evaluó este indicador considerando los posibles requerimientos de tratamientos y disposición de dichos lodos generados en la operación del sistema de tratamiento. En estos casos se hace necesaria la inclusión de un tren de manejo de lodos que brinde un tratamiento adecuado a estos subproductos con el fin de evitar mayores impactos en la posterior disposición de los mismos.

Al referirse a este aspecto Noyola *et al.* (2013) mencionan la poca importancia dada al manejo de lodos en plantas de tratamiento de aguas residuales pequeñas en ALC, usando prácticas inadecuadas de disposición (i.e. generalmente se disponen en el mar, en los drenajes, directamente en el suelo o en vertederos no controlados). Ese manejo contribuye en problemáticas medio ambientales como emisiones de CO₂ producidas durante el transporte al sitio de disposición final, y la generación de gases de efecto invernadero una vez puestos en el sitio de acopio.

Respecto a la energía requerida para el tratamiento de las aguas residuales, es importante tener en cuenta que dichos requisitos energéticos corresponden a la energía necesaria para efectuar los procesos en el tratamiento, incluido la demanda de algunas tecnologías para la distribución e ingreso del agua residual al sistema; para lo cual es deseable contar con los menores requerimientos posibles de energía en el sistema. Lo anterior se relaciona con los

costos de operación de la tecnología, pues el consumo de energía incide directamente en los costos fijos de operación, ya que sostiene la acción de los equipos de la planta de tratamiento.

El indicador de requerimiento y disponibilidad de área puede ser un limitante al momento de definir el sistema de tratamiento para un sector específico, dado que los requerimientos de esta están sujetos a variabilidad de factores, el tipo de sistema, temperatura, objetivos de calidad de tratamiento, y los altos costos del terreno, entre otros (Noyola *et al.*, 2013). Por otro lado, el enfoque evaluado aquí se relaciona con que la implantación del sistema tiene efectos sobre el uso y valor de la tierra, por tanto, es deseable tener una menor área para la instalación de este tipo de tecnologías.

4.3.2.2 Criterios Económicos. Con el fin de evaluar la sostenibilidad de la alternativa de tratamiento de aguas residuales se consideró la inclusión de los aspectos económicos. Se tuvieron en cuenta los costos de inversión, operación y mantenimiento para la valoración económica. Así mismo, se consideró que, dadas las limitaciones de recursos del ente encargado de la ejecución del proyecto, es deseable tener los menores costos asociados en el sistema. De otro lado, ha sido común que los proyectos con mayores inversiones iniciales sean excluidos sin tener en cuenta los costos operativos y de mantenimiento, por ello la vinculación de estos indicadores permite la evaluación integral de la alternativa tecnológica (Kalbar *et al.*, 2012b).

4.3.2.3 Criterios Técnicos. Los indicadores incluidos representan la eficiencia de operación del sistema y están enfocados en el cumplimiento de los objetivos de tratamiento. Por lo anterior, dichos parámetros se relacionan y priorizan con base en los requerimientos referenciados en la normatividad colombiana. Por un lado, se consideró la Resolución 0631 de

2015 que establece los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Por otra parte, la Resolución 1207 de 2014 adopta disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014), en la que permite usos de agua residual tratada para fines agrícolas, riegos de áreas verdes y jardines.

Por lo tanto, se consideraron indicadores como: i) la eficiencia de remoción de materia orgánica; ii) la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos; iii) la eficiencia de remoción de nitrógeno; iv) la eficiencia de remoción de contaminantes patógenos (i.e. evaluados con el indicador de coliformes fecales). La valoración de cada indicador es específica para las alternativas de tratamiento y se relaciona con las operaciones y procesos llevadas a cabo para la depuración de contaminantes en las aguas residuales. La remoción de concentración del nitrógeno, se consideró relevante ya que el contenido de nutrientes en el agua genera problemas de eutrofización, crecimiento de algas, consumo de oxígeno en cuerpos hídricos y toxicidad para organismos acuáticos (Mara, 2004), por lo que se hace necesaria la eliminación de dichos nutrientes antes de la descarga de las mismas a sistemas hídricos superficiales. Se consideró importante incluir la remoción de patógenos – coliformes fecales, dado que está relacionado con aspectos como el reúso de las aguas residuales tratadas.

El indicador de simplicidad de operación y manejo fue relacionado con la evaluación del sistema tomando en consideración: i) requisitos de personal especializado para el manejo de equipos, mantenimientos y demás; ii) requisitos de equipos automatizados con elevados requerimientos de mantenimiento; iii) probabilidad de fallas operacionales con impactos considerables en la calidad del efluente; y iv) sostenibilidad operativa del sistema.

4.3.2.4 Criterios Sociales. Criterios que toman en consideración aspectos de la comunidad beneficiada y partes interesadas del proyecto asociados a la aceptación y apropiación del sistema y las afectaciones que podría generar la tecnología a las comunidades aledañas.

Indicadores como el potencial de generación de olores, evalúan el correcto funcionamiento y operación del sistema de tratamiento implantado, su correcta ubicación e implantación respecto a la comunidad, lo anterior ayuda a disminuir las incidencias negativas del sistema a las zonas urbanizadas.

Otro indicador importante es el relacionado con la generación de ruidos, los cuales pueden ser por los equipos requeridos en la operación del sistema, para ello es importante tener en cuenta la ubicación de la planta, el sistema seleccionado y el mantenimiento de equipos con el fin de minimizar la generación de ruidos y lograr un sistema amigable con el medio ambiente.

La interacción del sistema con el paisaje es uno de los aspectos a tener en cuenta al momento de la implementación de un sistema, por ello la inclusión de este parámetro en la evaluación realizada, pues es importante tener en cuenta consideraciones arquitectónicas adecuadas, que permitan la generación de lugares agradables, entornos saludables en los que se presente la interacción de las partes interesadas y el sistema.

Otro tipo de indicadores son deseables para la selección de tecnología, tales como la valoración social de la tecnología, la disposición para actividades como el reúso y la capacidad y disponibilidad de los potenciales usuarios a pagar por el sistema. No obstante, no fueron considerados debido a que el proyecto habitacional aún no está desarrollado.

4.3.3 Planteamiento de escenarios para la toma de decisiones. Tal y como se ha comentado en el desarrollo del presente estudio, dado que las condiciones reales del caso de

estudio Mensulí no están totalmente definidas se hizo necesario el planteamiento de diversos escenarios que permitan evaluar diversos aspectos, lo cual a futuro permita a los encargados del proyecto la toma de decisiones de manera eficiente.

Se plantearon los diversos escenarios evaluando dos aspectos que se consideraron representativos a revisar en el presente estudio i) la disponibilidad de área para la implantación del sistema; y, ii) la disposición o uso del agua tratada, estos escenarios son mostrados en la tabla 9. Estos escenarios fueron considerados en el proceso de selección de las tecnologías de tratamiento.

Es importante tener en cuenta que evaluados los requisitos normativos, para el caso del reúso y acorde con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2014), y Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (2018) “las aguas grises y aguas residuales tratadas pueden utilizarse para usos diferentes al consumo humano según la normatividad vigente de usos permitidos”, asimismo, “en los casos de vertimientos a cuerpos de agua, las aguas residuales domésticas deben dar cumplimiento a lo establecido en la Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible”.

Tabla 9.

Planteamiento de escenarios aplicación metodología selección tecnología de tratamiento caso Mensulí

Escenario	Disponibilidad área	Disposición efluente
I	Restringida	Cuerpo de agua superficial
II	Restringida	Reúso riego zonas verdes
III	Sin restricción	Cuerpo de agua superficial
IV	Sin restricción	Reúso riego zonas verdes

Obsérvese como los escenarios I y III representaban la situación en la que el efluente del sistema de tratamiento sería descargado a cuerpos de agua superficiales cercanos, pero se

presenta restricción (escenario I) o no (escenario III) de disponibilidad de área para la implantación del sistema. En los escenarios II y IV el agua tratada sería usada para el riego de jardines y zonas verdes en el condominio, pero se presenta restricción (escenario II) o no (escenario IV) de disponibilidad de área.

Cabe señalar que para la ponderación y asignación de niveles de importancia de cada uno de los indicadores en sus respectivos escenarios de aplicación, se tomaron en consideración dos aspectos, por un lado, Hwang y Yoon (1981) caracterizan los indicadores de dos formas: i) como atributos de beneficio, en los cuales cuanto mayor sea la calificación del atributo, más se prefiere; ii) como atributos de costo, en cuanto mayor sea el valor del atributo, menos se prefiere.

La tabla 10 muestra cada uno de los escenarios con sus respectivas ponderaciones de importancia definidas para la aplicación en el presente caso de estudio, así como la caracterización de cada uno de los indicadores. Cabe señalar las diferencias evidenciadas en la categorización del indicador ambiental de requerimiento de área, respecto a esto, tal y como se muestra en los escenarios de análisis con restricción de área, I y II, este indicador se tipifica como costo, dado que a mayor área requerida menor será su preferencia. Para el caso de los escenarios III y IV con disponibilidad de área sin ningún tipo de restricción, estos indicadores se evaluaron como beneficio, pues si bien es cierto que una tecnología no es más beneficiosa por el hecho de requerir mayor área para la implantación, el algoritmo matemático usado por TOPSIS con este tipo de atributo hace que el resultado no sea afectado negativamente en el proceso de calificación.

Tabla 10.

Escenarios de aplicación de metodología y respectivas ponderaciones asignadas

Indicador	Escenario I		Escenario II		Escenario III		Escenario IV	
	Peso	Criterio	Peso	Criterio	Peso	Criterio	Peso	Criterio
1. Generación de lodos	6	Costo	6	Costo	6	Costo	6	Costo
2. Requerimientos de energía para operación	8	Costo	8	Costo	8	Costo	8	Costo
3. Requerimiento de área para implantación del sistema	15	Costo	15	Costo	10	Beneficio	10	Beneficio
4. Costos de inversión	13	Costo	13	Costo	16	Costo	14	Costo
5. Costos de operación y mantenimiento	13	Costo	13	Costo	16	Costo	14	Costo
6. Simplicidad de operación y manejo	5	Beneficio	5	Beneficio	5	Beneficio	5	Beneficio
7. Eficiencia remoción DBO ₅	7	Beneficio	7	Beneficio	7	Beneficio	7	Beneficio
8. Eficiencia remoción SS	7	Beneficio	7	Beneficio	7	Beneficio	7	Beneficio
9. Eficiencia remoción	4	Beneficio	7	Costo	5	Beneficio	7	Costo
10. Eficiencia remoción coliformes fecales	4	Beneficio	7	Beneficio	5	Beneficio	7	Beneficio
11. potencial de generación de olores	6	Costo	4	Costo	5	Costo	5	Costo
12. Potencial de generación de ruidos	6	Costo	4	Costo	5	Costo	5	Costo
13. Impacto visual ante la implantación del sistema	6	Costo	4	Costo	5	Costo	5	Costo

Consecuentemente, el caso del indicador técnico de eficiencia de remoción de Nitrógeno, se planteó como beneficio en los escenarios I y III, dado que una mayor remoción de dicho contaminante, la alternativa sería más beneficiosa para el caso. Lo anterior garantizaría efluentes con menores concentraciones del nutriente descargadas a cuerpos de agua superficiales, lo que podría causar problemas de eutrofización, entre otros. Cosa distinta sucede con los escenarios II y IV, para los cuales el efluente sería usado con fines agrícolas, relacionados con riego de jardines y zonas verdes. Este se tipificó como atributo de costo pues una mayor remoción significa que el efluente tendrá menor concentración de nutrientes, los cuales son considerados como un beneficio para las plantas.

4.3.4 Aplicación de metodología y propuesta de alternativa tecnológica para el tratamiento de aguas residuales. A continuación, se exponen los resultados obtenidos de la aplicación de la técnica de orden de preferencia por similitud a la solución ideal, para la selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales en el caso Mensulí. Los resultados son mostrados por niveles de tratamiento en cada uno de los escenarios de aplicación descritos anteriormente.

4.3.4.1 Resultados de aplicación TOPSIS nivel de tratamiento primario. En las tablas 11 y 12 se encuentran las medidas de separación para cada una de las alternativas evaluadas en el nivel de tratamiento primario, para los escenarios I y III; en los que el efluente es vertido a cuerpos de agua superficial, con restricción de área para implantación del sistema y sin límite de terreno, respectivamente.

Se evidencia cómo en relación a los sistemas de tratamiento evaluados para el nivel primario, el tanque séptico fue ponderado como la tecnología de tratamiento más aplicable en casos en el que el efluente sea descargado a cuerpos de agua superficiales y se cuente con limitantes de terreno para la implantación del sistema. Autores como Jorsaraei *et al.* (2014) resaltan el proceso como el más simple, antiguo y aplicable en sitio, sin embargo, la eficiencia de tratamiento es baja debido a los bajos tiempos de retención de lodos.

En segunda instancia, se evidencia la preferencia del sistema UASB, para lo cual se puede resaltar el reporte de diversos autores respecto a la ventaja del sistema al ser compacto y utilizar áreas pequeñas (Suarez *et al.*, 2011). Asimismo, es considerada la tecnología más factible en el desarrollo de contextos urbanos debido a su alta eliminación orgánica, simplicidad, bajo costos de inversión, operación y mantenimiento (Bdour *et al.*, 2009).

Un aspecto a resaltar de los resultados descritos en la tabla 11 es la diferencia registrada entre la aplicabilidad del UASB comparado con el tanque séptico, para lo cual se tiene que el tanque séptico presenta mayores ventajas en términos de requerimientos de área, costos de inversión, operación y mantenimiento, así como, menos impactos de tipo social. En contraparte, el UASB presenta excelentes resultados en sus componentes técnicos por ende su mayor preferencia para el presente estudio.

Por otro lado, la tabla 12 muestra el escenario en el que la disponibilidad de área no es considerada como restricción y el efluente continúa siendo descargado a superficies de agua, la tecnología más adecuada según el estudio son las lagunas anaerobias, en este caso es importante resaltar las innumerables investigaciones aplicadas en el campo del uso de lagunas de estabilización como tratamiento de aguas residuales en países en desarrollo; esta tecnología presenta altas eficiencias en la reducción de microorganismos patógenos y compuestos orgánicos siendo además de bajos requerimientos de operación y mantenimiento (Mara, 2004).

Se puede decir que las grandes diferencias de los resultados de las lagunas respecto de las otras tecnologías evaluadas pueden corresponder a: i) el escenario evaluado no considera ningún tipo de restricciones para la implantación del sistema, por lo cual los altos requerimientos de área de las lagunas anaerobias no inciden negativamente en la puntuación global; y ii) las lagunas anaerobias presentan también unas de las mejores calificaciones en sus indicadores técnicos y económicos, correspondiente a más del 50% de ponderación total, indiferente del escenario.

Por otro lado, respecto al filtro anaerobio de lecho de roca se observa que el sistema indiferentemente del escenario de aplicación, no es considerada como el sistema más adecuado para el tratamiento de aguas residuales en el presente estudio. Sin embargo, es importante

resaltar a pesar de ser un sistema viable en términos ambientales, con bajos requerimientos de área y poca generación de lodos, su eficiencia técnica no es muy alta comparada con los sistemas evaluados, además de requerir medio de soporte, en este caso rocas, puede significar un incremento en los costos de operación y mantenimiento.

Tabla 11.

Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento primario – Escenario I

Indicadores Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	D _i ⁺	D _i ⁻	R _i ⁺	Rango
Tanque séptico	0.026	0.000	0.005	0.050	0.032	0.029	0.019	0.031	0.010	0.000	0.027	0.030	0.023	0.040	0.187	0.824	1
Filtro anaerobio	0.032	0.000	0.030	0.095	0.108	0.023	0.031	0.034	0.015	0.023	0.027	0.030	0.023	0.100	0.146	0.594	3
UASB	0.022	0.080	0.008	0.063	0.054	0.017	0.044	0.037	0.025	0.023	0.027	0.030	0.045	0.090	0.158	0.636	2
Laguna anaerobia	0.038	0.000	0.147	0.038	0.035	0.029	0.041	0.037	0.025	0.023	0.037	0.030	0.023	0.143	0.130	0.476	4
PIS	0.022	0.000	0.005	0.038	0.032	0.029	0.044	0.037	0.025	0.023	0.027	0.030	0.023				
NIS	0.038	0.080	0.147	0.095	0.108	0.017	0.019	0.031	0.010	0.000	0.037	0.030	0.045				

Tabla 12.

Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento primario – Escenario III

Indicadores Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	D _i ⁺	D _i ⁻	R _i ⁺	Rango
Tanque séptico	0.026	0.000	0.003	0.062	0.040	0.029	0.019	0.031	0.013	0.000	0.023	0.025	0.019	0.105	0.137	0.566	2
Filtro anaerobio	0.032	0.000	0.020	0.116	0.133	0.023	0.031	0.034	0.019	0.029	0.023	0.025	0.019	0.142	0.091	0.390	4
UASB	0.022	0.080	0.005	0.078	0.067	0.017	0.044	0.037	0.031	0.029	0.023	0.025	0.038	0.131	0.090	0.408	3
Laguna anaerobia	0.038	0.000	0.098	0.047	0.043	0.029	0.041	0.037	0.031	0.029	0.030	0.025	0.019	0.019	0.175	0.903	1
PIS	0.022	0.000	0.098	0.047	0.040	0.029	0.044	0.037	0.031	0.029	0.023	0.025	0.019				
NIS	0.038	0.080	0.003	0.116	0.133	0.017	0.019	0.031	0.013	0.000	0.030	0.025	0.038				

En relación a los resultados obtenidos para la aplicación en el escenario II, mostrados en la tabla 13, es conveniente mencionar que la organización de preferencias es semejante a lo reportado para el escenario I. En estos la tecnología considerada como más adecuada es el tanque séptico seguido por el UASB. Es conveniente recordar que la diferencia registrada entre estos dos escenarios corresponde a el uso del agua tratada, una con vertimiento a fuentes de agua superficiales y el otro usado para actividades agrícolas. Por lo anterior la única variación en la aplicación de estos escenarios correspondía a las ponderaciones en los criterios técnicos y sociales, para el caso técnico la relevancia en la eliminación del nitrógeno si el efluente fuese vertido a una fuente hídrica, sin embargo, en esta aplicación no se obtuvo diferencias dado que las remociones de nitrógeno de los sistemas evaluados son bajas y semejantes entre ellas.

