



Selección de tecnologías biológicas para el tratamiento de aguas residuales mediante Matriz de decisión (MD) y proceso de análisis jerárquico (AHP).

Tesis que presenta

Biol. Itzel García Cortes

Para obtener el grado de

Maestra en Ciencias (Energía y Medio Ambiente)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD IZTAPALAPA
DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
POSGRADO DE ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

Selección de tecnologías biológicas para el tratamiento de aguas

residuales mediante Matriz de decisión (MD) y proceso de análisis

TESIS

Que para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS (ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE)

PRESENTA:

Biól. Itzel García Cortes

Director:

Dra. María del Carmen Fajardo Ortiz

Co-director:

Dr. Ulises Rojas Zamora

Ciudad de México, 27 de noviembre de 2021

Agradecimientos

La maestría (Energía y Medio Ambiente) de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, pertenece al Padrón Nacional de Posgrados de Calidad del CONACyT con el convenio 688071; por lo que agradece la beca recibida.

Dedicatoria

A mi madre; te agradezco tus consejos y tus palabras, tu fortaleza para hacer frente a la adversidad. Sobreviviste a una enfermedad histórica y has logrado valerte por ti misma. Y cada día te admiró más y más. Pensar que te iba a perder me hizo replantearme mi camino, mi destino y el poder de las decisiones. El poder del NO que para mí es una palabra de dignidad y de amor propio. Me permite levantar mi cabeza en alto y ver que lo que tengo es honesto.

A mi hermano; que siempre me apoyo en estos duros años donde me dedique a hacer muchas cosas. En los momentos más críticos nos mostramos como tomadores de decisiones que saben que hacer sin importar lo que piensen los demás.

A Alejandro mi pareja: Te agradezco estos años que has estado aconsejándome y guiándome, gracias.

A mis familiares fallecidos por el SARS-CoV-2; cómo me hubiera gustado que estuviera físicamente presente en este momento de mi vida.

A Luis por su ayuda en este trabajo facilitando la información de Amecameca.

A la institución por darme los conocimientos necesarios desde que entre a Licenciatura.

Al Dr. Margarito Tapia por animarme hace muchos años a entrar a este posgrado.

A la Dra. Mónica Meraz por aceptarme en el área de remediación ambiental.

A mis directores; Gracias por las enseñanzas y por su paciencia en todo lo que fue este viaje llamado maestría.

A mis amigos del posgrado; me regresaron ese sentimiento de pertenencia y de grupo.

Directores

Dra. María del Carmen Fajardo Ortiz: Profesora titular C; Departamento de Biotecnología de Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.

Dr. Ulises Rojas Zamora: Profesor visitante titular C; Departamento de Ciencias Básicas de Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.



Escuela abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
Unidad Iztapalapa

Fecha : 25/10/2021
Página : 1/1

CONSTANCIA DE PRESENTACION DE EXAMEN DE GRADO

La Universidad Autónoma Metropolitana extiende la presente CONSTANCIA DE PRESENTACION DE EXAMEN DE GRADO de MAESTRA EN CIENCIAS (ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE) de la alumna ITSEL GARCIA CORTES, matricula 2191800381, quien cumplió con los 174 créditos correspondientes a las unidades de enseñanza aprendizaje del plan de estudio. Con fecha veintisiete de octubre del 2021 presentó la DEFENSA de su EXAMEN DE GRADO cuya denominación es:

Selección de tecnologías biológicas para el tratamiento de aguas residuales mediante Matriz de decisión (MD) y proceso de análisis jerárquico (ANP).

Debe mencionarse que la aprobación tiene un valor de 60 créditos y el programa consta de 234 créditos.

El jurado del examen ha tenido a bien otorgarle la calificación de:

APROBAR

JURADO

Presidenta

DRA. MONICA ALICIA MERAZ RODRIGUEZ

Secretario

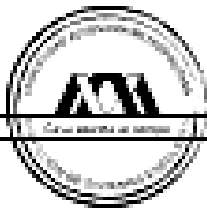
DR. ULISES DURAN HINOJOSA

Vocal

DR. ULISES ROJAS ZAMORA



selección de tecnologías biológicas para el tratamiento de aguas residuales mediante Matrix de decisión (MD) y proceso de análisis jerárquico (ANP).



ITZEL GARCÍA CORTÉS
ALIBINA

MAYRA

MAYRA ROSALVA SERENO DE LA PAZ
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

con base en la legislación de la Universidad Autónoma Metropolitana, en la Ciudad de México se presentaron a las 16:00 horas del día 27 del mes de octubre del año 2021 por VÍA REMOTA ELECTRÓNICA, los suscritos miembros del jurado designado por la Comisión del Posgrado:

DRA. MONICA ALICIA MÉRIZ RODRÍGUEZ
DR. ULISES SOLÍS ZAMORA
DR. ULISES DURÁN HINOJOSA

Bajo la presidencia de la primera y con carácter de Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS (ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE)

DE: ITZEL GARCÍA CORTÉS

y de acuerdo con el artículo 76 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

APROBAR

Acto continuo, la presidenta del jurado comunicó a la interesada el resultado de la evaluación y, en caso aprobatoria, le fue tomada la protesta.

DIRECTOR DE LA DIVISION DE CBI

DR. JESÚS ALBERTO DONDA TAPIA

PRESIDENTA

DRA. MONICA ALICIA MÉRIZ RODRÍGUEZ

VOCAL

DR. ULISES SOLÍS ZAMORA

SECRETARIO

DR. ULISES DURÁN HINOJOSA



Índice

| | |
|---|----|
| Nomenclatura | 13 |
| Resumen..... | 14 |
| Abstract | 16 |
| 1.INTRODUCCIÓN | 18 |
| 2.MARCO TEÓRICO..... | 20 |
| 2.2. Tratamiento de las aguas residuales | 21 |
| 2.3. Plantas de tratamiento biológico de aguas residuales..... | 22 |
| 2.3.1. Sistema de lodos activados..... | 23 |
| 2.3.2. Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB)..... | 24 |
| 2.3.1. Filtro anaerobio de flujo ascendente | 28 |
| 2.3.4. Humedales artificiales | 29 |
| 2.3.5 Lagunas de estabilización..... | 33 |
| 2.3.6 Fosas sépticas | 34 |
| 2.3.7. Biodiscos | 35 |
| 2.3.9. Desempeño de las tecnologías convencionales en la remoción de contaminantes..... | 36 |
| 2.4. Tratamientos biológicos avanzados de aguas residuales..... | 40 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| 2.4.1. | Biorreactores de membrana..... | 40 |
| 2.4.2. | Reactores de biopelícula..... | 42 |
| 2.5. | Herramientas analíticas para la selección del sistema de tratamiento de aguas residuales. 45 | |
| 3. | JUSTIFICACIÓN | 56 |
| 4. | OBJETIVO GENERAL | 58 |
| 4.1. | Objetivos específicos..... | 58 |
| 5. | METODOLOGÍA | 59 |
| 5.1. | Elección de casos de estudio | 60 |
| 5.1.1. | Amecameca | 60 |
| 5.1.2. | Complejo habitacional en la Alcaldía Iztacalco. | 61 |
| 5.3. | Identificar las problemáticas en cada caso de estudio..... | 63 |
| 5.4. | Seleccionar los criterios de evaluación | 63 |
| 5.5. | Alternativas de tratamiento | 64 |
| 5.6. | Matriz de decisión | 64 |
| 5.7. | Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) | 65 |
| 6.1. | Matriz de decisión, Caso Amecameca | 68 |
| 6.1.1. | Proceso de análisis jerárquico (AHP): Criterios vs Alternativas caso Amecameca..... | 75 |
| 6.2. | Matriz de decisión: Caso Iztacalco..... | 77 |
| 6.2.1. | Proceso de análisis jerárquico (AHP): Criterios vs Alternativas caso Iztacalco | 83 |
| 6.3. | Discusión de resultados..... | 85 |
| 6.3.1. | Caso Amecameca | 85 |
| 6.3.2. | Iztacalco | 87 |
| 6.4. | Matriz de decisión y Proceso de análisis jerárquico..... | 89 |
| 6.5. | Conclusiones | 89 |
| 6.6. | RECOMENDACIONES | 90 |
| 7. | BIBLIOGRAFIA..... | 91 |
| 7.1. | Referencias electrónicas..... | 100 |
| Anexo I A: | AHP; relación de coherencia Criterios contra criterios caso Iztacalco | 101 |
| Anexo I B: | AHP; relación de coherencia criterios contra criterios caso Iztacalco..... | 105 |
| Anexo II A: | AHP; Alternativas vs alternativas para cada criterio caso Amecameca..... | 109 |
| Anexo II B: | AHP; Alternativas vs alternativas para cada criterio caso Iztacalco | 133 |
| Anexo III: | Sistema de tratamiento con la mayor prioridad en el análisis Criterios vs alternativas. | 156 |