Caso similar se registra en la tabla 14 con los resultados del escenario IV, estos a su vez, comparados con el escenario III, la tecnología más adecuada continúa siendo la laguna anaerobia y las otras alternativas presentan alta variabilidad respecto de ella. Anteriormente, se dejó registro de los mayores porcentajes de importancia relacionados con los criterios económicos y técnicos, para los cuales el sistema natural presenta respuestas muy valiosas en su tratamiento, permitiendo de esta forma la obtención de excelentes resultados al evaluar su aplicabilidad en los diversos contextos.

Tabla 13.

Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento primario – Escenario II

Indicadores Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	D _i ⁺	D _i ⁻	R _i ⁺	Rango
Tanque séptico	0.026	0.000	0.005	0.050	0.032	0.029	0.019	0.031	0.018	0.000	0.018	0.020	0.015	0.050	0.188	0.791	1
Filtro anaerobio	0.032	0.000	0.030	0.095	0.108	0.023	0.031	0.034	0.026	0.040	0.018	0.020	0.015	0.100	0.150	0.600	3
UASB	0.022	0.080	0.008	0.063	0.054	0.017	0.044	0.037	0.044	0.040	0.018	0.020	0.030	0.093	0.161	0.634	2
Laguna anaerobia	0.038	0.000	0.147	0.038	0.035	0.029	0.041	0.037	0.044	0.040	0.024	0.020	0.015	0.145	0.132	0.477	4
PIS	0.022	0.000	0.005	0.038	0.032	0.029	0.044	0.037	0.018	0.040	0.018	0.020	0.015				
NIS	0.038	0.080	0.147	0.095	0.108	0.017	0.019	0.031	0.044	0.000	0.024	0.020	0.030				

Tabla 14.

Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento primario – Escenario IV

Indicadores Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	D _i ⁺	D _i ⁻	R _i ⁺	Rango
Tanque séptico	0.026	0.000	0.003	0.054	0.035	0.029	0.019	0.031	0.018	0.000	0.023	0.025	0.019	0.107	0.129	0.548	2
Filtro anaerobio	0.032	0.000	0.020	0.102	0.117	0.023	0.031	0.034	0.026	0.040	0.023	0.025	0.019	0.130	0.096	0.426	3
UASB	0.022	0.080	0.005	0.068	0.058	0.017	0.044	0.037	0.044	0.040	0.023	0.025	0.038	0.132	0.085	0.391	4
Laguna anaerobia	0.038	0.000	0.098	0.041	0.037	0.029	0.041	0.037	0.044	0.040	0.030	0.025	0.019	0.032	0.136	0.808	1
PIS	0.022	0.000	0.098	0.041	0.035	0.029	0.044	0.037	0.018	0.040	0.023	0.025	0.019				
NIS	0.038	0.080	0.003	0.102	0.117	0.017	0.019	0.031	0.044	0.000	0.030	0.025	0.038				

4.3.4.2 Resultados de aplicación TOPSIS nivel de tratamiento secundario. Respecto de la selección de la tecnología para el nivel secundario, la tabla 15 muestra los resultados aplicables a zonas con restricción de área para la instalación del sistema y efluentes con propósito de vertido a superficies de agua superficial. En ella se evidencia, el alto rango de aplicabilidad que resulta en todas las alternativas evaluadas, siendo este liderado por biodiscos, seguido del tratamiento con filtro percolador. Respecto a los biodiscos, Li y Lu (2017) catalogan el sistema como ampliamente usado para tratar las aguas residuales en sistemas descentralizados, resaltando su facilidad en operación, flexibilidad, huella ambiental reducida, entre otros.

Si bien es cierto, que, según lo analizado en este escenario, los biodiscos no son la alternativa con menor requerimiento de área, sin embargo, su superioridad en puntajes de aspectos ambientales (i.e. generación de lodos y requerimiento de área), económicos y técnicos, marcan la pequeña diferencia resultante entre los sistemas de biodiscos, filtro percolador y SBR.

Pasando al escenario de sin restricción de área y descarga a cuerpo de agua superficial, la tabla 16_muestra como la alternativa más adecuada el sistema de humedales subsuperficial de flujo horizontal, nótese el alto rango diferencial entre este y la técnica de lodos activados, para lo que se puede mencionar, que esta gran diferencia corresponde a que más del 80% de los indicadores presentan mejores resultados en los humedales subsuperficiales de flujo horizontal y solo indicadores como el requerimiento de área y la remoción de sólidos son más eficientes en el sistema de lodos activados.

Por otra parte, validando las diferencias registradas en este escenario III, entre los humedales subsuperficiales de flujo horizontal y las lagunas facultativas, la mayor aplicabilidad de dichos humedales está relacionada con que solo los indicadores de requisito de área y costos de inversión, operación y mantenimiento presentan mejores resultados en las lagunas facultativas,

es importante recalcar que la diferencia entre estos dos no es representativa dado que los indicadores referenciados anteriormente corresponden a casi el 50% de relevancia en su aplicación.

Asimismo, los escenarios que contemplan el reúso del recurso para fines agrícolas II y IV muestran los mismos resultados de la alternativa tecnológica más adecuada para el tratamiento de aguas residuales, biodiscos y humedales subsuperficiales de flujo horizontal, respectivamente.

No obstante, las tablas 17 y 18 muestran una leve variación en las tecnologías menos aplicables, esto a causa de las consideraciones respecto del indicador técnico de remoción de nitrógeno, para el cual es importante su menor remoción en el escenario de reúso de efluente; por ello el escenario II y IV ubica a los humedales subsuperficiales de flujo horizontal y zanjas de oxidación, respectivamente, como las tecnologías menos apropiadas dado que ellas son las que registran las mayores eficiencias de remoción de dichos contaminantes en el nivel de tratamiento estudiado, según lo reportado en la literatura.

A propósito de la aplicabilidad de las variantes del sistema de lodos activados, los resultados muestran como alternativa más adecuada en los cuatro escenarios estudiados el reactor biológico secuencial SBR, esto dado que alrededor del 70% de los indicadores evaluados favorece su aplicabilidad, entre ellos: i) aspectos ambientales como requerimientos de energía y área; ii) indicadores de costos de inversión, operación y mantenimiento; iii) criterios técnicos como la simplicidad de operación y las eficiencias de remoción de materia orgánica en el sistema; iv) aspectos sociales en general.

Tabla 15.

Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento secundario – Escenario I

Indicadores Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	D _i ⁺	D _i ⁻	R _i ⁺	Rango
Lodos activados	0.033	0.041	0.006	0.057	0.064	0.011	0.026	0.028	0.011	0.008	0.035	0.032	0.031	0.099	0.122	0.552	4
SBR	0.029	0.051	0.004	0.047	0.053	0.021	0.028	0.027	0.014	0.008	0.018	0.024	0.024	0.085	0.128	0.601	3
Humedales subsuperficiales de flujo horizontal	0.002	0.000	0.127	0.027	0.013	0.021	0.026	0.027	0.014	0.032	0.009	0.008	0.006	0.124	0.106	0.460	7
Zanja de oxidación	0.025	0.038	0.006	0.063	0.075	0.011	0.027	0.027	0.022	0.016	0.026	0.032	0.031	0.101	0.123	0.548	5
Filtro percolador	0.025	0.004	0.007	0.058	0.048	0.021	0.026	0.027	0.014	0.008	0.026	0.016	0.024	0.070	0.134	0.656	2
Biodiscos	0.019	0.026	0.004	0.055	0.043	0.016	0.028	0.027	0.014	0.008	0.018	0.024	0.018	0.068	0.132	0.661	1
Laguna facultativa	0.008	0.000	0.079	0.018	0.011	0.026	0.025	0.022	0.014	0.008	0.018	0.008	0.012	0.081	0.070	0.463	6
PIS	0.002	0.000	0.004	0.018	0.011	0.026	0.028	0.028	0.022	0.032	0.009	0.008	0.006				
NIS	0.033	0.051	0.127	0.063	0.075	0.011	0.025	0.022	0.011	0.008	0.035	0.032	0.031				

Tabla 16.

Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento secundario – Escenario III

Indicadores Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	D _i ⁺	D _i ⁻	R _i ⁺	Rango
Lodos activados	0.033	0.041	0.004	0.071	0.079	0.011	0.026	0.028	0.014	0.010	0.029	0.027	0.026	0.136	0.019	0.124	7
SBR	0.029	0.051	0.003	0.057	0.066	0.021	0.028	0.027	0.017	0.010	0.015	0.020	0.020	0.125	0.040	0.242	5
Humedales subsuperficiales de flujo horizontal	0.002	0.000	0.085	0.034	0.016	0.021	0.026	0.027	0.017	0.040	0.007	0.007	0.005	0.017	0.142	0.892	1
Zanja de oxidación	0.025	0.038	0.004	0.078	0.092	0.011	0.027	0.027	0.028	0.020	0.022	0.027	0.026	0.140	0.025	0.150	6
Filtro percolador	0.025	0.004	0.004	0.071	0.059	0.021	0.026	0.027	0.017	0.010	0.022	0.013	0.020	0.114	0.061	0.350	3
Biodiscos	0.019	0.026	0.003	0.067	0.052	0.016	0.028	0.027	0.017	0.010	0.015	0.020	0.015	0.113	0.054	0.323	4
Laguna facultativa	0.008	0.000	0.053	0.022	0.013	0.026	0.025	0.022	0.017	0.010	0.015	0.007	0.010	0.047	0.109	0.700	2
PIS	0.002	0.000	0.085	0.022	0.013	0.026	0.028	0.028	0.028	0.040	0.007	0.007	0.005				
NIS	0.033	0.051	0.003	0.078	0.092	0.011	0.025	0.022	0.014	0.010	0.029	0.027	0.026				

Tabla 17.
Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento secundario – Escenario II

Indicadores Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	D _i ⁺	D _i ⁻	R _i ⁺	Rango
Lodos activados	0.033	0.041	0.006	0.057	0.064	0.011	0.026	0.028	0.020	0.014	0.023	0.021	0.020	0.099	0.124	0.555	4
SBR	0.029	0.051	0.004	0.047	0.053	0.021	0.028	0.027	0.024	0.014	0.012	0.016	0.016	0.090	0.128	0.588	3
Humedales subsuperficiales de flujo horizontal	0.002	0.000	0.127	0.027	0.013	0.021	0.026	0.027	0.024	0.056	0.006	0.005	0.004	0.124	0.107	0.465	7
Zanja de oxidación	0.025	0.038	0.006	0.063	0.075	0.011	0.027	0.027	0.039	0.028	0.018	0.021	0.020	0.101	0.122	0.547	5
Filtro percolador	0.025	0.004	0.007	0.058	0.048	0.021	0.026	0.027	0.024	0.014	0.018	0.011	0.016	0.075	0.134	0.640	2
Biodiscos	0.019	0.026	0.004	0.055	0.043	0.016	0.028	0.027	0.024	0.014	0.012	0.016	0.012	0.074	0.132	0.641	1
Laguna facultativa	0.008	0.000	0.079	0.018	0.011	0.026	0.025	0.022	0.024	0.014	0.012	0.005	0.008	0.087	0.081	0.482	6
PIS	0.002	0.000	0.004	0.018	0.011	0.026	0.028	0.028	0.020	0.056	0.006	0.005	0.004				
NIS	0.033	0.051	0.127	0.063	0.075	0.011	0.025	0.022	0.039	0.014	0.023	0.021	0.020				

Tabla 18.
Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento secundario – Escenario IV

Indicadores Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	D _i ⁺	D _i ⁻	R _i ⁺	Rango
Lodos activados	0.033	0.041	0.004	0.062	0.069	0.011	0.026	0.028	0.020	0.014	0.029	0.027	0.026	0.132	0.026	0.166	6
SBR	0.029	0.051	0.003	0.050	0.057	0.021	0.028	0.027	0.024	0.014	0.015	0.020	0.020	0.124	0.039	0.240	5
Humedales subsuperficiales de flujo horizontal	0.002	0.000	0.085	0.029	0.014	0.021	0.026	0.027	0.024	0.056	0.007	0.007	0.005	0.013	0.140	0.913	1
Zanja de oxidación	0.025	0.038	0.004	0.068	0.080	0.011	0.027	0.027	0.039	0.028	0.022	0.027	0.026	0.134	0.022	0.143	7
Filtro percolador	0.025	0.004	0.004	0.062	0.052	0.021	0.026	0.027	0.024	0.014	0.022	0.013	0.020	0.113	0.061	0.351	3
Biodiscos	0.019	0.026	0.003	0.059	0.046	0.016	0.028	0.027	0.024	0.014	0.015	0.020	0.015	0.113	0.052	0.317	4
Laguna facultativa	0.008	0.000	0.053	0.019	0.011	0.026	0.025	0.022	0.024	0.014	0.015	0.007	0.010	0.054	0.113	0.675	2
PIS	0.002	0.000	0.085	0.019	0.011	0.026	0.028	0.028	0.020	0.056	0.007	0.007	0.005				
NIS	0.033	0.051	0.003	0.068	0.080	0.011	0.025	0.022	0.039	0.014	0.029	0.027	0.026				

4.3.4.3 Resultados de aplicación TOPSIS nivel de tratamiento terciario. En la tabla 19 se muestran los resultados obtenidos de la aplicación del método de análisis de decisión para el escenario de sistema con restricción de área para implantación y descarga de efluente a cuerpo de agua superficial. Se observa la preferencia de las lagunas de maduración como sistema de tratamiento terciario, seguido de los sistemas de humedales subsuperficiales de flujo horizontal.

Si bien es cierto que las lagunas de maduración requieren grandes extensiones de área, y el escenario evaluado contempla restricción de terreno para la implantación del sistema, es importante recalcar, que los resultados acá mostrados están evidenciando, la prevalencia de los aspectos económicos, ambientales (i.e. generación de lodos y requerimientos de energía), y sociales del sistema, comparado con el uso de reactores integrados con membranas, los cuales son los que requieren menor extensión de terreno de los sistemas evaluados.

Correlacionando los resultados obtenidos con los reportes literarios, Bernal y Peña (2003) consideran los métodos naturales como una opción sostenible para las pequeñas y medianas comunidades, dada su alta eficiencia, bajos costos de operación, mantenimiento y fácil construcción.

Apréciase que en los resultados mostrados en la tabla 20, las ponderaciones y organización de las preferencias de las alternativas de tratamiento de aguas residuales, en el escenario de restricción de área y efluente contemplado para el reúso de aguas residuales, no varían respecto de los resultados mostrados anteriormente. Para lo anterior es importante recalcar que si bien es cierto que ambos sistemas, lagunas de maduración y humedales subsuperficiales de flujo horizontal, presentan excelentes características de adaptabilidad al medio, en estos casos, la pequeña diferencia resultante entre estos sistemas corresponde a un menor requerimiento de área de las lagunas de maduración respecto a los humedales subsuperficiales de flujo horizontal, para

lo cual Mara (2004) menciona que los humedales construidos requieren más terreno que el uso de lagunas de estabilización, además de grandes cantidades de grava.

Por otra parte, resultados mostrados en las tablas 21 y 22, escenarios sin restricción de área y descargas a cuerpos de agua y efluente para reúso del recurso para fines agrícolas, respectivamente, se evidencia, que el orden de preferencias varía liderando los humedales subsuperficiales de flujo horizontal, seguido de las lagunas de estabilización.

En términos generales, se recalca que los humedales subsuperficiales de flujo horizontal presentan ventajas sobre las lagunas de maduración en criterios sociales y remociones de materia orgánica. Caso contrario sucede con las lagunas de maduración, las cuales presentan mejores características relacionadas con bajos requerimientos de área, costos de inversión, operación y mantenimiento y remociones de nutrientes y contaminantes patógenos.

Contrariamente, los resultados de los cuatro escenarios muestran la poca preferencia del uso de membranas para el nivel de tratamiento terciario, comparado con los sistemas de tratamiento natural evaluados. Cabe señalar, que el sistema de membranas presenta las mejores condiciones y resultados en la evaluación de criterios técnicos y requerimientos de área, no obstante, sus ponderaciones y calificaciones en temas económicos, sociales y ambientales son quienes evalúan y ubican las membranas como la alternativa menos preferible en los contextos estudiados.

Tabla 19.

Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento terciario – Escenario I

Indicadores Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	D _i ⁺	D _i ⁻	R _i ⁺	Rango
Humedal subsuperficial de Flujo horizontal	0.009	0.000	0.120	0.048	0.020	0.030	0.046	0.047	0.020	0.023	0.016	0.018	0.014	0.114	0.173	0.602	2
Membranas	0.059	0.080	0.007	0.115	0.127	0.015	0.050	0.050	0.024	0.017	0.048	0.054	0.041	0.175	0.123	0.414	3
Laguna maduración	0.006	0.000	0.090	0.038	0.019	0.037	0.016	0.016	0.026	0.028	0.032	0.018	0.041	0.101	0.173	0.631	1
PIS	0.006	0.000	0.007	0.038	0.019	0.037	0.050	0.050	0.026	0.028	0.016	0.018	0.014				
NIS	0.059	0.080	0.120	0.115	0.127	0.015	0.016	0.016	0.020	0.017	0.048	0.054	0.041				

Tabla 20.

Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento terciario – Escenario II

Indicadores Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	D _i ⁺	D _i ⁻	R _i ⁺	Rango
Humedal subsuperficial de Flujo horizontal	0.009	0.000	0.120	0.048	0.020	0.030	0.046	0.047	0.034	0.040	0.011	0.012	0.009	0.115	0.169	0.596	2
Membranas	0.059	0.080	0.007	0.115	0.127	0.015	0.050	0.050	0.041	0.030	0.032	0.036	0.028	0.170	0.123	0.419	3
Laguna maduración	0.006	0.000	0.090	0.038	0.019	0.037	0.016	0.016	0.045	0.049	0.021	0.012	0.028	0.099	0.171	0.633	1
PIS	0.006	0.000	0.007	0.038	0.019	0.037	0.050	0.050	0.034	0.049	0.011	0.012	0.009				
NIS	0.059	0.080	0.120	0.115	0.127	0.015	0.016	0.016	0.045	0.030	0.032	0.036	0.028				

Tabla 21.

Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento terciario – Escenario III

Indicadores Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	D _i ⁺	D _i ⁻	R _i ⁺	Rango
Humedal subsuperficial de Flujo horizontal	0.009	0.000	0.080	0.059	0.024	0.030	0.046	0.047	0.025	0.028	0.013	0.015	0.011	0.018	0.207	0.919	1
Membranas	0.059	0.080	0.004	0.141	0.156	0.015	0.050	0.050	0.030	0.021	0.040	0.045	0.034	0.210	0.048	0.186	3
Laguna maduración	0.006	0.000	0.060	0.047	0.023	0.037	0.016	0.016	0.032	0.035	0.027	0.015	0.034	0.058	0.202	0.776	2
PIS	0.006	0.000	0.080	0.047	0.023	0.037	0.050	0.050	0.032	0.035	0.013	0.015	0.011				
NIS	0.059	0.080	0.004	0.141	0.156	0.015	0.016	0.016	0.025	0.021	0.040	0.045	0.034				

Tabla 22.

Puntuaciones ponderadas normalizadas de los indicadores para alternativas tecnológicas de tratamiento terciario – Escenario IV

Indicadores Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	D _i ⁺	D _i ⁻	R _i ⁺	Rango
Humedal subsuperficial de Flujo horizontal	0.009	0.000	0.080	0.051	0.021	0.030	0.046	0.047	0.034	0.040	0.013	0.015	0.011	0.017	0.194	0.918	1
Membranas	0.059	0.080	0.004	0.124	0.137	0.015	0.050	0.050	0.041	0.030	0.040	0.045	0.034	0.196	0.048	0.197	3
Laguna maduración	0.006	0.000	0.060	0.041	0.021	0.037	0.016	0.016	0.045	0.049	0.027	0.015	0.034	0.059	0.186	0.759	2
PIS	0.006	0.000	0.080	0.041	0.021	0.037	0.050	0.050	0.034	0.049	0.013	0.015	0.011				
NIS	0.059	0.080	0.004	0.124	0.137	0.015	0.016	0.016	0.045	0.030	0.040	0.045	0.034				

De los resultados mostrados para cada escenario se obtiene la conformación de los siguientes trenes de tratamiento mostrados en la figura 17. En ellos se evidencia que no hay diferencia en los trenes de tratamiento para los escenarios en el que el efluente sea vertido a un sistema de agua superficial o sea reutilizado para fines agrícolas, tal y como se comentó en los resultados planteados anteriormente, la diferenciación en estos escenarios es reflejada en el orden de los sistemas evaluados, sin embargo, la tecnología considerada más aplicable no varía.

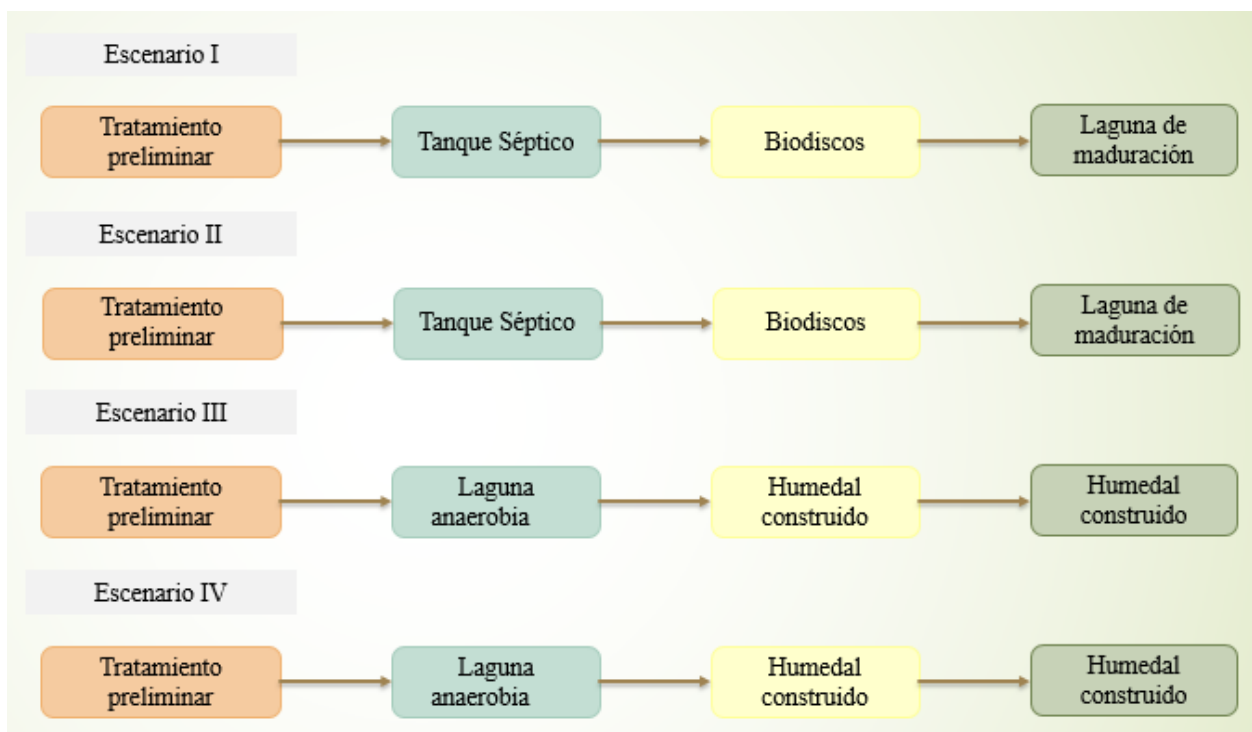


Figura 17. Trenes de tratamiento resultantes Caso Mensulí

Respecto al tren de tratamiento conformado en los escenarios I y II es importante resaltar la importancia de instalar el tanque séptico como tratamiento primario, pues acorde con lo reportado por Romero (2004) el sistema de biodiscos prefiere tratar efluentes primarios para prevenir depósitos de sedimentos en los reactores y de esta forma afectar la operación y

eficiencia del sistema. Por otra parte, la necesidad de llevar el tratamiento hasta la implantación de las lagunas de maduración estará acorde con los requisitos planteados en los objetivos de tratamiento, los cuales serán específicos al momento de evaluar las condiciones reales del sector.

En el caso de los escenarios III y IV, se resalta la necesidad de ubicar las lagunas anaerobias antecediendo los humedales subsuperficiales de flujo horizontal, pues en este caso, la laguna tendría la función principal de retener la mayor cantidad de sólidos en suspensión y estabilizar las concentraciones de sólidos orgánicos del agua residual. Asimismo, está claro, que para conseguir una calidad óptima del agua tratada se hace necesaria la ubicación de sistemas secundarios, en este caso los humedales construidos.

Tal y como se evidencia, se cuenta con un sistema de humedales construido en serie, para lo cual es importante mencionar que si se cuenta con experiencias reportadas de estos sistemas híbridos en los que se diseñan varios compartimientos para propiciar diferentes tipos de reacciones y procesos, con el fin de conseguir una mayor eficiencia en la reducción de contaminantes (Rabat, 2016). Asimismo, según lo reportado por Alarcón et al. (2018) se resalta que la eficiencia global del sistema se incrementaría, pues se generarían condiciones específicas, físicas y microbiológicas en cada uno de los humedales construidos para el tratamiento propuesto.

Por lo anterior, se menciona nuevamente que la implantación del sistema hasta su nivel de tratamiento terciario, dependerá de los objetivos de tratamiento planteados en los requisitos del sistema.

En los resultados se evidencia la preferencia de sistemas de tratamiento natural para contextos descentralizados y sin restricciones de áreas para la implementación del sistema, lo anterior dado a sus grandes ventajas de costos de inversión, operación y mantenimiento, también su

aceptabilidad social y rendimientos técnicos. En relación a los escenarios de aplicación que involucran criterios de reúso de aguas residuales para fines de riegos de áreas verdes cabe destacar que existe una relación más directa entre la reutilización de aguas residuales y las alternativas de tratamiento natural como sistemas de lagunas de estabilización y humedales construidos, principalmente (Bernal, 2018).

También, Lutterbeck *et al.* (2018) reportan que los humedales construidos se encuentran en las tecnologías de gran potencial de aplicación con procesos eficientes para el tratamiento de aguas residuales en zonas descentralizadas en países en desarrollo

Por otro lado, las diversas experiencias revisadas a lo largo del desarrollo del presente trabajo reportaron la aplicación de los sistemas resultantes, por mencionar, González y Bernal, (2014) reportaron los sistemas naturales, reactores UASB y biodiscos como alternativas tecnológicas potenciales en el tratamiento de aguas residuales realizado en escenarios descentralizados.

5. Conclusiones

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales más usados en países en desarrollo para zonas suburbanas, en desarrollo y descentralizadas, según la revisión realizada, corresponden en su mayoría a niveles de tratamiento secundario y terciario, reflejándose allí, los nuevos enfoques de las alternativas de tratamiento que aportan al desarrollo de las comunidades, a la disminución de las presiones ejercidas al medio ambiente y mejoras en la calidad ambiental de los cuerpos hídricos receptores, mediante el uso eficiente de los recursos y la adopción de técnicas de reúso de aguas residuales tratadas. Por otra parte, es importante recalcar que la menor aplicabilidad de los sistemas de tratamiento en nivel primario puede estar relacionada por la menor disponibilidad y diversidad de opciones tecnológicas en estos contextos.

Se evidenció la mayor preferencia de sistemas de tratamiento de aguas residuales que involucran procesos de tipo biológico, así como, los sistemas de tratamiento naturales los cuales presentan comportamientos adecuados en aspectos técnicos, sociales, ambientales y económicos.

Las alternativas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales domésticas más usados en sectores en desarrollo y pequeñas poblaciones abarcan los siguientes sistemas distribuidos en los diferentes niveles de tratamiento así: i) en nivel de tratamiento primario tanques sépticos, filtros anaerobios, proceso ascensional de manto de lodos anaerobio y laguna anaerobia; ii) en nivel de tratamiento secundario filtros percoladores, biodiscos, lodos activados y sus variantes zanjas de oxidación y reactor biológico secuencial SBR, humedales construidos y lagunas

facultativas; iii) en nivel de tratamiento terciario sistemas que incluyan la filtración con membranas, humedales y lagunas de maduración.

Dada la diversidad de alternativas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales y su aplicabilidad en cada uno de los contextos específicos, se resalta la importancia de elaborar estudios enfocados en la búsqueda de la mejor opción, que involucren enfoques alternativos alineados con las políticas nacionales e internacionales para la gestión y manejo de recursos hídricos mediante la evaluación de aspectos particulares del sector y de los sistemas con el fin de seleccionar e instalar sistemas sostenibles, ambientalmente amigables y capaces de reducir impactos asociados al medio ambiente.

El uso de herramientas que involucren la evaluación y aplicación de métodos de análisis de decisión, con diversidad de factores analizados para la selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales en diversos contextos, permite realizar una evaluación integral de las diversas alternativas aplicables y de esta forma seleccionar la tecnología más apropiada en el contexto requerido, buscando que esta sea económicamente asequible, ambiental y técnicamente sostenible y socialmente aceptable.

Se registró similitud en los resultados de aplicabilidad de herramientas de análisis de decisión en la selección de alternativas de tratamiento de aguas residuales en contextos específicos. Los más usados a saber: i) los métodos de criterios múltiples entre los que se encuentran principalmente, la técnica de preferencia por similitud a la solución ideal y el proceso de jerarquía analítica; ii) los métodos de sistema de apoyo a las decisiones que involucran diversas técnicas y software para el desarrollo de la herramienta; y finalmente, iii) los métodos de toma de objetivos únicos con los diversos modelos conceptuales como instrumentos para análisis y evaluación de tecnologías de tratamiento en contextos similares a los reportados.

Se determinó por simplicidad de aplicación, requerimiento y uso de diferentes tipos de información (cualitativa y cuantitativa) y restricciones del método, la técnica de preferencia por similitud a la solución ideal (TOPSIS) como la más aplicable para el desarrollo del presente estudio.

El tren de tratamiento más adecuado para el contexto evaluado en el escenario de zonas que presenten restricción de tierra y el efluente sea descargado a superficies de agua o sean reusados con fines de riegos de jardines y zonas verdes, consiste en un tratamiento preliminar, seguido de tanque séptico, sistema de biodiscos y lagunas de maduración.

Para el caso de zonas que presente disponibilidad de terreno para implantación del sistema sin ningún tipo de restricción y efluentes descargados a superficies de agua o reusados con fines de riegos de jardines y zonas verdes, el tren de tratamiento recomendado está conformado por un tratamiento preliminar, seguido de laguna anaerobia y un sistema de humedales subsuperficiales de flujo horizontal.

6. Recomendaciones

Es importante recalcar que la información aquí presentada, tal y como se mencionó en el desarrollo del presente estudio, corresponde a datos netamente secundarios extraídos de referencias bibliográficas y experiencias específicas de diversos autores.

Dicho lo anterior, es de gran importancia que una vez se conozcan los detalles particulares del caso Mensulí el estudio sea validado; a fin de que las ponderaciones de importancia usadas para la aplicación de la metodología sean verificadas con ayuda de expertos, lo cual permita enfocar y pulir el estudio con las necesidades particulares del mismo. Asimismo, es indispensable contar con información de costos reales, al igual que validar las calificaciones de los criterios técnicos, sociales y ambientales de cada una de las tecnologías con la ayuda de expertos.

Por otra parte, es importante evaluar la opción de incluir otros indicadores, entre ellos: i) sociales que consideren la participación de la comunidad en la selección de la alternativa tecnológica, dado que puede contribuir a que la intervención a realizar sea exitosa, aumentando el sentido de responsabilidad de las partes interesadas en el proyecto; y ii) ambientales que involucren todos los requerimientos energéticos asociados a los sistemas de tratamiento, incluido el bombeo de las aguas residuales en los casos requeridos, con el fin de hacer el estudio global de sostenibilidad del sistema.

Referencias Bibliográficas

- Alarcón Herrera, M. T., Martínez, F. Z., Lara-Borrero, J. A., & Vidal, G. (2018). *Humedales de tratamiento : alternativa de tratamiento de aguas residuales aplicable en América latina*. (M. T. Alarcón Herrera, F. Z. Martínez, J. A. Lara-Borrero, & G. Vidal, Eds.) (Pontificia). Bogotá, D.C: Pontificia Universidad Javeriana.
- Alcaldía Municipal Floridablanca. (2016). Plan de desarrollo Municipal Floridablanca 2016-2019. *Alcaldía Municipal Floridablanca*, 196.
- Arismendi Henao, E. A. (2008). *Diagnóstico ambiental de la cuenca de la Quebrada Mensulí con miras a su recuperación y manejo*. Universidad industrial de santander.
- Arroyo, P., & Molinos-Senante, M. (2018). Selecting appropriate wastewater treatment technologies using a choosing-by-advantages approach. *Science of the Total Environment*, 625, 819–827. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.331>
- Bdour, A. N., Hamdi, M. R., & Tarawneh, Z. (2009). Perspectives on sustainable wastewater treatment technologies and reuse options in the urban areas of the Mediterranean region. *Desalination*, 237(1–3), 162–174. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.12.030>
- Bernal, D. (2018). A conceptual model for decentralized municipal wastewater management. *Water Practice and Technology*, 13(1), 134–142.
- Bernal, D., Cardona, D. ., Galvis, A., & Peña, M. . (2003). Guia de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales. *Seminario*

Internacional Sobre Métodos Naturales Para El Tratamiento de Aguas Residuales, 19–27.

Bernal, D., & Restrepo Tarquino, I. (2012). Key issues for decentralization wastewater treatment in municipal. *ResearchGate*, 12.

Bottero, M., Comino, E., & Riggio, V. (2011). Environmental Modelling & Software Application of the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems. *Environmental Modelling and Software*, 26(10), 1211–1224. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.04.002>

Castillo, A., Cheali, P., Gómez, V., Comas, J., Poch, M., & Sin, G. (2016). An integrated knowledge-based and optimization tool for the sustainable selection of wastewater treatment process concepts. *Environmental Modelling and Software*, 177–192.

Comisión nacional del agua. (2015a). *Manual de Agua Potable , Alcantarillado y Saneamiento Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Lagunas de estabilización*. (Subdirección general del agua potable drenaje y saneamiento, Ed.) (Subdirecci). México, D.F: Subdirección general del agua potable drenaje y saneamiento.

Comisión nacional del agua. (2015b). *Manual de agua potable , alcantarillado y saneamiento Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Lodos Activados*. (Subdirección general de agua potable drenaje y saneamiento, Ed.) (Subdirecci). México, D.F: Subdirección general del agua potable drenaje y saneamiento.

Daigger, G. T. (2009). Evolving Urban Water and Residuals Management Paradigms : Water Reclamation and Reuse , Decentralization , and Resource Recovery, (August). <https://doi.org/10.2175/106143009X425898>

Diamantis, V., Eftaxias, A., Bundervoet, B., & Verstraete, W. (2014). Performance of the biosorptive activated sludge (BAS) as pre-treatment to UF for decentralized wastewater

reuse. *Bioresource Technology*, 156, 314–321.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.061>

Dotro, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., & Stein, O. (2017). *Biological wastewater treatment series Treatment wetlands*. (N. Techset, Ed.) (Vol. 7). Brazil: IWA Publishing.

Empresa pública de alcantarillado de Santander EMPAS. (2015). Plan estratégico 2016-2020. *Empas*, 109.

Empresa pública de alcantarillado de Santander EMPAS. (2017). *Construcción del sistema sanitario Mensuli Aranzoque en el sector comprendido entre la Quebrada Palmichal en la Universidad Pontificia Bolivariana y la PTAR Rio Frio*. Santander.

Fernandes, H., Jungles, M. K., Hoffmann, H., Antonio, R. V., & Costa, R. H. R. (2013). Full-scale sequencing batch reactor (SBR) for domestic wastewater: Performance and diversity of microbial communities. *Bioresource Technology*, 132, 262–268.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.027>

Gálvis, A., Cardona, D. ., & Bernal, D. . (2003). Modelo conceptual de selección de tecnología para el control de contaminación por aguas residuales domésticas en localidades Colombianas menores de 30.000 habitantes, SELTAR. *Universidad Del Valle/Instituto Cinara*, (c), 10. <https://doi.org/10.15713/ins.mmj.3>

Garfí, M., Flores, L., & Ferrer, I. (2017). Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities: Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. *Journal of Cleaner Production*, 161, 211–219.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.116>

Gil, J. A., Dorgeloh, E., van Lier, J. B., van der Graaf, J. H. J. M., & Prats, D. (2012). Start-up of decentralized MBRs. *Desalination*, 285, 324–335.