Índice de tablas

| Tablas | Página |
|--|---------------|
| 1. Eficiencias de remoción de los tratamientos convencionales de aguas residuales. | 38 |
| 2. Escala de Saaty | 48 |
| 3. Parámetros de diseño comunes para cada sistema. | 50 |
| 4. Dimensiones de los sistemas de tratamiento de aguas residuales | 51 |
| 5. Consumo energético | 52 |
| 6. Límites máximo permisible de contaminantes en la descarga de aguas residuales | 54 |
| 7. Comparación de los límites requeridos para el reúso de aguas tratadas | 55 |
| 8. Matriz de decisión: criterios vs problemáticas para el caso Amecameca | 69 |
| 9. Priorización del análisis AHP Criterios vs Criterios | 73 |
| 10. AHP Alternativas vs Criterios | 75 |
| 11. Matriz de decisión: Problemáticas vs Criterios para el caso Iztacalco | 78 |
| 12. Priorización del análisis AHP Criterios vs los Criterios | 81 |
| 13. Priorización de las alternativas | 83 |
| 14. λ_{\max} en relación con los criterios analizados | 84 |
| 15. Ventajas y desventajas del sistema MBBR | 86 |
| 16. Ventajas y desventajas del sistema UASB | 88 |

Índice de figuras

| Figuras | Página |
|---|---------------|
| 1. Etapas de una planta de tratamiento de aguas residuales. | 22 |
| 2. Sistema de lodos activados. | 24 |
| 3. Reactor UASB. | 27 |
| 4. Filtro Anaerobio de Alujo Ascendente (FAFA) | 28 |
| 5. Humedal artificial de flujo superficial. | 30 |
| 6. Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical. | 31 |
| 7. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal | 32 |
| 8. Sistema combinado de lagunas de estabilización. | 34 |
| 9. Biodiscos. | 35 |
| 10. Fosa séptica. | 36 |
| 11. Biorreactor de membrana: | 42 |
| a) Membrana interna | |
| b) Membrana externa. | |
| 12. Reactor de biopelícula | 44 |
| a) Pseudo homogénea | |
| b) Heterogénea | |
| 13. Matriz de decisión | 46 |
| 14. Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) | 47 |
| 15. Ubicación de la zona de estudio. | 58 |
| 16. Complejo habitacional en la Alcaldía Iztacalco. | 61 |
| 17. Resultado de la matriz de decisión caso Amecameca | 62 |
| 18. Diagrama de árbol AHP caso Amecameca | 70 |
| 19. Prioridades obtenidas caso Amecameca | 72 |
| 20. AHP Alternativas contra criterios caso Amecameca | 74 |
| 21. Resultado de la matriz de decisión para determinar la problemática más prioritaria caso Iztacalco | 76 |
| 22. Diagrama de árbol AHP caso Iztacalco | 79 |
| 23. Prioridades obtenidas caso Iztacalco | 80 |
| 24. AHP Alternativas contra criterios caso Amecameca | 82 |

Nomenclatura

DQO: (Demanda Química de Oxígeno)

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno

COD: Carbono Orgánico Disuelto,

SST: Sólidos Suspendidos Totales

SVT: Sólidos Volátiles Totales

TKN: Nitrógeno Total Kjeldahl

TRS: Tiempo de Retención de Sólidos

TRH: Tiempo de Retención Hidráulica

MD: Matriz de decisión

AHP: Proceso de análisis jerárquico

LA: Sistema de lodos activados

UASB: Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB)

H: Humedales

LF: Lagunas facultativas

LM: Lagunas de maduración

LEA: Lagunas anaerobias

FS: Fosas sépticas

FAFA: Filtro anaerobio de flujo ascendente

BRM: Biorreactores de membrana

RB: Reactores de biopelícula MBBR

TRS: Tiempo de residencia de sólidos

TRH: Tiempo de retención hidráulica



OLR: Carga orgánica volumétrica (OLR por sus siglas en inglés)

Resumen

La ciudad de México y área metropolitana se encuentra en un estado de crisis con respecto a la gestión y disponibilidad de los recursos hídricos, la cual ha conducido a un desabasto creciente en varias regiones. Una de las alternativas de mayor impacto para remediar dicha situación está constituida por la instalación de sistemas de depuración de aguas residuales, con lo cual se lograría disminuir el impacto de la descarga de aguas contaminadas en los cuerpos receptores y generar agua con potencial de reusó.

El proceso de instalación de sistemas de tratamiento debe comenzar con la selección de la tecnología más adecuada, tomando como base las características propias de la zona en donde desee instalarse. Para ello, se deben considerar las diferentes tecnologías de tratamiento que existen, considerando la demanda de área para su instalación y energía para su operación, los costos de capital y de mantenimiento, y su eficacia en la depuración de las aguas residuales.

Por lo antes expuesto, el objetivo de este trabajo fue hacer uso de herramientas de decisión (matriz de decisión y proceso de análisis jerárquico) para la elección del sistema de tratamiento de aguas residuales más idóneo para una zona rural (Municipio de Amecameca, Edo. Mex) y una zona urbana (Alcaldía de Iztacalco, CDMX). Para cada caso se eligieron seis problemáticas por atender, seis criterios relacionados y diez alternativas de tratamiento. La matriz de decisión mostró la problemática prioritaria por atender, siendo para el caso

Amecameca que el agua tratada va a ser usada para riego y para Iztacalco la problemática prioritaria a atender fue que los cambios de la concentración de contaminantes debido a la temporada de lluvias, lo cuales influyen significativamente sobre la elección del sistema de tratamiento a elegir en cada caso. Tomando en cuenta estas problemáticas, se realizó el análisis jerárquico en ambos casos de estudio. Los resultados obtenidos fueron, que, para el caso de la zona rural la opción de tratamiento más adecuada es el reactor de biopelícula (MBBR), mientras que para la zona urbana la alternativa de tratamiento es el reactor UASB. Por lo tanto es importante continuar con este tipo de trabajos ya que la información que hay sobre la implementación de estas herramientas en temas ambientales es muy pobre.



Abstract

Mexico City and the metropolitan area is in a state of crisis regarding the management and availability of water resources, which has led to a growing shortage in several regions. One of the alternatives with the greatest impact to remedy this situation is the installation of wastewater treatment systems, which would reduce the impact of the discharge of contaminated water into the receiving bodies and generate water with the potential to reuse.

The process of installing treatment systems must begin with the selection of the most appropriate technology, based on the characteristics of the area where you want to be installed. To do this, the different treatment technologies that exist must be considered, considering the demand of area for its installation and energy for its operation, capital and maintenance costs, and its effectiveness in the purification of wastewater.

Therefore, the objective of this work was to make use of decision tools (decision matrix and hierarchical analysis process) for the choice of the most suitable wastewater treatment system for a rural area (Municipality of Amecameca, Edo. Mex) and an urban area (Iztacalco, CDMX). For each case, six problems were chosen to be addressed, six related criteria and ten treatment alternatives. The decision matrix showed the priority problem to be addressed, being for the Amecameca case that the treated water will be used for

irrigation and for Iztacalco the priority problem to be addressed was that the changes in the concentration of pollutants due to the rainy season, which significantly influence the choice of the treatment system to choose in each case. Considering these problems, the hierarchical analysis was carried out in both case studies. The results obtained were that, in the case of the rural area, the most appropriate treatment option is the biofilm reactor (MBBR), while for the urban area the treatment alternative is the UASB reactor. Therefore, it is important to continue with this type of work since the information there is on the implementation of these tools in environmental issues is scarce.



1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día en México, el problema ambiental generado por el mal manejo de las aguas residuales representa un reto ambiental y de salud pública. Las tecnologías instaladas para su tratamiento en las diferentes plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) presentan problemas de operación debido a que son, en muchos casos, obsoletas. Por lo tanto, se requiere de un mantenimiento mayor, actualización o reconversión tecnológica (Olguín y col., 2007).

Los futuros sistemas de tratamiento deben ir encaminados hacia la sustentabilidad, este problema es complejo de atender debido a que se deben considerar diversos factores como técnicos, geológicos, biológicos, y económicos; hasta factores sociales, tales como el acceso de la comunidad a los servicios, el número de habitantes por casa habitación, así como el nivel de impacto (Sosa, 2020).

En el mercado actual existe una lista amplia de tecnologías de tratamiento de aguas residuales, desde sistemas biológicos convencionales como las fosas sépticas y sistemas de lodos activados, hasta sistemas avanzados como la ozonificación, osmosis inversa, fotooxidación, foto-Fenton, entre otros. Cada uno de estos sistemas presenta características particulares con respecto a la eficiencia de remoción de contaminantes, demanda de área y de energía.

La selección de un nuevo sistema de tratamiento de aguas residuales es compleja, debido a que se deben considerar las distintas problemáticas a atender, así como las posibles alternativas de tratamiento. Algunas herramientas que pueden ayudar a la selección de la alternativa de tratamiento son la matriz de decisión (MD) y el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés).

Con base en lo anterior, en este trabajo se analizan distintos sistemas biológicos de tratamiento bajo estas metodologías, con el objetivo de seleccionar el sistema más adecuado para tratar las aguas residuales en dos casos particulares, uno en una zona urbana y otro en una zona rural.



2. MARCO TEÓRICO

2.1. Recursos hídricos y su situación actual

La extracción extensiva de agua ha impactado de manera negativa en el balance de las cuencas y acuíferos locales y vecinos que sirven de fuentes de abastecimiento de agua potable a la CDMX, generando daños ambientales críticos. La situación se agrava al considerar el envejecimiento de la infraestructura, los costos de operación, la falta de inversión en mantenimiento y rehabilitación han llevado al sistema de abastecimiento a un punto crítico (Escolero y col, 2016).

También está presente la problemática del manejo del agua residual en la Ciudad de México y el área metropolitana, el tratamiento que se le da en las plantas de tratamiento, las cuales son instalaciones en donde se llevan a cabo una cadena de procesos para separar y eliminar todos los contaminantes presentes en el agua residual, mediante procesos fisicoquímicos y biológicos (Lenntech, 2021). De acuerdo con la información reportada en el Informe Estadístico de los Recursos Hídricos de México del 2018 (CONAGUA), se hace mención que, durante el año 2017, las 2526 plantas en operación trataron 135.6 m³/s, equivalente al 63% de los 215.2 m³/s recolectados a través de los sistemas de alcantarillado.

Los sistemas de tratamiento más usados en México son: lodos activados con un 52.90 %, sistemas duales, que SEMARNAT define como: “la aplicación de dos sistemas de

tratamiento biológico en secuencia a fin de obtener una mayor eficiencia de remoción de contaminantes” con un 17.19%, las lagunas de estabilización con un 10.40 %, las lagunas aireadas con un 5.22 %, los filtros biológicos con un 3.88.%, el tratamiento primario avanzado con un 3.31 %, el reactor anaerobio de flujo ascendente con un 0.89 % y otros sistemas no especificados el 6.18 % (CONAGUA, 2018).

En el caso de México, se sigue trabajando con el marco normativo vigente que afortunadamente ya va a tener una renovación para finales de este año 2021 (Actualización de la NOM-001-SEMARNAT-1996). Se cuenta con normas complementarias que han ido legislando otros contaminantes como la NOM-127-SSA1-1994, que hace referencia a los contaminantes emergentes, que son compuestos de distinta naturaleza química cuya presencia en el ambiente genera preocupaciones por las posibles consecuencias de la salud humana.

2.2. Tratamiento de las aguas residuales

Como se mencionó anteriormente, el Tratamiento de Aguas Residuales (TAR) consiste en eliminar la mayor cantidad de sus contaminantes presentes en el agua en forma disuelta, particulada y coloidal (Manahan, 2017). En este sentido, existen diferentes clasificaciones de efluentes con base en su origen y composición fisicoquímica (municipales e industriales entre otros). El principal objetivo en el tratamiento de aguas residuales es la remoción de contaminantes antes de su descarga a los cuerpos receptores o bien, para su reutilización en otros procesos, y la remoción de contaminantes específicos generados en cada proceso, como los metales pesados o los colorantes azoicos (Manahan, 2017).

Los sistemas de tratamiento para el agua residual tanto municipal como industrial se clasifican en: Físicos, Químicos y Biológicos los cuales se describen a continuación.

Físicos: Consisten en la separación de sólidos como arenas y arcillas que influyen en la turbidez del agua, a través de desarenadores y cribas de diferente tamaño (Romero-Rojas, 2004).

Químicos: Los procesos químicos se emplean para la precipitación de sólidos suspendidos y coloidales, desinfección del agua residual, y control de olores (Metcalf y col., 1995).

Biológicos: Los tratamientos biológicos de aguas residuales constituyen una serie de importantes procesos que tienen en común el aprovechamiento de las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias), favoreciendo la eliminación de nutrientes (materia orgánica, compuestos nitrogenados y compuestos fosforados). Estos pueden ser procesos aerobios, anaerobios o anóxicos; para remover los contaminantes, a productos metabólicos inocuos asimilados en biomasa o acumulados en organismos (plantas y animales) (Madigan y col., 2009).

La inocuidad y el valor agregado que se le puede dar a los subproductos y residuos de los procesos biológicos, así como los costos energéticos de estos, los vuelven idóneos para ser analizados desde un punto de vista sustentable.

2.3. Plantas de tratamiento biológico de aguas residuales

Las plantas de tratamiento de aguas residuales basadas en sistemas biológicos están diseñadas a partir de un tren de tratamiento, con el cual se logra la remoción de contaminantes. El tren de tratamiento comienza con la separación de material particulado (Manahan, 2017) mediante procesos físicos como son, rejillas y cribas para eliminar objetos de gran tamaño, esta etapa corresponde al tratamiento primario (Figura 1). Posteriormente el efluente se mantiene en reposo para la sedimentación del material particulado en el fondo de los tanques, y una vez separado se pasa el efluente a la siguiente etapa de tratamiento secundario (Madigan y col., 2009). En esta etapa se remueven los contaminantes solubles a partir de la actividad metabólica de microorganismos aerobios y anaerobios, los cuales consumen la materia orgánica presente en las aguas residuales (Manahan y col., 2017). El efluente de esta etapa es transportado hacia la unidad de tratamiento terciario, cuyo objetivo es complementar los procesos anteriormente indicados para lograr efluentes con las menores concentraciones de contaminantes y patógenos, para que pueda ser reusada con diferentes fines, como recarga de acuíferos, recreación, entre otros.

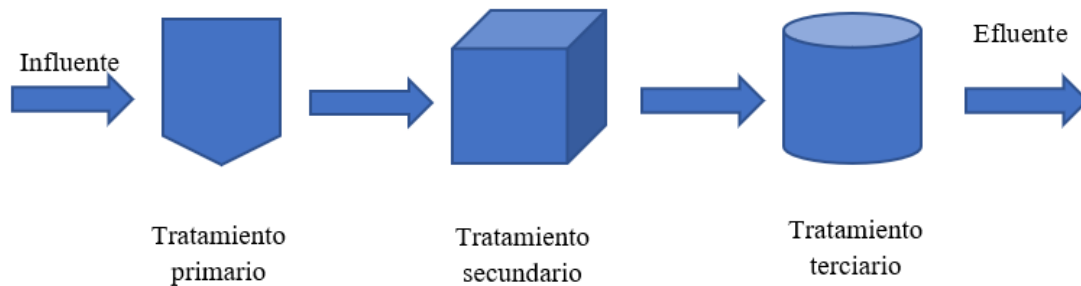


Figura 1. Etapas de una planta de tratamiento de aguas residuales (Oña y col., 2014)

A continuación, se abordará una breve descripción de los sistemas de tratamiento biológico más utilizados.