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.10.022>

- Gómez-López, M. D., Bayo, J., García-Cascales, M. S., & Angosto, J. M. (2009). Decision support in disinfection technologies for treated wastewater reuse. *Journal of Cleaner Production*, 17(16), 1504–1511. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.06.008>
- González, G., & Bernal, D. . (2014). *Caracterización de la oferta tecnológica para el tratamiento de las aguas residuales en esquemas descentralizados en zonas urbanas de Colombia*. Universidad del Valle.
- Han, C., Liu, J., Liang, H., Guo, X., & Li, L. (2013). An innovative integrated system utilizing solar energy as power for the treatment of decentralized wastewater. *Journal of Environmental Sciences*, 25(2), 274–279. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60034-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60034-5)
- Henrique, P., Santos, D., Miranda, S., Ornaghi, D., Anna, S., Henrique, C., ... Duarte, H. (2019). The analytic hierarchy process supporting decision making for sustainable development : An overview of applications. *Journal of Cleaner Production*, 212, 119–138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.270>
- Huang, I. B., Keisler, J., & Linkov, I. (2011). Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of the Total Environment*, The, 409(19), 3578–3594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.022>
- Huang, J. ., Poh, K. ., & Ang, B. . (1995). Decision analysis in energy and environmental modeling. *Energy*, 20(9), 843–855.
- Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making methods and applications A state of the art survey*. (M. Beckmann & H. . Künzi, Eds.) (Vol. 1). New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Instituto de hidrologia meteorología y estudios ambientales. (2018). *Reporte de avance del*

estudio nacional del agua 2018. Bogotá, D.C.

- Jorsaraei, A., Gougol, M., & Van Lier, J. B. (2014). A cost effective method for decentralized sewage treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(6), 815–821. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2013.04.001>
- Kalbar, P. P., Karmakar, S., & Asolekar, S. R. (2012a). Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach. *Journal of Environmental Management*, 158–169.
- Kalbar, P. P., Karmakar, S., & Asolekar, S. R. (2012b). Technology assessment for wastewater treatment using multiple-attribute decision-making. *Technology in Society*, 295–302.
- Kalbar, P. P., Karmakar, S., & Asolekar, S. R. (2013). The influence of expert opinions on the selection of wastewater treatment alternatives: A group decision-making approach. *Journal of Environmental Management*, 128, 844–851. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.034>
- Kim, G., Parkb, C. S., & Yoonc, K. P. (1997). production economics Identifying investment opportunities systems with comparative-integrated for advanced manufacturing performance measurement. *International Journal of Production Economics*, 50, 23–33.
- Li, J., & Lu, X. (2017). Performance and microbial diversity in a low-energy ANF-WDSRBC system for the post-treatment of decentralized domestic wastewater. *Water (Switzerland)*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/w9050330>
- Li, Y.-H., Li, H.-B., Sun, T.-H., & Wang, X. (2011). Effects of hydraulic loading rate on pollutants removal by a deep subsurface wastewater infiltration system. *Ecological Engineering*, 37(9), 1425–1429. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.03.029>
- Liang, H., Gao, M., Liu, J., Wei, Y., & Guo, X. (2010). A novel integrated step-feed biofilm

- process for the treatment of decentralized domestic wastewater in rural areas of China. *Journal of Environmental Sciences*, 22(3), 321–327. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60111-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60111-X)
- Libralato, G., Volpi Ghirardini, A., & Avezzi, F. (2012). To centralise or to decentralise: An overview of the most recent trends in wastewater treatment management. *Journal of Environmental Management*, 61–68.
- Lizarazo Becerra, J. M., & Orjuela Gutiérrez, M. I. (2013). *Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Luo, W., Yang, C., He, H., Zeng, G., Yan, S., & Cheng, Y. (2014). Novel two-stage vertical flow biofilter system for efficient treatment of decentralized domestic wastewater. *Ecological Engineering*, 64, 415–423. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.01.011>
- Lutterbeck, C. A., Kist, L. T., Lopez, D. R., Zerwes, F. V., & Machado, Ê. L. (2017). Life cycle assessment of integrated wastewater treatment systems with constructed wetlands in rural areas. *Journal of Cleaner Production*, 148, 527–536. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.024>
- Lutterbeck, C. A., Zerwes, F. V., Radtke, J. F., Köhler, A., Kist, L. T., & Machado, Ê. L. (2018). Integrated system with constructed wetlands for the treatment of domestic wastewaters generated at a rural property – Evaluation of general parameters ecotoxicity and cytogenetics. *Ecological Engineering*, 115, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.01.004>
- Machado, A. I., Beretta, M., Fragoso, R., & Duarte, E. (2017). Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil. *Journal of Environmental Management*, 187, 560–570. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.015>

- Mara, D. (1997). *Design Manual for Waste Stabilization Ponds in India*. England: Lagoon Technology International Ltd.
- Mara, D. D. (2004). *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*. London: Earthscan.
- Mara, D., & Pearson, H. (1998). *Design Manual for Waste Stabilization Ponds in Mediterranean Countries*. England: Lagoon Technology International Ltd.
- Metcalf & Eddy INC. (1995). *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización*. (A. García Brage, Ed.). Madrid, España: McGraw-Hill.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Bogotá, D.C.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Resolución 1207 de 2014 “Uso de aguas residuales tratadas.”* Bogotá, D.C.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 0631 - 17 Marzo 2015 “Parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.”* Bogotá, D.C.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 0330 “Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico - RAS.”* Bogotá, D.C.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2018). *Resolución número 0844 de 2018 “Ras rural.”* Bogotá, D.C.
- Molinos-Senante, M., Gómez, T., Garrido-Baserba, M., Caballero, R., & Sala-Garrido, R. (2014). Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: A composite indicator approach. *Science of the Total Environment*, 607–617.
- Nhapi, I. (2004). A framework for the decentralised management of wastewater in Zimbabwe,

29, 1265–1273. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.09.031>

Noyola, A., Morgan-sagastume, J. M., & Guereca, L. P. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales: guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. México, D.F: Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Ingeniería.

Organización de Naciones Unidas. (2016). *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Santiago.

Organización de Naciones Unidas ONU. (2018). Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible. Retrieved August 20, 2018, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Organización de Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura. (2018). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos 2018 Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. París.

Organización mundial de la salud. (2018). Seguimiento y datos empíricos sobre agua y saneamiento. Retrieved from https://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/es/

Pang, H., Wu, P., Li, L., Yu, Z., & Zhang, Z. (2017). Effective biodegradation of organic matter and biogas reuse in a novel integrated modular anaerobic system for rural wastewater treatment: A pilot case study. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 119, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.04.006>

Phuntsho, S., Shon, H. K., Vigneswaran, S., & Kandasamy, J. (2008). Wastewater stabilization ponds (WSP) for wastewater treatment. *Encyclopedia of Life Support Systems, II*, 12.

Rabat Blázquez, J. (2016). *Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración*. (A. Trapote Jaume, Ed.). Universidad de Alicante.

- Rashidi, H., GhaffarianHoseini, A., GhaffarianHoseini, A., Nik Sulaiman, N. M., Tookey, J., & Hashim, N. A. (2015). Application of wastewater treatment in sustainable design of green built environments: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 845–856. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.104>
- Romero Rojas, J. A. (2004). *Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y principios de diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingenieria*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingenieria.
- Rosa, A. P., Chernicharo, C. A. L., Lobato, L. C. S., Silva, R. V, Padilha, R. F., & Borges, J. M. (2018). Assessing the potential of renewable energy sources (biogas and sludge) in a full-scale UASB-based treatment plant. *Renewable Energy*, 124, 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.025>
- Santasmassas, C., Rovira, M., Clarens, F., & Valderrama, C. (2013). Grey water reclamation by decentralized MBR prototype. *Resources, Conservation and Recycling*, 72, 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.004>
- Singh, N. K., & Kazmi, A. A. (2018). Performance and Cost Analysis of Decentralized Wastewater Treatment Plants in Northern India: Case Study. *Water Research*, 9.
- Sperling, M. Von. (2007). *Biological Wastewater Treatment Series Volume 1:Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal* (Aptara Inc). London: IWA Publishing.
- Suarez Marmolejo, C. L. (2011). *Tratamiento de aguas residuales municipales en el valle del cauca*. Universidad del Valle.
- Suriyachan, C., Nitivattananon, V., & Amin, A. T. M. N. (2012). Potential of decentralized wastewater management for urban development: Case of Bangkok. *Habitat International*, 36(1), 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2011.06.001>
- Teh, X. Y., Poh, P. E., Gouwanda, D., & Chong, M. N. (2015). Decentralized light greywater

treatment using aerobic digestion and hydrogen peroxide disinfection for non-potable reuse.

Journal of Cleaner Production, 99, 305–311. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.015>

Wu, S., Austin, D., Liu, L., & Dong, R. (2011). Performance of integrated household constructed wetland for domestic wastewater treatment in rural areas. *Ecological Engineering*, 37(6), 948–954. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.02.002>

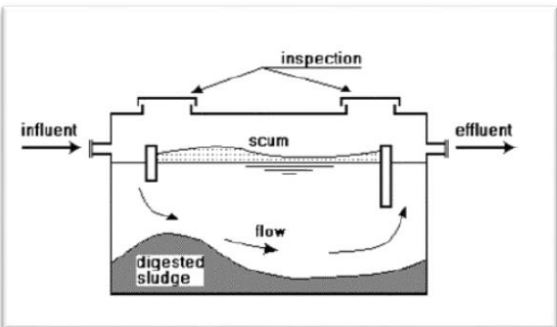
Yoon, C. G., Kwun, A. S. K. A. T., & Jung, K. (2008). Development of natural and ecological wastewater treatment system for decentralized community in Korea, 221–227. <https://doi.org/10.1007/s10333-008-0109-y>

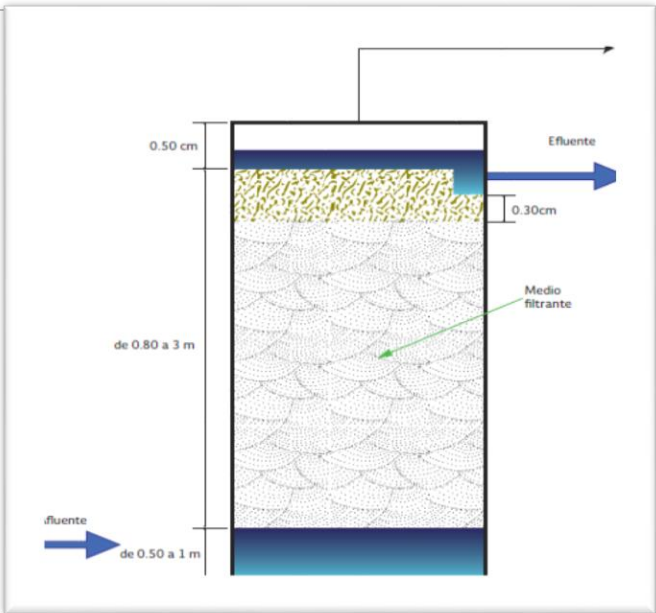
Zeng, G., Jiang, R., Huang, G., Xu, M., & Li, J. (2007). Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis. *Journal of Environmental Management*, 82(2), 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.12.024>

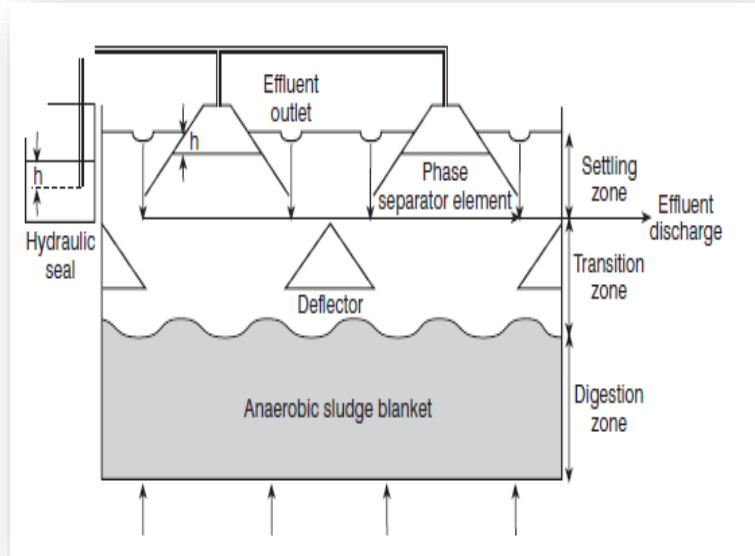
Zhou, P., Ang, B. ., & Poh, K. . (2006). Decision analysis in energy and environmental modeling: an update. *Energy*, 2604–2621.

Apéndices

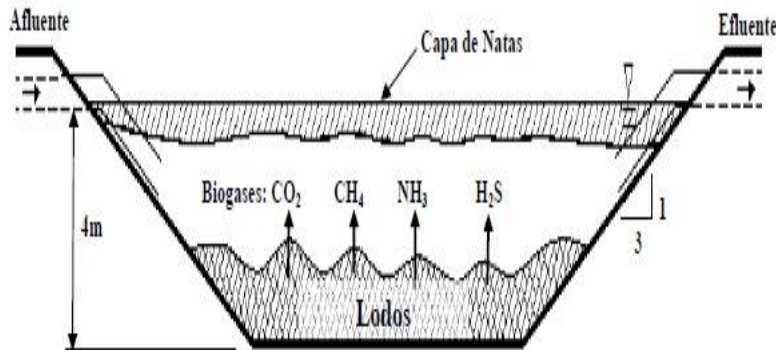
Apéndice A. Fichas técnicas tecnologías de tratamiento de aguas residuales

Tanque Séptico		Tratamiento Primario - Secundario
Descripción	Consiste en uno o varios tanques en serie, en donde ocurren los procesos de sedimentación y digestión. Su principal función es eliminar sólidos suspendidos y material flotante, los cuales se sedimentan y realizan el proceso de digestión en el fondo del tanque.	 Fuente. Sperling (2007)
Generalidades del Proceso	En estos se realiza la separación de la parte sólida de las aguas residuales por procesos de sedimentación simple, depositándose lodos en el fondo del tanque en donde se presenta el proceso de digestión anaerobia. La capacidad de los tanques puede ser determinada de diferentes maneras, con base en la población servida, caudal afluente y tiempos de retención. La literatura recomienda un tiempo de retención en el tanque de uno a tres días, con el fin de obtener una sedimentación efectiva y un periodo de desenlode apropiado.	
Consideraciones Técnicas	Se considera un sistema simple y práctico para su operación, pues al no poseer equipos, esta se limita a seguimientos en limpieza, chequeos del sistema y desenlodes programados según proyecciones del diseño, asimismo, presenta buena adaptación a diferentes concentraciones del afluente, por ende resistencia a variaciones de carga. Este sistema tiene la capacidad de realizar un tratamiento parcial de las aguas residuales, por sus bajos tiempos de retención de lodos, por esta razón, el efluente no posee características físico - químicas para ser descargado a un cuerpo receptor ni ser reusado con ningún fin, por lo que es necesario realizar un tratamiento adicional. Por lo anterior, presenta bajas eficiencias de remoción de coliformes y nutrientes; remociones aproximadas de DBO ₅ entre el 30 y 50%, y entre el 50 y 70% de sólidos suspendidos.	
Consideraciones Ambientales	En relación a la generación de lodos, se puede mencionar, que la digestión anaerobia genera una continua reducción de volumen de lodos acumulados en el fondo del tanque, sin embargo, no deja de presentarse una acumulación lo que reduce el volumen útil del tanque, generando remociones periódicas y tratamientos posteriores a estos materiales. Asimismo, la materia orgánica acumulada en el fondo del tanque en continua digestión anaerobia, convirtiéndose en gases como CO ₂ , CH ₄ , y H ₂ S.	
Consideraciones Económicas	Este tipo de sistemas se encuentra construidos generalmente bajo tierra, al ser anaerobios no requieren energía para operación y sus costos de operación y mantenimiento se limitan en limpiezas al sistema y desenlodes periódicos proyectados en el diseño inicial.	
Consideraciones Sociales	Por ser un sistema anaerobio, existe el riesgo de generación de malos olores, pues se presenta la digestión en el fondo del tanque y la producción de gases CO ₂ , CH ₄ y H ₂ S, a pesar de esto, esta se da en el fondo del tanque, por lo que la producción de olores no es usualmente un tema crítico dado que el H ₂ S se combina con metales presentes en los sólidos sedimentados dando lugar a sulfuros metálicos insolubles. La producción de ruidos del sistema es mínima dado que no requiere equipos para su operación, también el impacto visual es mínimo dado que por ser un sistema enterrado no afectaría el paisaje del sitio.	
Referencias: (Sperling, 2007); (Romero, 2004); (Noyola <i>et al.</i> , 2013)		

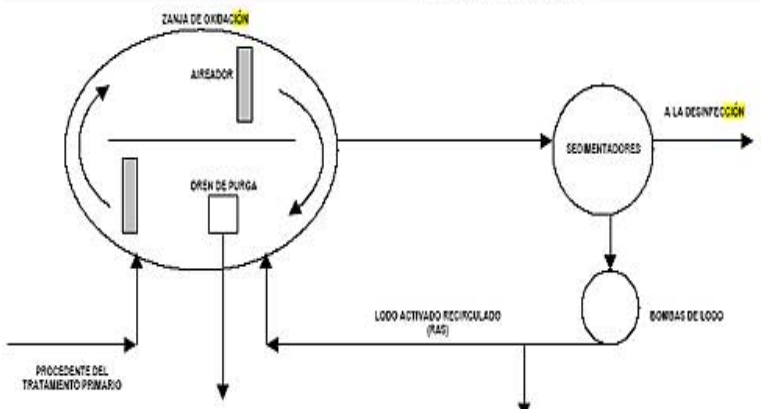
Filtro Anaerobio		Tratamiento Primario - Secundario
Descripción	Constituido por un tanque relleno con un medio sólido para soporte del crecimiento biológico anaerobio, el cual puede ser de flujo ascendente o descendente.	
Generalidades del Proceso	En este sistema se presentan procesos de óxido-reducción que se llevan a cabo por microorganismo los cuales se encuentran adheridos al medio de soporte existente, así el agua residual entra en contacto con estos permitiendo así darse el tratamiento. Los procesos de tratamiento en este sistema se dan con tiempos de retención celular altos por su ya mencionada adherencia al medio de soporte, con tiempo de retención hidráulica cortos. Este proceso es poco sensible a variaciones de carga hidráulica y a la operación discontinua pues el medio retiene los sólidos y la biomasa formada en el. Para el caso de filtros anaerobios de flujo ascendente suelen construirse en forma rectangular y cilíndrica con anchos y diámetros que van de 2 a 8 m y alturas de 3 a 13 m, con material de empaque colocado desde el fondo del reactor ocupando entre el 50 y 70% del volumen de este. En relación a aspectos a tener en cuenta en el diseño se tienen el operar con cargas orgánicas volumétricas entre 0.15 - 0.5 kg de DBO/m³*d, cargas hidráulicas superficiales de 6 y 15 m³ / (m² d) velocidades de flujo bajas con el fin de evitar lavados en la biomasa.	
Consideraciones Técnicas	La principal limitación de los filtros resulta de los riesgos de obstrucción en las entradas del sistema, lo que puede generar problemas operacionales por lo que requiere de un seguimiento estricto al plan de mantenimiento. Presenta eficiencias de remoción de DBO entre el 65 y 75%, SS entre el 20 y 30% a pesar de esto, su efluente tiene restricciones para la descarga a cuerpos de agua salvo de contar con un tratamiento posterior, dado que las remociones de nutrientes Nitrogeno y Fosforo, y Coliformes son bajas.	
Consideraciones Ambientales	Como ventaja del sistema se presenta la baja producción de lodos; por ser un sistema anaerobio se generan gases	
Consideraciones Económicas	Al ser un sistema anaerobio no requiere energía para operación, sin embargo sus costos de inversión, operación y mantenimiento son considerables por el requerimiento del medio de soporte; son un sistema compacto por lo que presenta bajos requerimientos de área para su instalación.	
Consideraciones Sociales	Por ser un sistema anaerobio, existe el riesgo de generación de malos olores, sin embargo, con un buen plan de mantenimiento este puede ser disminuido, además, de ser una unidad cerrada. La producción de ruidos del sistema es mínima dado que no requiere equipos para su operación, respecto al impacto visual es importante mencionar que es bajo dado que son sistemas que no requieren construcciones que pueden llegar a afectar el paisaje y concepción arquitectónica de la zona de instalación.	
Referencias: Sperling. (2007), Romero (2004), Noyola et al.(20113), Conagua (2015)		Fuente. Conagua (2015)