2.3.1. Sistema de lodos activados

Uno de los sistemas biológicos de mayor aplicación en el mundo es el de lodos activados, el cual aprovecha la actividad de diversos microorganismos heterótrofos, bacterias, protozoarios y otros microorganismos, los cuales interactúan entre sí estableciendo un equilibrio ecológico, formando estructuras en forma de flóculos, con la capacidad de consumir la materia orgánica y convertirla en compuestos más simples (Cerraga, 2014; Jördening y col., 2005). Los lodos activados dependen únicamente de la actividad metabólica de los microorganismos, los cuales utilizan los residuos orgánicos como sustrato, para síntesis celular, removiendo así la materia orgánica del agua residual (Cerraga y col., 2014).

El sistema de lodos activados está integrado por las siguientes unidades de tratamiento:

- 1) Un tanque de aireación en el que la biomasa se mezcla con las aguas residuales y se le suministra oxígeno para oxidar la materia orgánica;



Reacción de lodos activados

- 2) Un clarificador a la salida del reactor, en el cual la biomasa es removida de las aguas residuales tratadas por sedimentación.
- 3) Recirculación continua de lodo al tanque de aireación y
- 4) La eliminación del exceso de lodo para mantener la concentración adecuada de licor mezclado (Figura 2) (Jördening y col., 2005).

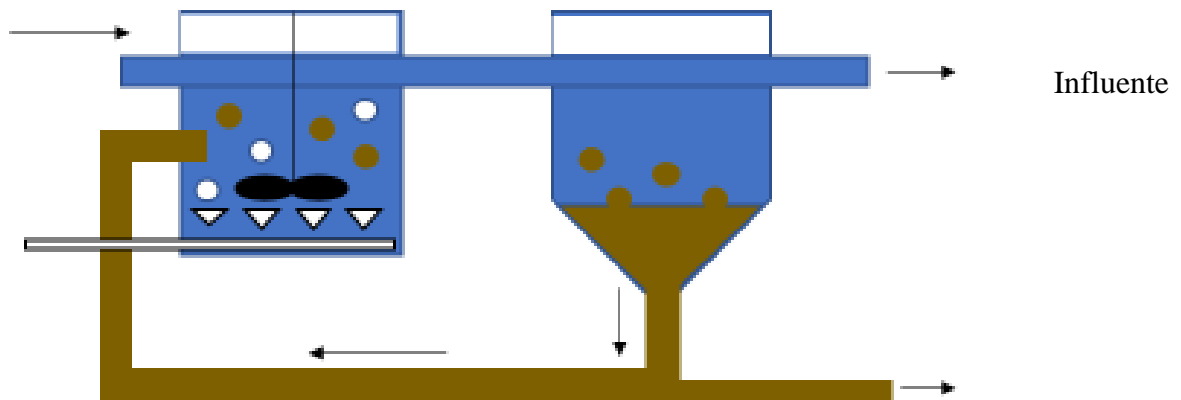


Figura 2. Sistema de lodos activados (Adaptado de Cerraga y col., 2014)

Los parámetros de operación y de eficiencia de remoción de este sistema se pueden consultar en las tablas 1 y 3.

Un proceso utilizado para mejorar los rendimientos en la remoción de contaminantes es la bioaumentación, la cual consiste en inocular el agua contaminada con microorganismos con actividades específicas, que en muchos casos están acompañados de factores de crecimiento específicos, con el objetivo de lograr la mineralización de contaminantes específicos (Metcalf y col., 1995). La bioaumentación se destaca como una de las tantas formas de optimización para el tratamiento de aguas residuales donde se eliminan olores, se reduce el tiempo de arranque del proceso de remoción y el TRH, y se favorece la degradación de sustancias recalcitrantes (National Research Council, 1993).

2.3.2. Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB)

Este sistema consiste en un tanque que es alimentado con el agua residual por la parte inferior, y fluye en sentido ascendente a través del manto de lodos constituido por gránulos conformados principalmente de biomasa anaerobia (Gandarillas y col., 2017). Al entrar, el agua residual entra en contacto con el manto de lodos, los microorganismos presentes en éste consumen la materia orgánica, reduciendo así la concentración de contaminantes en el agua tratada. El proceso biológico por medio del cual se lleva a cabo la remoción de contaminantes es la digestión anaerobia, cuyos productos finales son el metano (CH_4) y el

dióxido de carbono (CO₂). La mezcla de gases es capturada en una bóveda de recolección, en la parte superior del reactor (Gandarillas y col., 2017). El proceso de digestión anaerobia mediante el cual se remueven los contaminantes consta de 4 etapas; la hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis. Estas se describen a continuación:

Hidrolisis: en esta etapa los compuestos orgánicos complejos se degradan a compuestos con estructuras simples a partir de la acción de exoenzimas excretadas por bacterias (Lenntech, 2021).

Acidogénesis: Los monómeros producto de la hidrolisis atraviesan la pared celular de las bacterias acidogénicas para fermentarse, formando ácidos grasos volátiles de cadena corta, principalmente ácido acético, propiónico, butírico, así como sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono e hidrógeno (Gandarillas y col., 2017).

Acetogénesis: en esta etapa los ácidos grasos volátiles generados en la fase previa son digeridos por las bacterias hetero-acetogénicas para producir ácido acético como producto principal (Gandarillas y col., 2017).

Metanogénesis: Es la última etapa de la digestión anaerobia donde las arqueas metanogénicas usan los productos intermedios de las etapas previas y los convierten en metano, dióxido de carbono y agua. La metanogénesis es sensible al pH el rango es de 6.5 y 8.0. Este proceso se lleva a cabo mediante dos vías: la síntesis hidrogenotrófica, en la que el metano es producido a partir del dióxido de carbono y el hidrógeno generado en la acidogénesis, y la síntesis acetoclástica, en la que el ácido acético es reducido hasta metano, contribuyendo con el 70% del total del metano producido en el proceso (Gandarillas y col., 2017).

Los componentes de los reactores UASB constan de un tanque Imhoff invertido, con las cámaras de decantación y digestión anaeróbica una sobre otra. Dentro del reactor hay 3 zonas (Figura 3) (Lorenzo y Obaya. 2006):

- Zona de lecho de lodos, en ella se encuentran los microorganismos que consumen la materia orgánica.
- Zona intermedia donde se encuentran distribuidos los microorganismos en todo el reactor UASB.

- Zona de la separación del gas, la fase líquida y la fase sólida.

El gas liberado de las partículas es capturado en la campana de captura de gases la cual está en la parte superior del reactor. La fase líquida contiene algunos sólidos residuales y gránulos de biomasa, los cuales son conducidos a la cámara de sedimentación, donde se separan los sólidos residuales. La fase sólida se conduce a la superficie del manto de lodo a través del sistema de deflectores. Para mantener el manto de lodo en suspensión es necesario que la velocidad del flujo ascendente sea de 0.6 y 0.9 m/h (Lorenzo y Obaya. 2006).

El método de operación del UASB consiste en la alimentación del influente por la parte inferior, entrando en contacto directo con la biomasa para su degradación, el influente migra a lo largo del reactor hasta la cámara de sedimentación, en donde se separan los sólidos, dejando pasar el influente tratado hacia la salida del reactor.

Los parámetros de eficiencia de remoción y de operación de este sistema se puede consultar en las tablas 1 y 3.

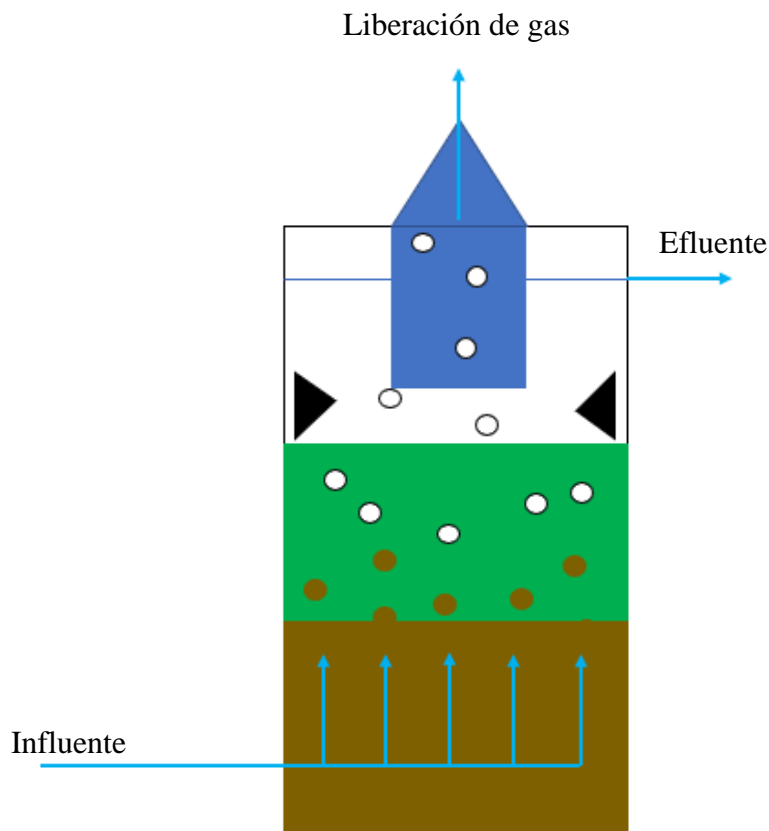


Figura 3. Reactor UASB. (Adaptado de Pacco y col. 2018, 2000).

El éxito de estos reactores se debe a su gran capacidad de eliminación de materia orgánica incluso con una baja concentración de materia orgánica y a su adecuado funcionamiento a bajas temperaturas. Entre las ventajas de su implementación se encuentran que tienen bajos costos en su construcción, no necesitan de grandes extensiones terreno, son de fácil funcionamiento y mantenimiento, la producción de lodos es muy baja y presentan bajas demandas de energía, teniendo incluso la capacidad de producción de energía en forma de biogás, considerándose una tecnología sustentable. (Engida y col., 2020).

2.3.1. Filtro anaerobio de flujo ascendente

El filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) se compone por una biopelícula fija, la cual remueve la materia orgánica en condiciones anaerobias. Los FAFA a gran escala presentan la forma de tanques cilíndricos o rectangulares, con diámetros que van de 2 a 8 metros y una altura de 3 a 13 metros. El área superficial específica del promedio del empaque es de $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Figura 4) (CONAGUA, 2015). Los materiales de empaque en los FAFA están basados en una amplia variedad de polímeros sintéticos. Este sistema de tratamiento permite una oxidación casi completa de la materia orgánica dependiendo del grado de filtración (Parra, 2006). El éxito de la filtración depende de los microorganismos que crecen en el material filtrante (Metcalf y col., 1995). En el reactor, el flujo del agua residual asciende por los espacios intersticiales entre el empaque y el crecimiento de biomasa. Generalmente no se recircula el efluente, excepto cuando se tratan de aguas residuales de alta concentración, que requieren de altos TRH para ser depuradas. Los parámetros de eficiencia de remoción y de operación de este sistema se pueden consultar en las tablas 1 y 3. (Carrera y col. 2013). Aunque los filtros anaerobios pueden ser usados como la principal unidad de tratamiento, suelen usarse como una unidad de postratamiento.

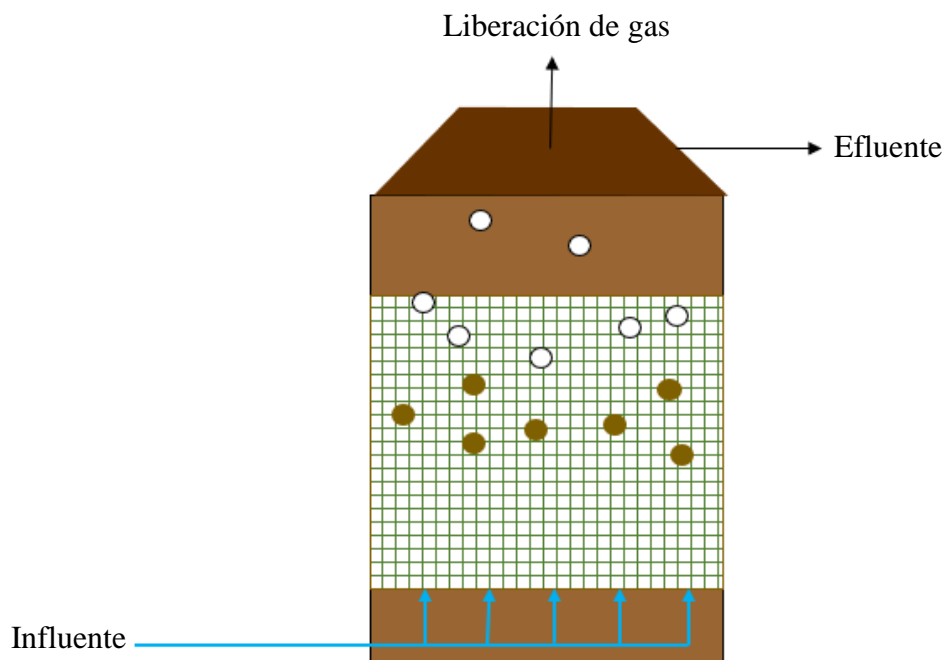


Figura 4. Filtro Anaerobio de Alujo Ascendente (FAFA). (Adaptado de CONAGUA, 2015).

2.3.4. Humedales artificiales

Los humedales artificiales son sistemas de tratamiento creados por el hombre que han evolucionado durante las últimas cinco décadas hasta convertirse en una tecnología de tratamiento confiable que puede aplicarse a distintos tipos de aguas residuales (SEMARNAT, 2021). En estos sistemas los contaminantes son eliminados mediante procesos físicos, químicos y biológicos (fotosíntesis, fijación, asimilación, amonificación, nitrificación, desnitrificación), los cuales se llevan a cabo de manera simultánea bajo condiciones controladas (Kadlec, 2008).

Los sistemas incluyen en un medio sólido (arena, tierra o grava) que se utiliza como soporte para el crecimiento de especies vegetales. Durante su operación los microorganismos se adhieren a la superficie del material de soporte, las raíces y rizomas, descomponiendo la materia orgánica presente en el agua residual. En estos sistemas las especies vegetales sembradas juegan un papel importante en la utilización de los nutrientes y otros constituyentes presentes en las aguas residuales, así como en la transferencia de oxígeno al medio sólido (Engida y col., 2020).

Las aguas residuales que se pueden tratar en un humedal se enlistan a continuación (Kadlec, 2008):

- Aguas domésticas y urbanas;
- Aguas provenientes de un pretratamiento;
- Aguas industriales, incluyendo fabricación de papel, productos químicos y farmacéuticos, cosméticos, alimentación, refinerías y mataderos entre otros;
- Aguas de drenaje de extracciones mineras;
- Aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana;
- Tratamiento natural para agua de alberca (sin cloro).

Hoy en día existen distintas configuraciones de los humedales artificiales para el tratamiento del agua residual, las cuales se mencionan a continuación. Los parámetros de eficiencia de remoción y de operación de estos sistemas se pueden consultar en las tablas 1 y 3.

Humedales de flujo superficial

Este tipo de humedales están formados por canales o estanques de poca profundidad (<60 cm), construidos en zonas de agua abiertas se pueden utilizar bernas, diques y revestimientos para controlar el flujo y la infiltración (Kadlec, 2008).

El agua que entra en el sistema circula a través de los tallos, raíces y hojas de la vegetación donde se instala una película bacteriana que elimina los contaminantes; la vegetación usada puede ser: espadañas, ancas, juncos y carrizos (Figura 5) (Engida y col., 2020).

El agua residual alimentada al humedal es tratada mediante los procesos de sedimentación, filtración, oxidación, reducción, adsorción y precipitación; este tipo de humedal se asemeja mucho a los humedales naturales (Vymazal y col., 2010). Debido al potencial de exposición humana a patógenos por acción de la interacción humana directa con el humedal, este tipo de humedal es más usado en el tratamiento secundario y terciario (Vymazal y col., 2010).

Los humedales de flujo superficial se pueden aplicar en todo tipo de climas incluido en climas fríos. Sin embargo, en estos casos la congelación y formación de hielo puede impedir su correcto funcionamiento en invierno y baja eliminación de contaminantes especialmente los procesos en donde interviene el nitrógeno (Arias y col, 2003).