Proceso Ascensional de Manto de Lodos Anaerobio - UASB		Tratamiento Primario - Secundario
Descripción	Reactor anaerobio basado en la formación de una cama de lodos localizada en el fondo de este, en la parte superior se ubica un sistema de captación de biogás. El agua residual ingresa por el fondo del reactor y atraviesa un manto de lodos biológicos con partículas de microorganismos ubicada en la zona inferior del reactor ocupando aproximadamente 1/3 del volumen total de este.	 Fuente. Mara (2003)
Generalidades del Proceso	El tratamiento se da por el contacto del agua residual y el lodo granulado, los gases producidos de dicha digestión anaerobia generan circulación al interior aportando a la formación y mantenimiento de los gránulos; parte de estos gases son adheridos a las partículas biológicas las cuales ascienden hacia la parte superior del reactor, donde se produce la liberación del gas al entrar en contacto con unos deflectores desgasificadores que ocasionan el posterior regreso de la partícula a la superficie del manto de lodos. El gas libre es capturado por las campanas ubicadas en la parte superior del reactor. A causa de la particularidad de retención de sólidos del sistema, este opera con mayores tiempos de retención celular y bajos tiempos de retención hidráulica.	
Consideraciones Técnicas	La construcción y operación de este sistema es simple, presenta altas eficiencias de remoción de DBO₅ entre el 70y 80%, SS entre 65 y 80%, remociones de nitrógeno menores al 30%, asimismo, es poco eficiente en la remoción de patógenos entre 1 y 2 unidades logarítmicas.	
Consideraciones Ambientales	Genera lodos biológicamente estables los cuales pueden ser reusados en agricultura, la demanda de energía para su operación es mínima y es requerida para garantizar la velocidad ascensional del agua y hace que el manto de lodos permanezca en la altura adecuada, y su requerimiento de área para instalación es bajo.	
Consideraciones Económicas	Presenta bajos costos de inversión, operación y mantenimiento	
Consideraciones Sociales	Presenta riesgo de generación de malos olores por la producción de gases CO₂, CH₄ y H₂S, baja probabilidad de generación de ruidos, podría generar impacto visual por la instalación de reactores y sistemas de recolección de gases.	
Referencias: (Metcalf y Eddy, 1995b); (Romero, 2004); (Mara, 2004); (Sperling, 2007); (Bdour <i>et al.</i> , 2009); (Noyola <i>et al.</i> , 2013)		

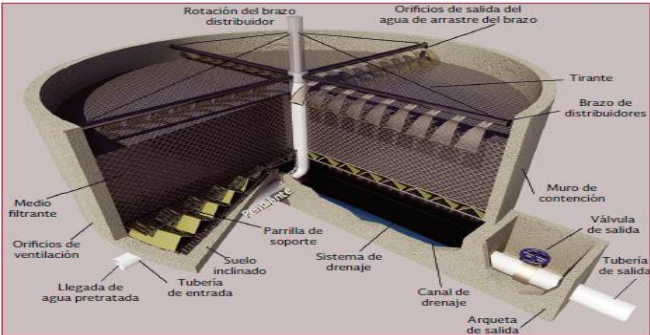
Fuente. Mara (2003)

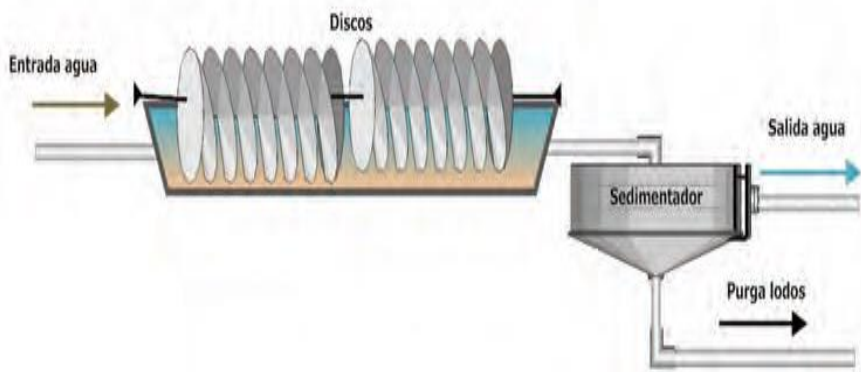
Laguna Anaerobia		Tratamiento Primario - Secundario
Descripción	Las lagunas anaerobias son estanques de profundidades entre 2 - 5 m los cuales reciben una alta carga orgánica por lo que su función principal se limita a la degradación de dicha materia orgánica. Su profundidad permite mantener condiciones anóxicas y anaerobias en todo el sistema, aunque es importante resaltar, que dependiendo de la acción del viento, un pequeño estrato superficial se encuentra con presencia de oxígeno disuelto.	 Fuente. Mara (1997)
Generalidades del Proceso	El proceso llevado a cabo para la estabilización de la materia orgánica se da mediante sedimentación y conversión biológica de los desechos orgánicos en gases (CH ₄ , CO ₂ y H ₂ S) y nuevas células. Con ayuda de las bacterias formadoras de ácidos orgánicos y de bacterias metanogénicas, se convierten los compuestos orgánicos complejos en moléculas sencillas, y luego el material en metano y dióxido de carbono.	
Consideraciones Técnicas	Sistemas de operación simple dado que no cuentan con procesos mecanizados ni altamente sofisticados que requieran de técnicas especializadas para su operación y mantenimiento. Dada la acumulación gradual de sólidos, el sistema requiere de una limpieza y retiro de estos en periodos de entre 1 - 3 años. Las lagunas anaerobias alcanzan considerables eliminaciones de materia orgánica (DBO ₅) y sólidos suspendidos, caso contrario, se muestra con sus eficiencias en la eliminación de nutrientes y sustancias patógenas.	
Consideraciones Ambientales	Estos sistemas requieren grandes extensiones de tierra, la laguna anaerobia, por sus mayores profundidades requiere la menor cantidad de tierra de los sistemas de lagunas de estabilización. Por otro lado, los requerimientos de energía del sistema son nulos dado que no requiere de sistemas mecanizados para su operación. Respecto a la generación de lodos esta se da en bajas cantidades y su remoción será necesaria después de cumplirse los periodos estipulados para los respectivos deslode.	
Consideraciones Económicas	En relación a costos de inversión, operación y mantenimiento estas son una alternativa económica, dado que no requiere de la adición de productos químicos ni energía para realizar los procesos requeridos para el tratamiento de aguas residuales, asimismo, las obras para su implantación no requieren de técnicas constructivas especializadas por lo que sus costos son bajos.	
Consideraciones Sociales	Los impactos sociales derivados de la implantación de un sistema de laguna anaerobia son bajos, dado que no requiere de equipos para su operación la generación de ruido es prácticamente nula; por otra parte, dada la liberación de gases en el proceso de degradación de materia orgánica, la generación de olores puede causar algún tipo de molestia a comunidades aledañas. Sin embargo, es importante recalcar que un sistema correctamente diseñado y con los controles preventivos de mantenimiento y seguimiento rutinario disminuye la probabilidad de generación de olores. Dados los requerimientos de grandes extensiones de tierra, el sistema puede generar molestias y afectaciones en relación al aspecto visual de la zona de implantación, sin embargo, dado que es un sistema natural su interacción puede ser beneficiosa al paisaje y disminuir dichos potenciales de afectación.	
Referencias: (Mara, 1997); (Mara, 1998); (Sperling, 2007); (CONAGUA, 2015)		

Lodos Activados		Tratamiento Secundario
Descripción	Unidad biológica compuesta en su estructura convencional por un sedimentador primario encargado de remover parte de la materia orgánica suspendida y sedimentable, seguido del tanque de aireación o reactor en el que se da la producción de una masa activada de microorganismos o conglomerados bacterianos que forman flóculos capaces de estabilizar residuos por vía aerobia, dichos flóculos están constituidos también por materia orgánica e inorgánica adsorbida y absorbida en el proceso. El cual es precedido de un sedimentador secundario	Fuente. (Noyola <i>et al.</i>, 2013)
Generalidades del Proceso	Los procesos generados se dan a partir de la adsorción - estabilización - síntesis y oxidación de la materia orgánica, las reacciones bioquímicas relacionadas con la remoción de materia orgánica son dadas en el tanque de aireación, en ella se desarrolla la biomasa por la toma del sustrato del agua residual afluyente, posteriormente, la sedimentación de dicha biomasa se presenta en el tanque sedimentador permitiendo así tener un efluente clarificado. Parte de estos sólidos sedimentados son recirculados al reactor principal con el fin de mantener la concentración requerida de estos los cuales son responsables de garantizar la eficiencia del sistema. Los sólidos restantes son retirados y redireccionados a procesos de tratamiento adicionales. Por lo general, se diseña según el tiempo de residencia de sólidos, el tiempo de residencia hidráulica y el gradiente de velocidad dentro del tanque de contacto, el tiempo de sedimentación, la concentración de sólidos en suspensión de licor mixto, la relación de reciclaje de lodos y la temperatura operativa.	
Consideraciones Técnicas	Sistema mecanizado con altos requerimientos operativos, aerobio y susceptible a cualquier cambio físico y químico, por lo que requiere de estrictos controles eficaces en su operación. En condiciones óptimas, la eliminación de la DBO ₅ se encuentra entre 85 y 95%, de sólidos suspendidos 85 y 95%, de nitrógeno entre 25 y 30%, y bajas remociones de patógenos de hasta el 60%.	
Consideraciones Ambientales	La operación del sistema genera grandes cantidades de lodos los cuales requieren tratamiento posterior para sus estabilización y posible uso. Dados los bajos tiempos de retención hidráulica usados por el sistema para efectuar su tratamiento los requerimientos de área son bajos siendo considerada esta como una ventaja del sistema. Caso contrario se menciona al evaluar los consumos y requerimientos de energía para la operación, dado que para el funcionamiento de difusores de aire que garanticen las condiciones óptimas de diseño en el tanque de aireación estos son elevados.	
Consideraciones Económicas	La implantación del sistema, así como los costos de operación y mantenimiento de este son elevados a causa de los requerimientos operativos de sus sistemas mecanizados y consumos de energía.	
Consideraciones Sociales	El sistema genera un alto impacto visual en su instalación y conjunto con el paisaje, dado que requiere de la ubicación de varios tanques, los cuales a pesar de ser considerados con bajos requerimientos de área por los bajos tiempos de retención hidráulica no presentan un aspecto amigable dado que las tonalidades del agua residual en el proceso de tratamiento en buenas condiciones son tipificadas como un color café achocolatado. Respecto a la generación de olores del sistema, es importante recalcar que un sistema bien operado no debe generar olores considerables, sin embargo estos si pueden presentarse en el sedimentador primario generado por operaciones inadecuadas en remociones de sólidos y natas en esta etapa preliminar de tratamiento. El sistema puede ocasionar ruidos a causa del funcionamiento de los equipos requeridos para garantizar la aireación requerida al proceso con el fin de logara las remociones esperadas.	
Referencias: (Metcalf y Eddy, 1995b); (Romero, 2004); (Sperling, 2007); (Noyola <i>et al.</i> , 2013); (Diamantis <i>et al.</i> , 2014); (CONAGUA, 2015)		

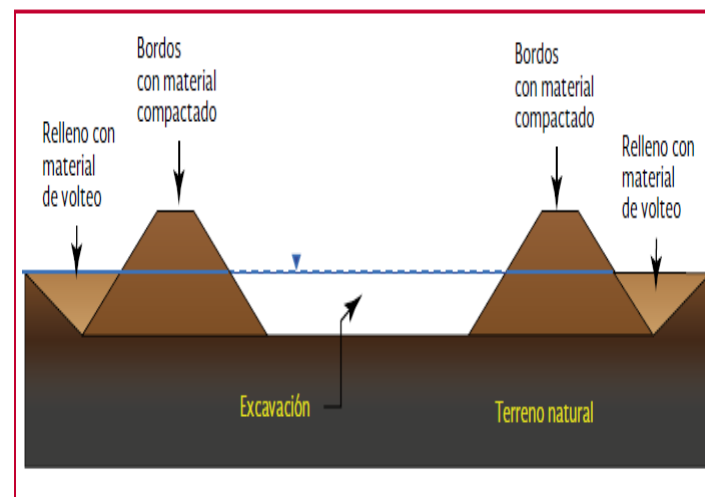
Zanjas de Oxidación		Tratamiento Secundario
Descripción	Proceso de lodos activados del tipo de aireación prolongado, que usa un canal cerrado con curvas para la aireación y mezcla, requiere el uso de aireadores mecánicos para la circulación y mantener los niveles de oxígeno disuelto requeridos en el licor mezclado. El sistema típico no incluye sedimentador primario, utiliza un canal concéntrico, sedimentador secundario y requerimientos adicionales para el tratamiento de lodos generados en el proceso.	 Fuente: Mara (2004)
Generalidades del Proceso	Siendo estos una variante el proceso de lodos activados, es importante mencionar que los lodos activados consisten en una masa floculenta de microorganismos, materia orgánica e inorgánica con superficies altamente activas para la adsorción de materiales coloidales suspendidos, de esta forma la materia orgánica susceptible de descomposición biológica es convertida en compuestos inorgánicos. En este proceso el sistema de mezcla completa requiere organismos en la fase endógena de crecimiento, así como relaciones alimento/microorganismo bajas, altas concentraciones de sólidos suspendidos en el reactor y tiempos de aireación largos. Como criterios importante de diseño se recalca la ya mencionada prolongada edad de lodos entre 20 - 30 días y tiempos de retención hidráulica de entre 0.5 y 1.5 días que permiten una operación estable del proceso.	
Consideraciones Técnicas	La prolongada edad de lodos usada en el diseño de estos permite tener una operación relativamente estable del proceso, por lo que se considera el sistema en relación a su operación más práctico que el sistema convencional, así como presenta alta resistencia a variación de cargas contaminantes. La literatura registra que un buen sistema diseñado y operado podría alcanzar remociones de DBO ₅ y SS hasta del 95%; estos sistemas también son efectivos en la remoción del nitrógeno por la existencia de zonas aerobias y anóxicas, de esta forma se alcanzarían remociones de hasta el 80%, al igual que en el sistema convencional, bajas remociones de patógenos.	
Consideraciones Ambientales	La producción de lodos es muy baja dado que su característica corresponde a las de un proceso de lodos activados de aireación prolongada, produce lodos de desecho biológicamente estables que pueden manejarse sin problemas ambientales y sin necesidad de recurrir en tratamientos adicionales para el uso o disposición de estos. Este sistema por su característica principal de requerir tiempos prolongados de aireación tiene uno de los requerimientos de energía más altos de las variantes de lodos activados; el requerimiento de área no es tan bajo dado que los grandes tiempos de retención hidráulica son compensados con las mayores profundidades permitidas para la estructura del reactor.	
Consideraciones Económicas	La implantación del sistema, así como los costos de operación y mantenimiento de este son elevados a causa de los requerimientos operativos de sus sistemas mecanizados y consumos de energía.	
Consideraciones Sociales	El sistema genera un alto impacto visual en su instalación y conjunto con el paisaje, dado que requiere de la ubicación de diversas estructuras. Al ser un sistema aerobio no presenta alto potencial de generación de olores, siempre y cuando este se opere en condiciones adecuadas. El sistema puede ocasionar ruidos a causa del funcionamiento de los equipos requeridos para garantizar la aireación requerida al proceso con el fin de logara las remociones esperadas.	
Referencias: (Mara, 2004); (Romero, 2004); (Sperling, 2007); (Noyola <i>et al.</i> , 2013); (CONAGUA, 2015)		

Reactor Biológico Secuencial (SBR)		Tratamiento Secundario	
Descripción	Reactor de lodos activados que realiza todo el tratamiento en un solo tanque, su funcionamiento se basa en la secuencia de ciclos de llenado y vaciado.		
Generalidades del Proceso	Los procesos presentados en este reactor son los mismos de un sistema convencional de lodos activados, en este único reactor se presenta la aireación, sedimentación, decantación y extracción del efluente; la biomasa y el agua residual permanece en todo el ciclo de operación en este. Durante la aireación la biomasa oxida la materia orgánica y estabiliza el residuo, seguidamente la biomasa se sedimenta y se produce un sobrenadante clarificado el cual es removido mediante vertederos flotantes. Un punto importante en la operación del sistema está relacionado con la extracción de lodos sobrantes la cual se determina según las necesidades de los rendimientos en el proceso, es importante tener en cuenta que no es necesario disponer de un retorno de estos lodos como en el caso convencional. La literatura reporta periodos típicos de operación, por mencionar, 3 horas de llenado, 2 horas de aireación, 0.5 horas de sedimentación y 0.5 horas de vaciado.		
Consideraciones Técnicas	El sistema se considera práctico para su operación y mantenimiento, una de las ventajas está relacionada con la posibilidad de variar las duraciones de las diferentes etapas de tratamiento, lo que permite optimizar tiempos de reacción, capacidad de tratamiento y consumo de energía para aireación. La literatura reporta remociones de DBO ₅ y SS entre 90 - 95%, de nitrógeno de hasta el 60%, y bajas remociones de patógenos.		
Consideraciones Ambientales	La generación de lodos del sistema es menor a las diversas variantes de lodos activados, es importante tener en cuenta los requerimientos adicionales para el tratamiento y disposición de estos lodos generados. El consumo de energía de operación es optimizado por el sistema según las secuencias de tiempo adoptadas por el proceso, por lo que esto permite reducir en gran porcentaje los requerimientos energéticos de operación. Dado que el tratamiento es dado en un único tanque los requerimientos de área para su construcción son bajos.		
Consideraciones Económicas	Dado que el tratamiento se da en un solo tanque los costos de inversión, operación y mantenimiento del sistema son menores a las otras variantes de lodos activados, sin embargo estos son considerables dado que si requieren de equipos mecanizados para la operación.		
Consideraciones Sociales	El sistema genera un impacto medio en su relación con el entorno visual y en conjunto con el paisaje, generado por la instalación del tanque requerido para el tratamiento. Al ser un sistema aerobio no presenta alto potencial de generación de olores, siempre y cuando este se opere en condiciones adecuadas. El sistema puede ocasionar ruidos a causa del funcionamiento de los equipos requeridos para garantizar la aireación requerida al proceso con el fin de logara las remociones esperadas, sin embargo, este es optimizado dado que la aireación no es continua sino se da por fases estipuladas en el diseño y operación del mismo.		
Referencias: : (Metcalf y Eddy, 1995b); (Romero, 2004); (Sperling, 2007)			

Filtro Percolador		Tratamiento Secundario
Descripción	Proceso diseñado con el fin de poner en contacto aguas residuales con biomasa adherida a un medio de soporte fijo, en él no se dan las acciones de filtración o tamizado. Compuesto por un lecho, medio natural o sintético, suficientemente espaciado que permite la circulación de aire en forma natural y sobre el cual se riegan y dejan percolar las aguas residuales, en el que se presenta el crecimiento de microorganismos. Construido usualmente de forma circular con un distribuidor rotatorio superficial del agua, además posee un sistema de drenaje inferior para recoger el agua residual tratada y sólidos biológicos desprendidos del medio.	 Fuente. Noyola et al., (2013)
Generalidades del Proceso	El tratamiento de las aguas de residuales que pasan a través del medio filtrante se da principalmente por el proceso de oxidación biológica y no por efectos mecánicos de cribado o filtración. Los microorganismos emplean la materia orgánica como su fuente de alimentación y en presencia de oxígeno proveniente del aire que circula a través del filtro, esta es metabolizada mediante numerosas reacciones bioquímicas. Los filtros percoladores se clasifican por su forma de operación con distintas cargas orgánicas, es decir, con diferente masa de materia orgánica biodegradable aplicada por unidad de volumen de medio filtrante por día; y diferente carga superficial o gasto aplicado por unidad de superficie. Por una parte, el filtro de tasa baja normalmente no requiere recirculación y el filtro de alta tasa el cual incluye recirculación permitiendo de esta forma la aplicación de cargas orgánicas mayores.	
Consideraciones Técnicas	Los filtros son de diseño simple, con funcionamiento confiable, bajo nivel de mecanización y producción de efluentes de calidad eficiente con remociones aproximadas de materia orgánica y sólidos suspendidos de entre 85 - 93%. Por otra parte, dadas las condiciones biológicas registrado en el medio la parte inferior del reactor es poblada por bacterias nitrificantes, por lo que puede generar un efluente bien nitrificado. El sistema presenta bajas remociones de patógenos.	
Consideraciones Ambientales	Una característica importante a resaltar de este sistema de tratamiento es que la aireación se efectúa por convección natural, es decir, el aire fluye a través del medio empaçado por diferencia de temperaturas entre el ambiente interno del reactor y el externo, lo cual conlleva a el no uso de sistemas de aireación que consuman grandes cantidades de energía. El sistema de tasa alta presenta bajos requerimientos de área para su implementación comparada con el filtro de baja tasa el cual a pesar de no requerir grandes extensiones si necesita más que los sistemas de alta tasa por mayores tiempos de retención en el sistema. Respecto a la generación de lodos y requerimientos de tratamientos para su disposición, estos requieren de tratamiento previo para la disminución de afectaciones ambientales por malas prácticas en estos asuntos.	
Consideraciones Económicas	El sistema presenta altos costos de inversión inicial relacionados con el suministro del material de empaque o filtrante requerido para ser el medio de soporte en el que se darán los procesos de tratamiento de las aguas residuales. Los costos de operación y mantenimiento están relacionados con el seguimiento el material de empaque, las redes de los desagües existentes, y temas varios, los cuales por no corresponder a sistemas altamente mecanizados no son representativos.	
Consideraciones Sociales	En filtros de tasa baja se puede presentar problemas de olores, acentuados con la existencia de afluentes sépticos y altas temperaturas, por lo que es importante la implementación de medidas de control; por otra parte, en filtros de alta tasa, en estos la recirculación ayuda a evitar enlagueamientos y a la reducción de olores molestos. El sistema genera un alto impacto visual en su instalación y conjunto con el paisaje, dado que requiere de la ubicación de diversas estructuras que pueden llegar a presentar alturas considerables. El sistema puede ocasionar ruidos a causa del funcionamiento de los equipos requeridos para garantizar el bombeo de las aguas residuales, pero ruidos relacionados con el proceso revisado no son relevantes.	
Referencias: : (Metcalf y Eddy, 1995b); (Romero, 2004); (Sperling, 2007); (Noyola <i>et al.</i> , 2013)		

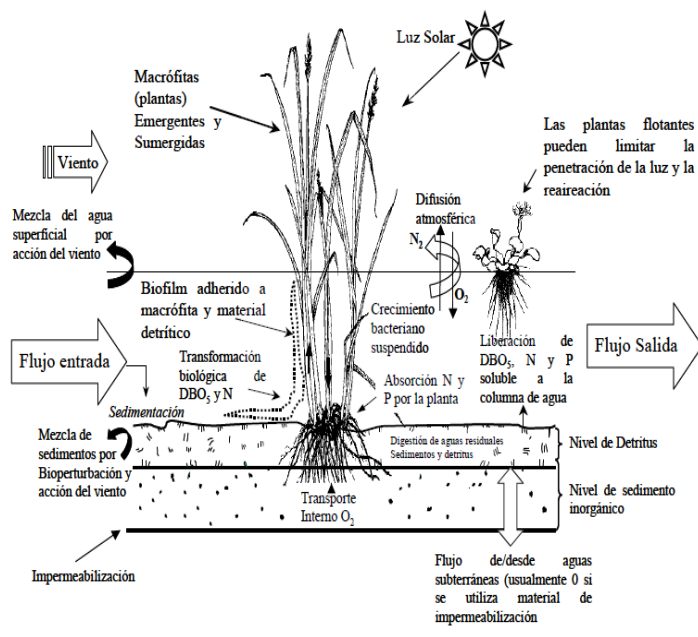
Discos Biológicos Rotatorios - Biodiscos		Tratamiento Secundario
Descripción	Sistema de tratamiento biológico del tipo de crecimiento adherido o reactor de película fija. Consiste en un empaque circular giratorio (discos) montado sobre un eje horizontal, los cuales rotan lentamente (2 a 5 rpm) con un porcentaje medio de superficie sumergida en el agua residual, mientras que el resto entra en contacto con el aire, es decir, la biopelícula interacciona con el aire y el agua en forma sucesiva	 Fuente. Noyola et al., (2013)
Generalidades del Proceso	En el proceso las películas biológicas crecen sobre discos montados sobre el eje, los cuales rotan dentro del agua residual sedimentada y dentro de la atmósfera para proveer oxígeno a los organismos; a medida que el agua residual pasa a través del sistema, el sustrato es removido como resultado de la oxidación biológica, por lo general no se usa recirculación y el sistema opera con tiempos de retención cortos.	
Consideraciones Técnicas	Este sistema es ingenioso, de gran simplicidad y evita la difusión forzada de oxígeno en el agua, el punto débil de la tecnología no está en el proceso biológico, sino en el mecánico pues por la estructura del eje y sus rodamientos se pueden presentar fallas durante la operación por desalineamientos o mala lubricación. Se alcanzan eficiencias de remoción de materia orgánica (DBO ₅) entre el 90 y 95%. Asimismo, presenta altas eficiencias de remoción de carbono y nitrógeno.	
Consideraciones Ambientales	Dadas las condiciones del sistema y en vista de la inexistente difusión innecesaria de oxígeno en el agua se registran requerimientos mínimos en el consumo de energía eléctrica, los cuales no están relacionados con el proceso realizado para el tratamiento del agua residual. La generación de lodos se da en el sedimentador secundario en donde se separa la película desprendida los cuales requieren tratamiento antes de su disposición final. Los requerimientos de área para su implantación son bajos, de allí su gran aplicabilidad en sistemas de tratamiento en pequeñas comunidades.	
Consideraciones Económicas	Este sistema presenta costos de operación y mantenimiento reducidos, y altos costos de construcción e inversión inicial.	
Consideraciones Sociales	Con el fin de eliminar espacios muertos en los que pueda acumularse sólidos y generarse condiciones sépticas y olores los sistemas son conformados por geometrías circulares. Respecto al impacto visual se considera como medio dado que el sistema al ser compacto afectaría dependiendo de las dimensiones del reactor, por otra parte, la generación de ruidos del sistema es producida por la acción del tipo de motor usado para ejercer la rotación del eje con sus respectivos discos.	
Referencias: : (Romero, 2004); (Sperling, 2007); (Noyola <i>et al.</i> , 2013)		

Laguna Facultativa	Tratamiento Secundario	
Descripción	Caracterizadas por la existencia de tres zonas definidas: i) la zona superficial, donde las bacterias y algas coexisten simbióticamente; ii) la zona del fondo, de carácter anaerobio, donde los sólidos se acumulan por sedimentación y son descompuestos fermentativamente; y, iii) una zona intermedia, parcialmente aerobia y parcialmente anaerobia, donde la descomposición de la materia orgánica se realiza mediante bacterias aerobias, anaerobias y facultativas.	
Generalidades del Proceso	La materia orgánica es oxidada por organismos aerobios y facultativos, quienes toman el oxígeno producido por las algas, las cuales toman el dióxido de carbono producido como fuente de carbono. Asimismo, se da el proceso de sedimentación, en el que los sólidos presentes en el agua residual son acumulados en el fondo de la laguna donde se forma un estrato de lodo anaerobio. Allí se dan los procesos de descomposición de materia orgánica registrados en las lagunas anaerobias.	
Consideraciones Técnicas	Sistemas de operación simple dado que no cuentan con procesos mecanizados ni altamente sofisticados que requieran de técnicas especializadas para su operación y mantenimiento. Las lagunas anaerobias alcanzan considerables eliminaciones de materia orgánica (DBO_5) y sólidos suspendidos, caso contrario, se muestra con sus eficiencias en la eliminación de nutrientes y sustancias patógenas.	
Consideraciones Ambientales	Estos sistemas requieren grandes extensiones de tierra. Por otro lado, los requerimientos de energía del sistema son nulos dado que no requiere de sistemas mecanizados para su operación. Respecto a la generación de lodos esta se da en bajas cantidades.	
Consideraciones Económicas	En relación a costos de inversión, operación y mantenimiento estas son una alternativa económica, dado que no requiere de la adición de productos químicos ni energía para realizar los procesos requeridos para el tratamiento de aguas residuales. Si se contempla el costo del terreno para la implantación del sistema, los costos de inversión se pueden considerar altos, sin embargo, las obras para su implantación no requieren de técnicas constructivas especializadas por lo que sus costos son bajos.	



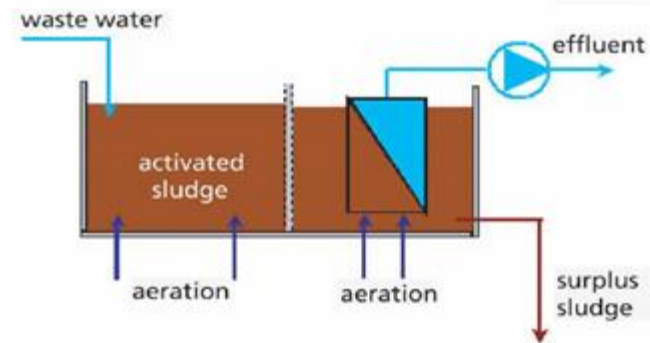
Fuente. Conagua (2015)

Consideraciones Sociales	Los impactos sociales derivados de la implantación de un sistema de laguna facultativa son bajos, dado que no requiere de equipos para su operación la generación de ruido es prácticamente nula; el potencial de generación de olores se puede considerar intermedio dado que en ella se registran procesos de degradación anaerobia, los cuales pueden llegar a ocasionar molestias, sin embargo, estos no son considerables. Asimismo, es importante recalcar que un sistema correctamente diseñado y con los controles preventivos de mantenimiento y seguimiento rutinario disminuye la probabilidad de generación de olores. Dados los requerimientos de grandes extensiones de tierra, el sistema puede generar molestias y afectaciones en relación al aspecto visual de la zona de implantación, sin embargo, dado que es un sistema natural su interacción puede ser beneficiosa al paisaje y disminuir dichos potenciales de afectación.
Referencias: (Mara, 1997); (Mara, 1998); (Sperling, 2007); (CONAGUA, 2015)	

Humedales Construidos	Tratamiento Secundario - Terciario
Descripción Son estanques o canales superficiales (profundidades menores a 1 m) que contienen plantas acuáticas y usan mecanismos biológicos, químicos y físicos para tratar el agua residual. Se han clasificado convencionalmente según el tipo de macrófitos y el régimen de flujo de agua utilizados, los cuales se pueden dividir en el <i>flujo de superficie del agua libre</i> y el <i>flujo subsuperficial</i>, donde el último se puede subdividir en el <i>flujo subsuperficial vertical</i> y el <i>flujo subsuperficial horizontal</i>. En relación a los humedales de flujo superficial el agua circula sobre la superficie del suelo con vegetación desde un punto de entrada hasta el punto de descarga. En los humedales de flujo subsuperficial horizontal, tipología más aplicada, el agua circula horizontalmente a través del sustrato de manera continua al ser aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior, favoreciendo las condiciones anaerobias al mantenerse el nivel del agua por debajo del sustrato. En los humedales de flujo subsuperficial vertical, el agua circula verticalmente a través del sustrato de manera intermitente, dándose el movimiento del agua residual desde la superficie hasta el fondo, en donde se cuenta con sistemas de conducción de agua presentándose condiciones aerobias en el proceso.	 Nota. Adaptado de Alarcón <i>et al.</i> (2018)
Generalidades del Proceso	Se pueden usar como un proceso de tratamiento secundario o terciario, que recibe los efluentes del tratamiento primario o secundario, respectivamente. La fuente de influencia tendrá un impacto en los nutrientes y las cargas de contaminantes orgánicos ingresados en el sistema. Compuestos por cuatro elementos importantes: i) el agua residual que ingresa al sistema; ii) el sustrato o medio filtrante que se coloca en el lecho del humedal con la función de servir de soporte para las plantas, y es allí donde se dan las transformaciones microbianas; iii) la vegetación o plantas que llevarán a cabo las funciones de depuración mediante procesos de adsorción y fijación, asimismo, las plantas transfieren oxígeno desde las hojas a las raíces, creando regiones aerobias en las que se da la degradación de materia orgánica; iv) los microorganismos los cuales intervienen en las reacciones biológicas de los procesos de tratamiento, degradación de materia orgánica y eliminación de nutrientes. Para el dimensionamiento de los humedales se calcula el área superficial requerida con base en la remoción del contaminante limitante, luego se procede con el diseño hidráulico de este.

Consideraciones Técnicas	Los humedales construidos en sus diversas variantes están considerados como sistemas óptimos para las remociones de materia orgánica y patógenos, principalmente, para el caso de remoción de DBO ₅ y SS sus remociones se encuentran entre el 80 - 90 %, patógenos - coliformes la literatura ha reportado eficiencias de remoción entre el 80 - 90%, y nitrógeno entre el 30 - 40 %. Los sistemas en general son considerados en aspectos de construcción, operación y mantenimiento como muy prácticos dado que no cuenta con procesos altamente mecanizados ni sofisticados, son susceptibles a variaciones de cargas contaminantes, sin embargo, estos presentan requerimientos previos, tales como tratamientos primarios con el fin de disminuir la llegada de grandes cantidades de sólidos que ocasionen taponamientos y afectaciones al sistema.
Consideraciones Ambientales	Prácticamente, el sistema en sus diversas variantes no presenta requerimientos de energía para su operación dado que las zonas aerobias requeridas para presentarse tratamiento son generadas a partir del oxígeno transportados desde la atmosfera por la macrófitas a la zona del sustrato. La generación de lodos en este sistema es baja, así mismo, estos no requieren tratamientos adicionales para su disposición o uso posterior. Una posibles desventaja del sistema está relacionada con los grandes requerimientos de área para su construcción, en el que entran en consideración diferentes aspectos, y son las pequeñas profundidades recomendadas para los sistemas, los tiempos de retención hidráulica requeridos para tratar el contaminante limitante, en los cuales pueden ser altos para lograr las eficiencias de diseño.
Consideraciones Económicas	Los costos de operación y mantenimiento no son considerablemente altos, dado que su operación no es mecanizada por lo que no requiere mantenimiento de equipos que complique su funcionamiento, sin embargo, necesita seguimiento en la vegetación dado que es la esencia del sistema, también es importante garantizar mantenimiento en el afluente del sistema con el fin de evitar taponamientos causados por la interacción de sólidos y el sustrato. Respecto a los costos de inversión estos no son elevados, sin embargo, se incrementan por la existencia del sustrato el cual depende del tipo de material contemplado en el diseño y requerido para garantizar las eficiencias en el tratamiento.
Consideraciones Sociales	Presentan bajos impactos visuales comparados con los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales, esto además por su interacción con el paisaje a causa de la vegetación que en ocasiones hace parte del sistema. Así mismo el sistema no se considera con potencial de afectación y generación de olores siempre y cuando se mantengan las condiciones contempladas para la operación en el diseño con cada uno de los mantenimiento requeridos; para el caso de ruidos dado que no cuenta con equipos mecanizados su posible generación es baja.
Referencias: (Romero, 2004); (Sperling, 2007); (Machado <i>et al.</i> , 2017); (Dotro <i>et al.</i> , 2017); (Alarcón <i>et al.</i> , 2018)	