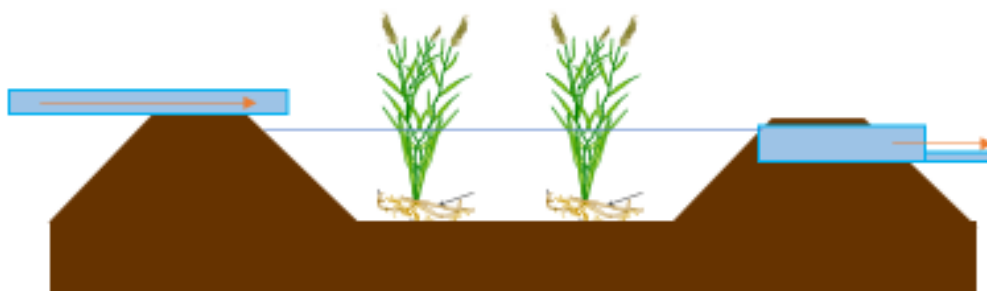


Figura 5: Humedal artificial de flujo superficial (Adaptado en Vymazal y col., 2010).

Influyente
Humedal de flujo subsuperficial

Efluente

Este tipo de humedal mantiene el flujo del agua siempre por debajo de la superficie, fluye a través de un filtro formado por material granulado siempre en contacto con la vegetación que ayuda al tratamiento de las aguas (Arias y col., 2003) Este tipo de humedales presentan

dos variantes: humedal de flujo subsuperficial vertical y humedal de flujo subsuperficial horizontal.

Humedal de flujo vertical

En este sistema el agua fluye en forma descendente (vertical flow). El agua se alimenta uniformemente de forma intermitente, cubriendo la superficie completa del humedal (Figura 6). Este, puede combinarse con otras configuraciones para crear trenes de tratamiento; por ejemplo: para nitrificación-desnitrificación. Su capacidad para oxidar el amoníaco ha hecho que se utilicen en aguas con alta concentración de compuestos nitrogenados, ya sea en aguas residuales municipales o para el tratamiento de lixiviados que puede tener una alta concentración de amoníaco (Vymazal y col., 2010).

Otra variante de este tipo de humedal consiste en el uso de la capa del agua superficial del lecho del humedal, la cual bloquea el transporte de oxígeno, con el fin de crear condiciones anaeróbicas en los sedimentos del lecho inferior. En el fondo del humedal donde se encuentra la materia orgánica y piedra caliza se crea un flujo descendente, estableciéndose las condiciones para la inmovilización de metales pesados a través de la química del azufre. Este humedal puede tratar efluentes con altas concentraciones de materia orgánica y contaminantes (Kadlec, 2008).

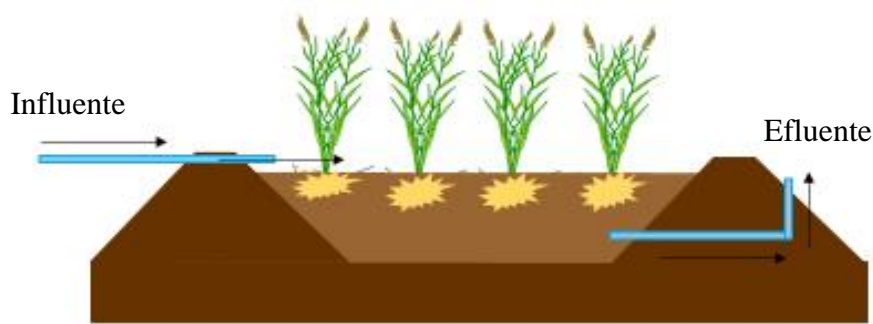


Figura 6: Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical (Adaptado de Vymazal y col., 2010).

Humedal de flujo horizontal

Los humedales de flujo horizontal se usan para tratar efluentes antes de ser descargados en el suelo o en aguas superficiales. Una ventaja de este sistema es que el agua al no estar expuesta disminuye el riesgo asociado a la exposición de las personas, fauna silvestre y

patógenos (Arias y col., 2003). Bien operados evitan que se cree el hábitat adecuado para los mosquitos. Los componentes de estos humedales suelen ser tuberías de entrada, revestimientos de arcilla o sintéticos, medios filtrantes, vegetación emergente, bermas y tuberías de salida con control de agua; dicho sea, hay que tomar en cuenta que este sistema es propenso a la obstrucción de las tuberías (Kadlec, 2008). El agua ingresa de manera continua, fluyendo de un extremo a otro por debajo de la superficie interaccionando con las raíces y rizomas de las plantas; la recolección del agua tratada se da del lado opuesto inferior a la alimentación (Figura 7) (Vymazal y col., 2010).

Usualmente se usan para el tratamiento secundario de aguas residuales de casas habitación, para pequeñas comunidades (Kadlec, 2008). De igual manera este tipo de humedal puede tratar aguas residuales provenientes de la industria.

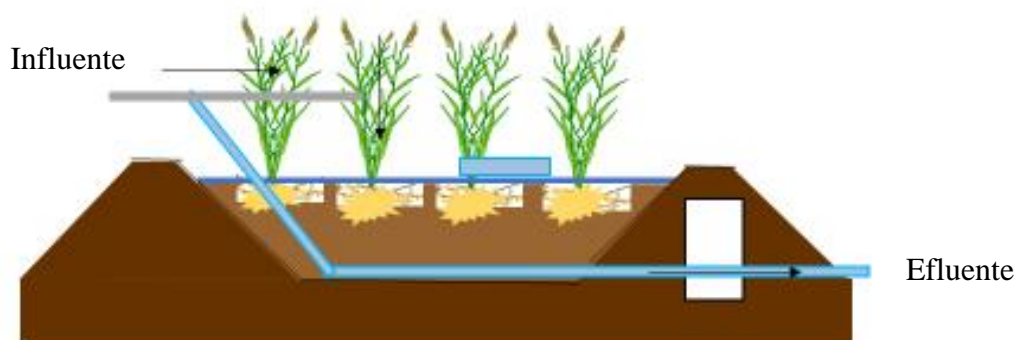


Figura 7: Humedal artificial de flujo horizontal (Adaptado de Vymazal y col., 2010)

Todas las configuraciones de los humedales artificiales son muy eficaces para eliminar materia orgánica y sólidos en suspensión, mientras que la eliminación de nitrógeno y fósforo es, generalmente, baja (Engida y col., 2020). Para mejorar el desempeño en la remoción de nitrógeno se puede utilizar una combinación de varios tipos de humedales, mientras que para lograr mejores eficiencias de fósforo se pueden implementar elementos que tengan una gran capacidad de absorción (Vymazal y col., 2010).

Los requerimientos energéticos de los humedales artificiales son muy bajos o nulos; por lo tanto, los costes de funcionamiento y mantenimiento son mucho menores en comparación con otros sistemas de tratamiento convencionales (Engida y col., 2020). Además, estos

sistemas se construyen con propósitos múltiples en donde estos dan servicios ecosistémicos como el control de inundaciones, el secuestro de carbono y hábitat para la fauna silvestre (Kadlec, 2008).

2.3.5 Lagunas de estabilización

Una laguna de estabilización es un estanque que opera con bajas concentraciones de microorganismos. Están constituidas por excavaciones poco profundas cercadas por taludes de tierra. En estos sistemas la DBO soluble es degradada por las bacterias (Conagua-IMTA, 2007) y la DBO particulada es removida por gravedad, sedimentando al fondo de la laguna.

Este tipo de tratamiento tiene ventajas en su construcción debido a su fácil operación y mantenimiento (Metcalf y col., 1995). Los parámetros de eficiencia de remoción y de operación de este sistema se puede consultar en las tablas 1 y 3.

Las lagunas de estabilización se clasifican en: lagunas anaerobias, lagunas facultativas y lagunas de maduración

Las lagunas anaerobias funcionan en ausencia de oxígeno y las profundidades varían de 3 a 5 metros. Los compuestos orgánicos son transformados en moléculas sencillas (Cortés y col., 2017). En la superficie se forma una capa de microorganismos principalmente cianobacterias las cuales aprovechan la luz que llega al espejo de agua para realizar la fotosíntesis, esto evita la presencia de las algas debido a la ausencia de luz solar.