Lagunas de Maduración		Tratamiento Terciario
Descripción	Sistema de tratamiento biológico en los que sus procesos y operaciones dependen en gran medida de condiciones ambientales como temperatura, viento, intensidad de luz solar, entre otros. Las lagunas de maduración son estanques de poca profundidad con la función principal de eliminar sustancias patógenas, sus dimensiones están limitadas a los requerimientos en la calidad microbiológica del efluente final.	
Generalidades del Proceso	El proceso de estabilización consiste en gran parte de las interacciones de las bacterias y las algas, las bacterias digieren y oxidan los componentes de las aguas residuales, por otra parte, las algas utilizan dióxido de carbono y otras sustancias resultantes de la acción bacteriana y, a través de la fotosíntesis producen el oxígeno necesario para mantener a las bacterias en el proceso de tratamiento.	
Consideraciones Técnicas	Sistemas de operación simple dado que no cuentan con procesos mecanizados ni altamente sofisticados que requieran de técnicas especializadas para su operación y mantenimiento. Las lagunas de maduración alcanzan pequeñas eliminaciones de materia orgánica (DBO ₅) y sólidos suspendidos, sin embargo, sus eficiencias en la eliminación de nutrientes son significativas, así como con la remoción de sustancias patógenas que afectan las condiciones microbiológicas del agua tratada.	
Consideraciones Ambientales	Dado que las profundidades de las lagunas son bajas y sus dimensiones están sujetas a los tiempos de retención hidráulica definidas por el sistema, las cuales se relacionan a su vez con los requerimientos en los parámetros de calidad del efluente, estos sistemas requieren grandes extensiones de tierra. Por otro lado, los requerimientos de energía del sistema son nulos dado que no requiere de sistemas mecanizados para su operación. Respecto a la generación de lodos esta se da en bajas cantidades y su remoción será necesaria después de cumplirse los periodos estipulados para los respectivos deslode.	
Consideraciones Económicas	Alternativa económica en lo que respecta a costos de mantenimiento y operación, dado que no requiere de la adición de productos químicos ni energía para realizar los procesos requeridos para el tratamiento de aguas residuales. Los costos de inversión se pueden considerar altos si se toma en cuenta los grandes requerimientos de áreas para la implantación de la alternativa tecnológica.	
Consideraciones Sociales	Los impactos sociales derivados de la implantación de un sistema de laguna de maduración son mínimos, dado que no requiere de equipos para su operación la generación de ruido es prácticamente nula; así mismo, la generación de olores es baja y está limitada a contar con una buena concepción e implantación del sistema, además de su correcta operación y mantenimiento. Dado que las profundidades de las lagunas son bajas estas requieren grandes extensiones de tierra por lo que pueden generar molestias y afectaciones en relación al aspecto visual de la zona de implantación del sistema.	
Referencias: (Mara, 1997); (Mara, 1998); (Mara, 2004); (Sperling, 2007); (CONAGUA, 2015)		

Filtración con Membranas		Tratamiento Terciario	
Descripción	La filtración con membranas es un proceso de tratamiento basado en la separación física de material particulado y coloidal del agua con el uso de una membrana semi-permeable. Este tipo de sistemas está siendo usado para el tratamiento de efluentes secundarios y terciarios de plantas de tratamiento. Las membranas se pueden clasificar de acuerdo a: i) tipo de material del cual está hecha la membrana, ii) naturaleza de la fuerza impulsora, iii) mecanismo de separación, y iv) tamaño del poro, entre los que están incluidos: micro filtración, ultrafiltración, nano filtración y ósmosis inversa.		
Generalidades del Proceso	La configuración de la membrana es relevante al momento de evaluar el desempeño del sistema, para ello se debe tener en cuenta aspectos como un área superficial específica respecto al volumen del módulo, y lograr turbulencia en alto grado que permita la transferencia de masa en el lado de la alimentación. Los diferentes tipos de membranas son usados con diferentes fines específicos, para el caso de la micro filtración y ultrafiltración estas se usan principalmente para separar agua tratada de la biomasa en un proceso aerobio o anaerobio y/o como pretratamiento para la ósmosis inversa y nano filtración la cual es usada en casos de reúso de efluentes con altas restricciones en concentraciones. El enfoque principal del presente documento se relaciona con el uso de membranas de micro filtración o ultrafiltración acopladas a reactores aerobios.		
Consideraciones Técnicas	Respecto a la operación y mantenimiento del sistema este requiere de diversos controles y seguimientos con el fin de disminuir las posibilidades de ocurrencias de incrustaciones, los cuales son los problemas operativos más comunes en todos los procedimientos de aplicación de membranas. Membranas de micro filtración y ultrafiltración tienen la eficiencia más baja entre todas las membranas en cuanto a la eliminación de los componentes orgánicos de las aguas residuales, sin embargo, para el caso de DBO₅ se encuentran en el rango de 75 - 90%, sólidos suspendidos totales 95 - 98 %, nitrógeno de hasta el 60%, y altas remociones de patógenos de hasta el 80%.		
Consideraciones Ambientales	La operación del sistema genera cantidades considerables de lodos en el reactor que precede el proceso de filtración, los cuales requieren tratamiento posterior para sus estabilización y posible uso. Se considera como ventaja del sistema sus bajos requerimientos de área, esto a causa de sus consideraciones de diseño relacionada con tiempos de retención hidráulica usados. No obstante, el caso aquí mencionado corresponde a un sistema aerobio acoplado con membranas, por lo cual los consumos y requerimientos de energía para la operación, y funcionamiento de difusores de aire que garanticen las condiciones óptimas de diseño en el tanque de aireación son elevados.		
Consideraciones Económicas	La implantación del sistema, así como los costos de operación y mantenimiento de este son elevados a causa de los requerimientos operativos de sus sistemas mecanizados y consumos de energía. Asimismo, el costo de las membranas es elevado, su mantenimiento y		

	tiempo de vida útil incrementa los costos operativos considerablemente.
Consideraciones Sociales	El sistema genera un alto impacto visual en su instalación y conjunto con el paisaje, dado que podría llegar a requerir la ubicación de diversos reactores. Respecto a la generación de olores del sistema, es importante recalcar que un sistema bien operado no debe generar olores considerables. El sistema puede ocasionar ruidos a causa del funcionamiento de los equipos requeridos para garantizar la aireación requerida al proceso con el fin de logara las remociones esperadas.
Referencias: (Romero, 2004); (Sperling, 2007); (CONAGUA, 2015)	

Apéndice B. Fichas técnicas metodologías de análisis de decisión

Proceso de Jerarquía Analítica - AHP	
Descripción	Método de comparación cuantitativa que se utiliza para seleccionar una alternativa preferida utilizando comparaciones por pares de las alternativas en función de su rendimiento relativo frente a cada criterio. Propuesto por el profesor Saaty en el año de 1977
Conceptualización del Modelo	La idea básica del enfoque es convertir las evaluaciones subjetivas de importancia relativa en un conjunto de puntuaciones o ponderaciones generales. La base de esta técnica es que los humanos son más capaces de hacer juicios relativos que los juicios absolutos. AHP es un procedimiento sistemático que representa los elementos de cualquier problema jerárquicamente, este es preferido cuando la información sobre los atributos está disponible en la escala de Saaty dando como resultado la comparación de alternativas en forma de prioridad. Una limitación importante es que el número máximo de alternativas debe mantenerse en menos de siete para lograr la coherencia en las preferencias.
Procedimiento de Aplicación	El proceso general de aplicación de la metodología se basa en: 1. Definición de problema y objeto de estudio 2. Estructurar el problema por jerarquías desde el nivel superior hasta el nivel más bajo a través de niveles intermedios los cuales contienen las alternativas 3. Construir el conjunto de matrices de comparación por pares para los niveles más bajos con una matriz para cada elemento mediante el uso de escala de preferencias 4. Para n cantidad de juicios necesarios para desarrollar el conjunto de matrices del punto anterior 5. La síntesis jerárquica se utiliza para ponderar vectores por el peso de los criterios y la suma se toma sobre todas las entradas correspondientes a los niveles inferiores 6. Habiendo hecho todas las comparaciones por pares, se determina el índice de consistencia, la cual determina la aceptabilidad de los juicios sobre las comparaciones realizadas
Referencias: (Hwang y Yoon, 1981); (Zeng <i>et al.</i> , 2007); (Kalbar <i>et al.</i> , 2013); (Molinos <i>et al.</i> , 2014)	

Técnica de Preferencia de Orden por Similitud con las Soluciones Ideales - TOPSIS	
Descripción	Método utilizado para clasificar las alternativas según las similitudes con una solución ideal positiva, basado en esta distancia cuantifica y compara las preferencias de las alternativas sobre el conjunto de atributos. El algoritmo matemático lógico da como resultado una clasificación directa que puede representarse gráficamente. Desarrollado por Hwang y Yoon en el año de 1981
Conceptualización del Modelo	El método se basa en el concepto de que la alternativa elegida debe ser la distancia más corta a la solución ideal positiva y la distancia máxima a la solución ideal negativa, este es uno de los métodos más utilizados para los casos en los que se cuente con información sobre los atributos en escala cardinal, así como, cuando los problemas de decisión involucran gran cantidad de atributos y alternativas.
Procedimiento de Aplicación	TOPSIS evalúa el contexto en una matriz de decisión que involucra las diferentes alternativas asociadas con los criterios o atributos estudiados. El procedimiento utilizado es el siguiente: 1. Construir la matriz de decisión normalizada y ponderada según los pesos relativos de cada criterio 2. Determinar la solución ideal positiva y negativa 3. Calcular las medidas de separación entre cada criterio con la solución ideal positiva y negativa 4. Calcular la proximidad relativa a la solución ideal 5. Categorizar el orden de preferencias
Referencias: (Hwang y Yoon, 1981); (Kalbar <i>et al.</i> , 2012a); (Kalbar <i>et al.</i> , 2012b)	

Modelos Conceptuales	
Descripción	Método de toma de decisiones objetivas únicas que forma parte de un sistema experto que facilita el proceso de toma de decisiones, en ellos se evalúan alternativas disponibles con resultados inciertos bajo una única situación subjetiva
Conceptualización del Modelo	Herramienta de planeación, que permite seleccionar las diferentes alternativas de solución a un problema planteado, partiendo de un amplio conjunto de posibles alternativas, estas van siendo depuradas a medida que se avanza en una tipología de árbol de decisión, el cual, mediante preguntas relacionadas con el caso de estudio, temas técnicos, contexto socioeconómico, entre otros, permiten llegar a la decisión final con la alternativa más aplicable. En ocasiones esta tipología de método es limitante dado que este ya tiene predefinidos aspectos claves los cuales pueden o no aplicar en el contexto y situación evaluada.
Procedimiento de Aplicación	El procedimiento de aplicación en estos modelos difiere dado que si se cuenta con la herramienta montada, la cual es específica en la mayoría de ocasiones para un contexto, su proceso consistiría en seguir la secuencia planteada por ella hasta llegar al resultado final según las opciones de alternativas con la que cuente este. Al no contar con la herramienta, es necesario tener un conocimiento del contexto, así como, conceptualizar las posibles alternativas y su interrelación con las variables importantes en cada proceso, lo que permita construir la guía de selección y permita realizar la evaluación cualitativa de cada escenario.
Referencias: (Bernal y Peña, 2003); (Zhou <i>et al.</i> , 2006); (Bernal, 2018)	

Apéndice C. Listado de artículos de revisión de tecnologías de tratamiento de aguas residuales en contextos similares

Artículo	Revista científica	Fecha	Tecnología de tratamiento
A novel integrated step-feed biofilm process for the treatment of decentralized domestic wastewater in rural areas of China	Journal of environmental sciences	2010	Tratamiento aerobio Lodos activados de alimentación escalonada
Enhanced denitrification in Downflow Hanging Sponge reactors for decentralised domestic wastewater treatment	Bioresource technology	2/01/2017	Biorreactores de capas múltiples esponja colgante de flujo descendente
Upgrading the biological nutrient removal process in decentralized WWTPs based on the intelligent control of alternating aeration cycles	Chemical engineering journal	10/01/2013	Tratamiento aerobio Zanja de Oxidación
Development of an innovative decentralized treatment system for the reclamation and reuse of strong wastewater from rural community: Effects of elevated CO2 concentrations	Journal of environmental management	09/15/2016	Digestor anaerobio + tratamiento natural en invernadero (Unidad de filtro percolador + unidad suelo-planta)
An innovative integrated system utilizing solar energy as power for the treatment of decentralized wastewater	Journal of environmental sciences	2/01/2013	zanja de oxidación con dos canales y un sistema fotovoltaico (PV) sin una batería de almacenamiento
Steel slag filter design criteria for phosphorus removal from wastewater in decentralized applications	Water research	10/15/2018	1. Lagunas aireadas 2. Filtro de escoria de acero
Full-scale sequencing batch reactor (SBR) for domestic wastewater: Performance and diversity of microbial communities	Bioresource technology	3/01/2013	Tratamiento aerobio Reactor por lotes de secuenciación
Performance and microbial diversity in a low-energy ANF-WDSRBC system for the post-treatment of decentralized domestic wastewater	Water	5/06/2017	Filtro anóxico y contactor biológico autorotativo
An ecological vegetation-activated sludge process (V-ASP) for decentralized wastewater treatment: system development, treatment performance, and mathematical modeling	Environmental science and pollution research	02/16/2016	Lodos activados por vegetación Lodos activados + Vegetación de Humedales Reactor de lotes por secuenciación de vegetación
A cost effective method for decentralized sewage treatment	Process safety and environmental protection	30/11/2014	Tratamiento anaerobio Tanque séptico

Anaerobic domestic wastewater treatment with bamboo carrier anaerobic baffled reactor	International biodeterioration & biodegradation	30/10/2008	Tratamiento anaerobio Digestor anaerobio de alta tasa
Novel two-stage vertical flow biofilter system for efficient treatment of decentralized domestic wastewater	Ecological engineering	30/03/2014	Tratamiento anaerobio Tanque séptico + Filtro anaerobio con zeolita
A cost effective method for decentralized sewage treatment	Process safety and environmental protection	11/01/2014	Tanque séptico avanzado
Performance of a pilot scale up-flow septic tank for on-site decentralized treatment of residential wastewater	Process safety and environmental protection	2/01/2010	Tratamiento anaerobio Tanque séptico de flujo ascendente
A Tire-Sulfur Hybrid Adsorption Denitrification (T-SHAD) process for decentralized wastewater treatment	Water research	09/15/2014	Reactor de lecho empacado con flujo ascendente, que contienen diversos materiales (desechos de neumáticos, gránulos de S, concha de ostra triturada) para evaluar adsorción de nutrientes
Energy analysis for onsite and offsite suburban wastewater	Environment, development and sustainability	11/27/2010	Evaluación del potencial energético de aguas residuales Producción de gas por Biodegradación de materia orgánica
Effects of hydraulic loading rate on pollutants removal by a deep subsurface wastewater infiltration system	Ecological engineering	30/09/2011	Sistema de tratamiento natural Infiltración subsuperficial
Integrated system with constructed wetlands for the treatment of domestic wastewaters generated at a rural property – Evaluation of general parameters ecotoxicity and cytogenetics	Ecological engineering	1/05/2018	UASB + Biofiltro anaerobio + Humedales Flujo Subsuperficial Horizontal
Capacity of an on-site recirculating vertical flow constructed wetland to withstand disturbances and highly variable influent quality	Ecological engineering	30/10/2011	Sistema de tratamiento natural Humedal Construido Flujo vertical con recirculación
Decentralized domestic wastewater treatment using intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: Impact of influent strengths	Bioresource technology	01/30/2015	Sistema de tratamiento natural Humedal Construido de Flujo Vertical
Performance of integrated household constructed wetland for domestic wastewater treatment in rural areas	Ecological engineering	06/30/2011	Sistema de tratamiento natural Humedales Construidos flujo Vertical

Life cycle assessment of integrated wastewater treatment systems with constructed wetlands in rural areas	Journal of cleaner production	04/012017	Reactor manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente + Filtro anaerobio + 4 Humedales flujo subsuperficial + 2 Fotorreactores
Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil	Journal of environmental management	2/01/2017	Sistemas de tratamiento natural Revisión de estudios de Humedales artificiales para la eliminación de contaminantes de aguas residuales en Brasil
Performance of the Iron-Caron Coupling Constructed Wetland for Rural Sewage Treatment	Earth and environmental science	2016	Sistema de tratamiento natural Humedales construidos de acoplamiento hierro-carbono
Development of natural and ecological wastewater treatment system for decentralized community in Korea	Paddy and water environment	01/23/2008	Biofiltro absorbente + Humedales flujo ascendente y descendente
Applicability of a Septic Tank/Engineered Wetland Coupled System in the Treatment and Recycling of Wastewater from a Small Community	Environmental management	02/14/2005	Tanque séptico + Humedales
Constructed wetlands as sustainable ecotechnologies in decentralization practices: a review	Environmental science and pollution research	11/03/2015	Revisión de parámetros de humedales como eco tecnología para el tratamiento de aguas residuales
Decentralized light greywater treatment using aerobic digestion and hydrogen peroxide disinfection for non-potable reuse	Journal of cleaner production	07/15/2015	Digestión aerobia (lodo activado) + desinfección con peróxido de hidrógeno
Decentralized two-stage sewage treatment by chemical–biological flocculation combined with microalgae biofilm for nutrient immobilization in a roof installed parallel plate reactor	Bioresource technology	02/28/2013	Filtro anaerobio + Adsorción química-biológica
Grey water reclamation by decentralized MBR prototype	Resource, Conservation and Recycling	3/01/2013	Lodo activado convencional + Membrana de Ultrafiltración + Cloración
Start-up of decentralized MBRs	Desalination	01/31/2012	Guía de referencia Biorreactor de membrana
In situ coagulation versus pre-coagulation for gravity-driven membrane bioreactor during decentralized sewage treatment: Permeability stabilization, fouling layer formation and biological activity	Water research	12/01/2017	Comparación eficiencia: 1. Biorreactor de membrana accionado por gravedad i) coagulación en sitio, ii) pre coagulación, iii) sin coagulante