Las lagunas facultativas están divididas en tres capas: en la capa superficial se encuentran algas y bacterias las cuales usan el oxígeno disuelto en el agua y la materia orgánica para sobrevivir; la capa intermedia o facultativa en donde se elimina la materia orgánica a través de bacterias facultativas y la capa de fondo en se encuentran microorganismo con metabolismo anaerobio. En estos sistemas se induce la sedimentación de la materia suspendida, la cual es degradada por los microorganismos anaerobios depositados en la sección profunda (Rolim, 2000).

Las lagunas de maduración (aerobias) tienen el mismo funcionamiento que las lagunas anaerobias, su diferencia está en que se utilizan en la eliminación de patógenos, siendo de baja profundidad para facilitar la respiración anaerobia. En la figura 8 se presenta el esquema general de una laguna de estabilización (Rolim, 2000, Conagua-IMTA, 2007b).

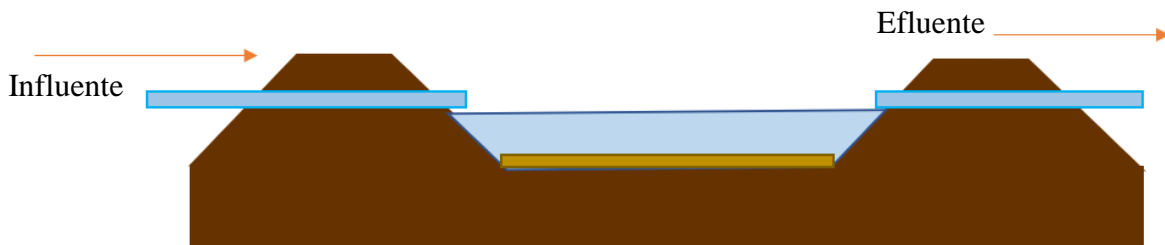


Figura 7. Sistema combinado de lagunas de estabilización (Adaptado de Cortés y col., 2017)

2.3.6 Fosas sépticas

Estas instalaciones se utilizan para proporcionar un tipo de infraestructura de pretratamiento de aguas residuales domésticas que no consumen energía. En la fosa séptica se produce la separación de los sólidos y los líquidos de las aguas residuales. Así, todo este material pasa a través de una tubería de entrada hasta la fosa. Una vez dentro, los sólidos se separan del líquido y la materia orgánica es oxidada hasta CO_2 (Figura 9) (Hashemi y Boudaghpour, 2020).

El proceso consiste, de dos compartimientos, en el primero la materia orgánica disuelta se descompone de forma anaerobia por la acción bacteriana (Singh y col., 2019). El segundo compartimiento sirve como un pulimiento donde se sedimentan los sólidos que no fueron retenidos en el primero. La eliminación de olores se da debido a que el sulfuro de hidrógeno se combina con los metales presentes y se forman sulfuros metálicos insolubles (Castillo y col, 2013).

La adecuada gestión es necesaria para evitar la sobrecarga, un factor importante que puede reducir la eficacia del tratamiento (Singh y col., 2019).

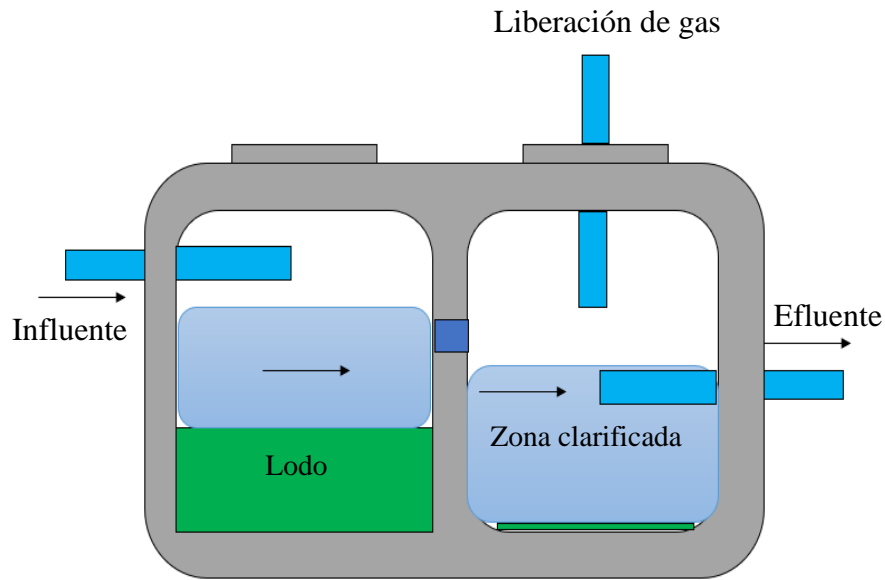


Figura 9. Fosa séptica (Adaptado de Lucho y col., 2015)

2.3.7. Biodiscos

Los biodiscos o reactor biológico de contacto (RBC por sus siglas en inglés) son sistemas aerobios de biomasa adherida, una variante de los reactores de biopelícula (Camacho y Gómez 1996). Su configuración consiste básicamente en una serie de discos montados sobre un eje horizontal rotatorio (Merizalde y col., 2019); los cuales son sumergidos parcialmente en un tanque por donde fluye el agua residual y donde crece la biopelícula (Figura 10).

El objetivo del disco es mejorar la interacción entre el sustrato y los microorganismos adheridos al material de soporte, facilitar el flujo homogéneo de agua; permitir el crecimiento y acumulación de biomasa y separar la fase sólida de la fase gaseosa. (Romero-Granada, 2015).

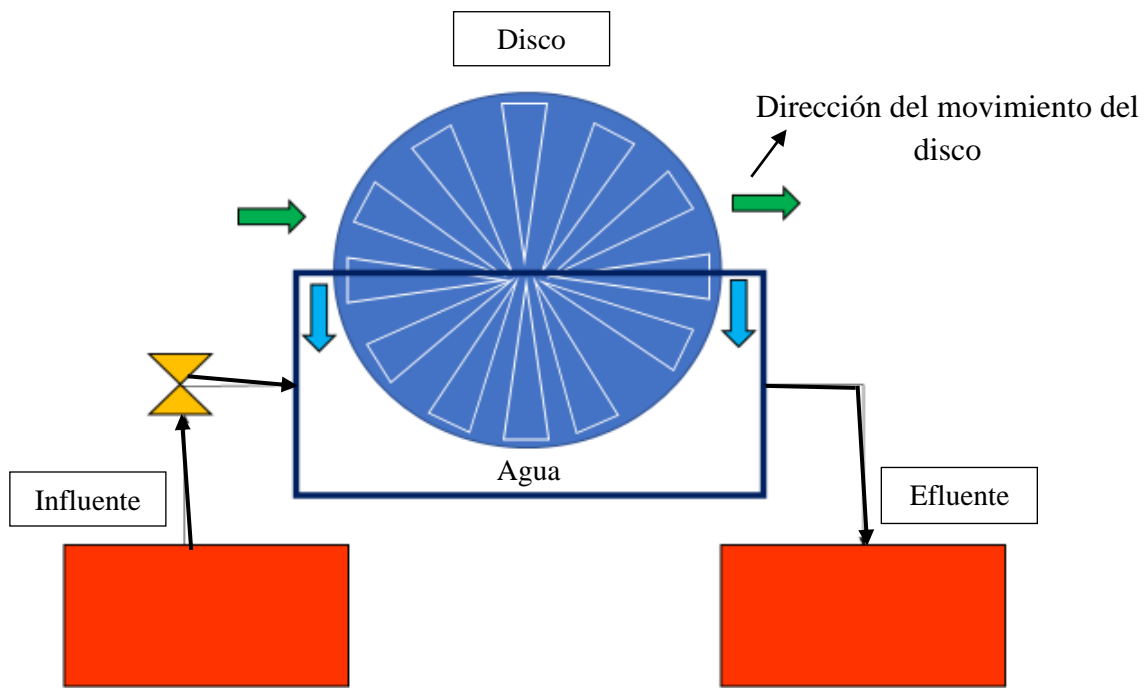


Figura 10. Biodiscos (Adaptado de Merizalde y col., 2019).

2.3.9. Desempeño de las tecnologías convencionales en la remoción de contaminantes

En los apartados anteriores se describieron las características y principios de funcionamiento de las tecnologías convencionales para el tratamiento de las aguas residuales.