Effective biodegradation of organic matter and biogas reuse in a novel integrated modular anaerobic system for rural wastewater treatment: A pilot case study	Chemical engineering & processing: Process Intensification	9/01/2017	Tratamiento físico químico Digestión anaerobia + filtración membrana
A decentralized wastewater treatment system using microbial fuel cell techniques and its response to a copper shock load	Bioresource technology	9/01/2013	Tratamiento físico químico Técnica de celda de combustible microbiano
Performance of the biosorptive activated sludge (BAS) as pre-treatment to UF for decentralized wastewater reuse	Bioresource technology	3/01/2014	Tratamiento físico químico Lodo activado biosortivo + Ultrafiltración
Techno-economic analysis of a decentralized wastewater treatment plant operating in closed-loop. A Finnish case study	Journal of water process engineering	10/01/2018	Tratamiento físico químico Escenario 1: Ultrafiltración y desinfección con luz ultravioleta Escenario 2: Esc1 + Ósmosis inversa
Wastewater treatment, renovation and reuse for agricultural irrigation in small communities	Agricultural water management	1/01/1999	No referencia Modelo conceptual que evalúa agua residual tratada para irrigación
Comparative LCA of decentralized wastewater treatment alternatives for non-potable urban reuse	Journal of environmental management	1/11/2016	No referencia Consiste en un análisis de ciclo de vida, en donde se evalúan diferentes escenarios
Perspectives on sustainable wastewater treatment technologies and reuse options in the urban areas of the Mediterranean region	Desalination	2/01/2009	Revisión de tecnologías Humedales construidos UASB Tratamiento acuíferos del suelo
Opportunities for decentralized treatment, sewer mining and effluent re-use	Desalination	1/08/1996	Revisión de tecnologías Micro filtración Ósmosis inversa
Application of wastewater treatment in sustainable design of green built environments: A review	Renewable and sustainable energy reviews	9/01/2015	Revisión de tecnología Membrana Híbrida
The effect of hydraulic retention time in onsite wastewater treatment and removal of pharmaceuticals, hormones and phenolic utility substances	Science of the total environment	03/15/2018	1. Biofilm 2. Biofilm + Lodo Activado
Exurban housing development, onsite wastewater disposal, and groundwater vulnerability within a changing policy context	Landscape and urban planning	11/01/2017	Revisión Tecnologías de Tratamiento de aguas residuales en sitio Wisconsin Estados Unidos
Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities: Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds	Journal of cleaner production	9/10/2017	Comparación de metodologías: 1. Lodos activados 2. Humedales híbridos 3. Estanque de algas de alta tasa

Comparative analysis of effluent water quality from a municipal treatment plant and two on-site wastewater treatment systems	chemosphere	6/01/2013	Comparación de metodologías: 1. Lodos activados centralizada 2. Tratamiento aerobio avanzado en sitio 3. Sistema Séptico en sitio
Current status of urban wastewater treatment plants in China	Environment international	07/30/2016	Revisión de tecnologías de tratamiento actuales en China
An evaluation of the sustainability of onsite wastewater treatment systems for nutrient management	Water research	09/15/2017	Influencia de efluente de nutrientes en plantas de tratamiento en sitio
Comparison of the design criteria of 141 onsite wastewater treatment systems available on the French market	Journal of environmental management	06/15/2018	Revisión de sistemas descentralizados en Francia
Wastewater and reuse		4/01/2018	Revisión conceptual general del tratamiento de aguas residuales
Wastewater as a resource: Strategies to recover resources from Amsterdam's wastewater	Resource, Conservation and Recycling	10/01/2016	Gestión Aguas residuales Amsterdam
To centralise or to decentralise: An overview of the most recent trends in wastewater treatment management	Journal of environmental management	2/01/2012	Conceptualización sistemas centralizados y descentralizados
Small wastewater treatment plants in Austria – Technologies, management and training of operators	Ecological engineering	9/01/2018	Gestión del tratamiento de aguas residuales en Austria
Wastewater and greywater reuse on irrigation in centralized and decentralized systems — An integrated approach on water quality, energy consumption and CO2 emissions	Science of the total environment	09/15/2014	Revisión de factores críticos en sistemas de reutilización centralizados y descentralizados
Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries	Journal of environmental management	1/01/2009	Revisión de tecnologías de tratamiento ventajas/desventajas, conceptualización
Potential of decentralized wastewater management for urban development: Case of Bangkok	Habitat international	1/01/2012	Revisión de tecnologías en tres casos de estudio: 1) Lodo activado 2) Laguna aireada y estanque de estabilización 3) Zanja de oxidación
Cost comparison of centralized and decentralized wastewater management systems using optimization model	Journal of environmental management	5/01/2018	Gestión de aguas residuales Centralizado: Lodos activados Descentralizado: Reactor anaerobio alta tasa + Filtro anaerobio

A review of phosphorus removal technologies and their applicability to small-scale domestic wastewater treatment systems	Frontiers in environmental science	02/22/2018	Revisión de tecnologías de tratamiento para eliminación de fósforo
Integrated, decentralized wastewater management for resource recovery in rural and peri-urban areas	Resources	06/15/2017	Revisión de tecnologías, descripción de factores de sustentabilidad de diversos sistemas de tratamiento
Decentralized wastewater treatment technologies and management in Chinese villages	Frontiers in environmental science	12/02/2013	Revisión de tecnologías aplicables en zonas rurales de China
Evaluation of onsite wastewater treatment technologies using sustainable development criteria	Clean technologies and environmental policy	4/11/2002	Revisión de tecnologías con base en criterios de sustentabilidad
Status of decentralised wastewater treatment systems and barriers for implementation of nature-based systems in central and eastern Europe	Environmental science and pollution research	10/25/2014	Estado actual de sistemas de tratamiento en países de Europa central y oriental
Decentralized domestic wastewater systems in developing countries: the case study of Harare (Zimbabwe)	Applied water science	6/01/2017	Análisis y gestión de sistemas descentralizados
Effectiveness of wastewater management in rural areas of developing countries: a case of Al-Chouf Caza in Lebanon	Environmental monitoring and assessment	01/30/2009	Revisión de tecnologías Lodos activados Lagunas de estabilización Tanque séptico
Evaluation of On-site Wastewater Disposal Systems in Mississippi Coastal Areas	Water, Air & Soil pollution	11/09/2011	Revisión de tecnologías 1.Filtro de planta de roca 2.Tanque séptico + campo de lixiviación 3.Tratamiento aerobio + irrigación superficial 4.Tanque séptico + infiltración de arena
Wastewater reuse in the countries of the Gulf Cooperation Council (GCC): the lost opportunity	Environmental monitoring and assessment	10/12/2017	Revisión de estrategias para el tratamiento de aguas residuales y su reúso

Apéndice D. Listado de artículos de aplicación de métodos de análisis de decisión para la selección de alternativas tecnológicas de tratamiento de aguas residuales

Artículo		Indicadores evaluados	
TOPSIS			
Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach	Potencial de calentamiento global Potencial de eutrofización Costos de capital, operación y mantenimiento Requisito de tierra	Confiabilidad Durabilidad Flexibilidad Aceptabilidad Participación Replicabilidad	
Journal of environmental management 10/08/2012	# personas para operación de planta	Promoción del comportamiento sostenible	
Technology assessment for wastewater treatment using multiple-attribute decision-making	Potencial de calentamiento global Potencial de eutrofización Costos de capital, operación y mantenimiento Requisito de tierra	Confiabilidad Durabilidad Flexibilidad Aceptabilidad Participación Replicabilidad	
Technology in society 2/10/2012	# personas para operación de planta	Promoción del comportamiento sostenible	
Decision support in disinfection technologies for treated wastewater reuse	Costos de implementación Costos de mantenimiento Ahorro de energía Generación de residuos	Remoción turbidez Remoción DBO Remoción Cloruros Coliformes totales y fecales	
Journal of cleaner production 30/06/2009	Emisión de gases		
A fuzzy approach for the assessment of wastewater treatment alternatives	Calentamiento global Eutrofización Costos Requisitos de área Requerimientos de energía	Confiabilidad Sustentabilidad Flexibilidad	
Engineering letters 18/05/2016			
Life cycle-based decision support tool for selection of wastewater treatment alternatives	Potencial de calentamiento global Potencial de eutrofización Costos de capital, operación y mantenimiento Requisito de tierra	# personas para operación de planta Confiabilidad Durabilidad Flexibilidad Aceptabilidad	Participación Replicabilidad Promoción del comportamiento sostenible
Journal of cleaner production 15/01/2016			
A multi expert decision support tool for the evaluation of advanced wastewater treatment trains: A novel approach to improve urban sustainability	Costos de capital, operación y mantenimiento Requerimiento de tierra Adaptabilidad Facilidad construcción y desarrollo Nivel de complejidad	Consumo de energía Impacto ambiental Aceptación de la comunidad Calidad de agua	
Environmental science and policy 6/09/2018			

AHP			
Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: A composite indicator approach Science of total environment 8/08/2014	Costo de Inversión, operación y mantenimiento Eliminación de materia orgánica Eliminación Sólidos Suspendidos Eliminación Nitrógeno	Eliminación fosforo Consumo energía Área de tierra requerida Producción de lodos Potencial reúso agua Potencial recuperar productos	Confiabilidad Olores Ruido Impacto visual Aceptación pública Complejidad
The influence of expert opinions on the selection of wastewater treatment alternatives: A group decision-making approach Journal of environmental management 17/06/2013	Potencial de calentamiento global Potencial de eutrofización Costos de capital, operación y mantenimiento Requisito de tierra	# personas para operación de planta Confiabilidad Durabilidad Flexibilidad Aceptabilidad	Participación Replicabilidad Promoción del comportamiento sostenible
The application of a hybrid model for identifying and ranking indicators for assessing the sustainability of wastewater treatment systems Sustainable production and consumption 20/09/2016	Potencial de eutrofización Costos de construcción, tierra, operación, mantenimiento, energéticos, personal, eliminación de residuos Requisito de tierra Habilidad profesionales operación y mantenimiento Requisitos de equipos especiales Flexibilidad Eficiencia del sistema Acceso mano de obra local	Requerimiento de energía Requisitos de materiales Confiabilidad Complejidad de construcción, instalación y puesta en marcha Complejidad operación y mantenimiento Mejora, amplificación capacidad Sustentabilidad Esperanza de vida sistema Reutilización óptima de recursos Preferencias locales	Viabilidad de instalación Generación olores, gases Salud y seguridad laboral Aceptabilidad social Desarrollo local Opinión de población local Satisfacción del trabajo Contribución al empleo Nivel de tratamiento Afectación por variación del afluente Eliminación DQO, DBO, SST, SSD, metales pesados, nutrientes, grasas y aceites Desempeño a variación del clima
Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis Journal of environmental management 27/12/2005	Costo de capital, operación y mantenimiento Requerimiento de área Habilidades profesionales requeridas operación y mantenimiento	Estabilidad de la planta Madurez de la tecnología Eficacia de eliminación de contaminantes N y P	

Selection of wastewater treatment process based on the analytical hierarchy process and fuzzy analytical hierarchy process methods	Costo de capital, mantenimiento y reparación, personal, energético, operación y mantenimiento Requisito de tierra Aplicabilidad Funcionamiento Fiabilidad	Resistencia a choques hidráulicos y de carga orgánica Flexibilidad de operación Operación y mantenimiento simple Generación de olores Coordinación con clima e instalaciones locales
International journal of environmental science and technology 21/12/2010		

Application of the analytic hierarchy process and the analytic network process for the assessment of different wastewater treatment systems	Costos de inversión, operación Fondos públicos Aspectos de mejora Ahorro de energía Requisitos de área Disponibilidad de recursos	Complejidad del sistema Actividades de gestión Uso de recursos naturales Ruido Opinión pública Impacto visual Impacto de olor
Environmental modelling & software 3/04/2011		

Decision support systems in water and wastewater treatment process selection and design: A review	No referencia criterios aplicados
---	-----------------------------------

Water science & technology
2009
DSS

An integrated knowledge-based and optimization tool for the sustainable selection of wastewater treatment process concepts	Calentamiento global Eutrofización Costos de inversión, operación y mantenimiento Flexibilidad Simplicidad Eliminación DQO Eliminación fosforo Producción de biogás Impacto visual Olor potencial
Environmental modelling & software 23/06/2016	

Validation of a decision support tool for wastewater treatment selection	Costos de operación y mantenimiento Características del terreno Aspectos tecnológicos Aspectos constructivos Objetivos de tratamiento Impacto ambiental Factores demográficos y socioculturales Capacidad y disponibilidad de pago Factores climáticos
Journal of environmental management 29/09/2016	

Assessment of wastewater treatment plant design for small communities: Environmental and economic aspects	Análisis costo beneficio (Inversión, Operación y mantenimiento) Análisis de beneficios ambientales Características del efluente (DQO, SS, N, P)	
Science of total environment 9/04/2012		
Benchmarking wastewater treatment plants under an eco-efficiency perspective	Potencial calentamiento global Potencial de eutrofización Costos de construcción, tratamiento y operacionales	
Science of total environment 16/05/2016		
An evaluation of the sustainability of onsite wastewater treatment systems for nutrient management	No referencia criterios aplicados	
Water research 4/05/2017		
Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities: Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds	Requerimientos de materiales de construcción, de operación Generación de lodos Emisiones de CO2, CH4, N2O, NH3	
Journal of cleaner production 21/05/2017		
Development of a DSS for the generation of WWTP configuration alternatives	Costos de inversión, operación, energía, Mantenimiento Estabilidad de procesos, Frecuencia de problemas	Generación de impactos: Olores, ruidos, impacto visual Calidad de agua esperada Remoción de grasas y aceites, DQO, sustancias tóxicas, nutrientes
International environmental modelling and software society 1/07/2010		
Implementation of a knowledge-based methodology in a decision support system for the design of suitable wastewater treatment process flow diagrams	Costos Inversión, Operación, mantenimiento Nivel de especialización personal Generación de subproductos Impactos: Olor, ruido, impacto visual, ambientales	Calidad de agua afluente (personas y carga) Calidad de agua efluente (eliminación DBO y Nt)
Journal of environmental management 10/08/2012		
Objetivos multiples		
Development and Application of a User-Friendly Decision Support Tool for Optimization of Wastewater Treatment Technologies in India	Gastos de capital Gastos operativos Requisitos de tierra Requisitos Mano de obra Consumo de energía Producción de lodos	
International conference of hydro informatics 1/09/2018		

Multi-criteria group decision-making based sustainability measurement of wastewater treatment processes

Environmental impact assessment review
8/04/2017

Costos de capital, Operación y mantenimiento
Operabilidad y simplicidad
Madurez
Confiabilidad

Efecto en la mejora de calidad de agua
Tierra ocupada
Aceptación pública
Trabajos añadidos
Apoyo gubernamental

Modelos conceptuales			
Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domesticas por métodos naturales	Costos de inversión, O&M, del terreno Recuperación de recursos Topografía, Permeabilidad del suelo	Disponibilidad de terreno Generación de subproductos con potencial de aprovechamiento Eficiencia de la tecnología Facilidad O&M	Tamaño de población, Nivel educativo, Cobertura y cant. Agua potable, Existencia y tipo alcantarillado
Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales 1/10/2003	Nivel freático Recursos locales, Requerimientos y disponibilidad de insumos químicos Requerimiento energía Disponibilidad mano de obra local Necesidad equipos mecánicos Disponibilidad local materiales construcción Impacto ambiental del sistema	Datos de calidad mínima esperada efluente Expectativas de calidad de tratamiento Nivel de tratamiento Descarga efluente Estándares reúso agricultura Estándares de calidad efluente	Capacidad de pago, Tarifa, Disponibilidad de pagar Origen del agua residual, Composición del agua residual, Caudal del agua residual Temperatura, Precipitación, Vientos
Modelo conceptual de Selección tecnológica para el control de contaminación por aguas residuales domésticas en localidades colombianas menores de 30.000 habitantes, SELTAR	Costos de inversión, terreno, administración, operación y mantenimiento ASPECTOS TECNOLÓGICOS Caudal, Temperatura, área disponible, nivel freático, permeabilidad, pendiente del terreno REUSO Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS Actividades con potenciales de reúso, Manejo de lodos	OBJETIVOS AMBIENTALES: Calidad fisicoquímica y microbiológica del afluente y efluente, Aspectos específicos del cuerpo receptor, uso del suelo	ASPECTOS SOCIOCULTURALES Aceptación de la comunidad, Disponibilidad de energía eléctrica, materiales de construcción, mano de obra Capacidad de gestión Acceso a centro regional urbano Capacidad y disponibilidad de pago
Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales	Costos de inversión, operación y mantenimiento Relación de otros proyectos Participación local Área posible construida Requerimiento personal calificado Confiabilidad, Viabilidad,	Flexibilidad, Complejidad, Accesibilidad Requerimiento y análisis de controles Tratamiento y manejo de subproductos Consumo energía eléctrica Producción de lodos y biogás	Reúso aguas tratadas Generación de olores, ruido, espumas Impacto estético Estabilidad PTAR, Composición típica del AR Eficiencia de remoción de contaminantes Calidad requería del AR tratada
Tecnura 1/10/2015			

A conceptual model for decentralized municipal wastewater management	Costos de inversión, operación y mantenimiento de STAR	Recuperación de nutrientes, Disponibilidad de agua, Producción de lodos, Olor, ruidos, insectos, afectación del paisaje	Interés de las empresas de servicios públicos en administrar sistemas descentralizados
Water practice & technology 2018	Costos de inversión, operación y mantenimiento del sistema de alcantarillado Disponibilidad de área Objetivos de calidad distancia al sistema de tratamiento Condiciones topográficas TECNOLÓGICOS Reúso potencial, Cobertura sistema de alcantarillado, Nivel de centralización Requerimiento de energía,	Aceptación reúso Participación, operación y mantenimiento por parte de la comunidad Tamaño, distribución y densidad poblacional PLANEACIÓN Apoyo institucional para sistemas descentralizados	Existencia de áreas de expansión sin cobertura en administración de AR
Key issues for decentralization in municipal wastewater treatment	ECONÓMICO Costo de recolección y transporte, tratamiento, construcción, mantenimiento y operación, ambiental	Demanda de agua Producción y composición AR Eficiencia, Fiabilidad Recuperación y reutilización AR	SOCIALES Aceptación, Sensibilización social sobre el medio ambiente, Educación ambiental, Impacto a la salud, Cultura del agua
Cinara 12/09/2012	TECNOLÓGICOS Existencia del sistema de alcantarillado cobertura del sistema de alcantarillado Existencia de STAR STAR con cobertura Tecnologías no convencionales Combinación de tecnologías	combinación sistemas centralizados y descentralizados Cumplimiento de estándares de calidad Protección del medio ambiente Consumo de recursos Beneficios ambientales DEMOGRÁFICAS Tamaño, Distribución de población, Densidad, Tasa de crecimiento	PLANEACIÓN Urbanismo de planificación Distribución geográfica y uso del suelo Fortalecimiento de planes maestro y desarrollo urbano Refuerzo de la legislación Fortalecimiento de instituciones Reformas administrativas y políticas
Selecting appropriate wastewater treatment technologies using a choosing-by-advantages approach	Eliminación materia orgánica, sólidos suspendidos, Nitrógeno y fósforo Consumo de energía		
Science of total environment 28/12/2017	área requerida Producción de lodos Potencial de reutilización y recuperación de subproductos Confiabilidad Impacto de olor, ruido y visual Afectación pública Complejidad funcionamiento		