En la tabla 1 se presenta un análisis comparativo de las condiciones de operación y eficiencias de los distintos sistemas de tratamiento abordados. Es de resaltar, que en algunos tratamientos se sabe que son capaces de tratar efluentes de origen industrial o con una gran carga de materia orgánica, en todos los casos se menciona cual es el uso más recomendable.

Como se puede apreciar en la tabla 1, las eficiencias de remoción de DQO, DBO y SST oscilan entre el 60 – 95%, con excepción de las fosas sépticas, lagunas de estabilización anaerobia y humedales, los cuales como máxima eficiencia registrada no supera el 60% (de la Vega, 2012).

Algunos tratamientos son adecuados para tipos específicos de aguas, se reconoce su potencial para el tratamiento de otro tipo de aguas como las industriales o con contaminantes muy específicos, no limitándolo a un único tipo de agua su aplicación.

Los sistemas convencionales se estudian tomando como base la eliminación de componentes físicos y químicos en el agua, es cierto que algunos de estos pueden eliminar microorganismos, la remoción de patógenos se han estudiado a profundidad. Los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales contribuyen potencialmente a la transmisión de enfermedades infecciosas donde el vector es la transmisión por agua. Esto se vuelve un importante problema para la salud pública y ambiental principalmente en esas zonas donde no hay una gestión de las aguas residuales adecuada o simplemente no se estudia el problema (Metcalf y col., 1995). En la tabla 1 se mencionan algunos datos de remoción de patógenos y en la normatividad mexicana se especifica la cantidad de microorganismos limite que pueden estar en ella. Esto quita la limitante de analizar este punto sin tener una referencia. El diseño y la optimización del rendimiento de eliminación de patógenos requiere una mejor comprensión de los mecanismos de acción hidrológicos, geoquímicos y biológicos que controlan la calidad del agua en los sistemas de tratamiento de aguas residuales (de la Vega, 2012).

| Tabla 1. Eficiencias de remoción promedio (%) de los tratamientos convencionales de aguas residuales (Metcalf y col., 1991; Parra, 2006; Singh y col., 2019; Conagua-IMTA, 2007 ^a ; García y col., 2008; Rodríguez, 2000; Muñoz y col., 2014; de la Vega, 2012) | | | | | | | | |
|--|---|---------|------------------|---------|----------|-----|--------------------|--------------------------|
| | Tipo de agua residual | DQO | DBO ₅ | SST | PT | NT | Coliformes fecales | Huevos de helminto (h/L) |
| Sistema de lodos activados | Aguas residuales municipales | 80 -95 | 80 -95 | 80 -90 | 10 -- 25 | - | - | - |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | Aguas con altas concentraciones de materia orgánica y otros contaminantes. | 60 - 80 | 65 - 80 | 60 - 70 | > 15 | 80 | 55 | - |
| Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente | Aguas negras y aguas grises | 60 - 80 | 65 - 80 | 60 - 70 | 80 | 95 | 90 - 99 | - |
| Fosas sépticas | Tratamiento primario de aguas negras y aguas grises | 20-30 | 20-30 | 50-60 | - | - | - | - |
| Lagunas de estabilización facultativas | Aguas con altas concentraciones de materia orgánica ya sean aguas municipales o industriales. | - | 80-90 | 63-75 | 15 | > 5 | 70 - 80 | 90 . 99 |
| Lagunas de maduración | Aguas con altas concentraciones de materia orgánica ya sean aguas municipales o industriales. | - | 60-80 | 85-95 | > 30 | 15 | 70 - 80 | 90 - 99 |

| | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|---------|-------|----------|---------|---------|---------|---------|
| Lagunas de estabilización anaerobias | Aguas con altas concentraciones de materia orgánica ya sean aguas municipales o industriales. | - | 50-70 | 20-60 | 10 | > 5 | 70 - 80 | 90 - 99 |
| Humedales | Post-tratamiento de aguas residuales. Aguas municipales. | - | 50 | 12. - 20 | 2 | < 60 | 66 - 99 | < 60 |
| Biodiscos | Aguas residuales municipales e industriales | 80 - 95 | 92 | - | 67 - 85 | 52 - 90 | - | - |

2.4. Tratamientos biológicos avanzados de aguas residuales

Como ya se mencionó el principal objetivo de los sistemas de tratamiento biológicos es la eliminación de materia orgánica, nitrógeno y fósforo de las aguas residuales mediante el uso de microorganismos. Por muchas décadas los sistemas convencionales de tratamiento cumplieron su función para lo que fueron diseñados, sin embargo, muchos de ellos ya son obsoletos o no cumplen con la normativas y estándares actuales de descarga. A pesar de ello se siguen utilizando como una alternativa de solución a la contaminación de las aguas residuales; sobre todo en las zonas rurales, como es el caso de los humedales y de las fosas sépticas, o los sistemas de lodos activados, los cuales se siguen utilizando en la mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

El tratamiento avanzado busca la eliminación de ciertos contaminantes que, por su tamaño, su concentración y su complejidad no son eliminados en los sistemas convencionales de tratamiento; garantizando que el agua que es tratada tenga la calidad suficiente para ser reutilizada (del Villar, 2010).

A manera de resumen, se puede inferir que los sistemas avanzados presentados (son sistemas sofisticados para una depuración mayor de contaminantes haciendo que el agua tratada sea más óptima en su reusó en riego o en otros procesos.

Si bien es cierto que la mayoría de los tratamientos avanzados son fisicoquímicos, también existen tratamientos biológicos que se destacan por su capacidad de eliminar una amplia gama de contaminantes, incluyendo los denominados contaminantes emergentes. A continuación se mencionan los siguientes tratamientos de aguas residuales.

2.4.1. Biorreactores de membrana

Un sistema de membranas puede definirse como la combinación del proceso de lodos activados con la filtración por membrana (Palmarin, 2013). La membrana es un material selectivo filtrador que permite que algunos elementos (sean sedimentos sumamente finos o microorganismos) puedan pasar más fácilmente a través de ella que otros (Ozdemir y col, 2012). Este tratamiento busca que el agua presente la calidad suficiente para poder ser reusada en riego de cultivos o ser ingresada en algún proceso.

Las membranas se clasifican de acuerdo con el tamaño de poro. Aquellas que presentan un diámetro de poro de 0.08-2.0 μm son clasificadas como membranas de microfiltración

(MF), y pueden rechazar sedimentos, microorganismos y virus. Las membranas de ultrafiltración (UF) con un poro de 0.005-0.2 μm , adicionalmente de la remoción observada en membranas de MF remueven macromoléculas y coloides, así como ciertos tipos de virus (Zamora, 2014).

Los materiales que se utilizan en la fabricación de membranas son el acetato de celulosa, polímeros totalmente hidrofóbicos como el polipropileno, el polietileno, los fluoropolímeros y el politetrafluoroetileno. Así mismo, existen otros polímeros que son totalmente hidrofóbicos como polisulfona y la polietersulfona de los cuales se pueden modificar mediante el uso de aditivos como los copolímeros o por post-tratamiento (Zamora, 2014).

En este sistema las variables de mayor importancia son la permeabilidad y porosidad de la membrana; si los sedimentos/microorganismos y la superficie de la membrana no presentan afinidad, la membrana puede repeler los sedimentos/microorganismos. Las membranas hidrofóbicas tienen la ventaja de una alta permeabilidad y poca afinidad con la materia orgánica (Aileen y col., 2006).

Los sistemas de membrana presentan dos configuraciones (Figura 10a), la primera se conoce como sistema de membrana interna (Figura 10a), la cual se ubica dentro del reactor de lodos activados. Se usa una fuerza de succión para arrastrar el agua a través de la membrana, mientras que el lodo queda retenido en la superficie de la membrana, El lodo concentrado se vuelve a introducir en el reactor. En la base del reactor hay un aireador el cual permite mantener las condiciones aerobias. Este es el sistema de membrana más usado ya que no requiere de tanta energía y al mismo tiempo garantiza el mecanismo de limpieza para reducir el ensuciamiento de la membrana (Aileen y col., 2006).

La segunda configuración es un sistema de membrana externa (Figura 10b). El licor mezclado se hace circular fuera del reactor hasta el módulo de membranas, donde la presión impulsa la separación del agua de los lodos (Aileen y col., 2006). Este sistema presenta una eficiencia de remoción de DQO del 60 – 98% (Erkan y col., 2020; del Villar, 2010).

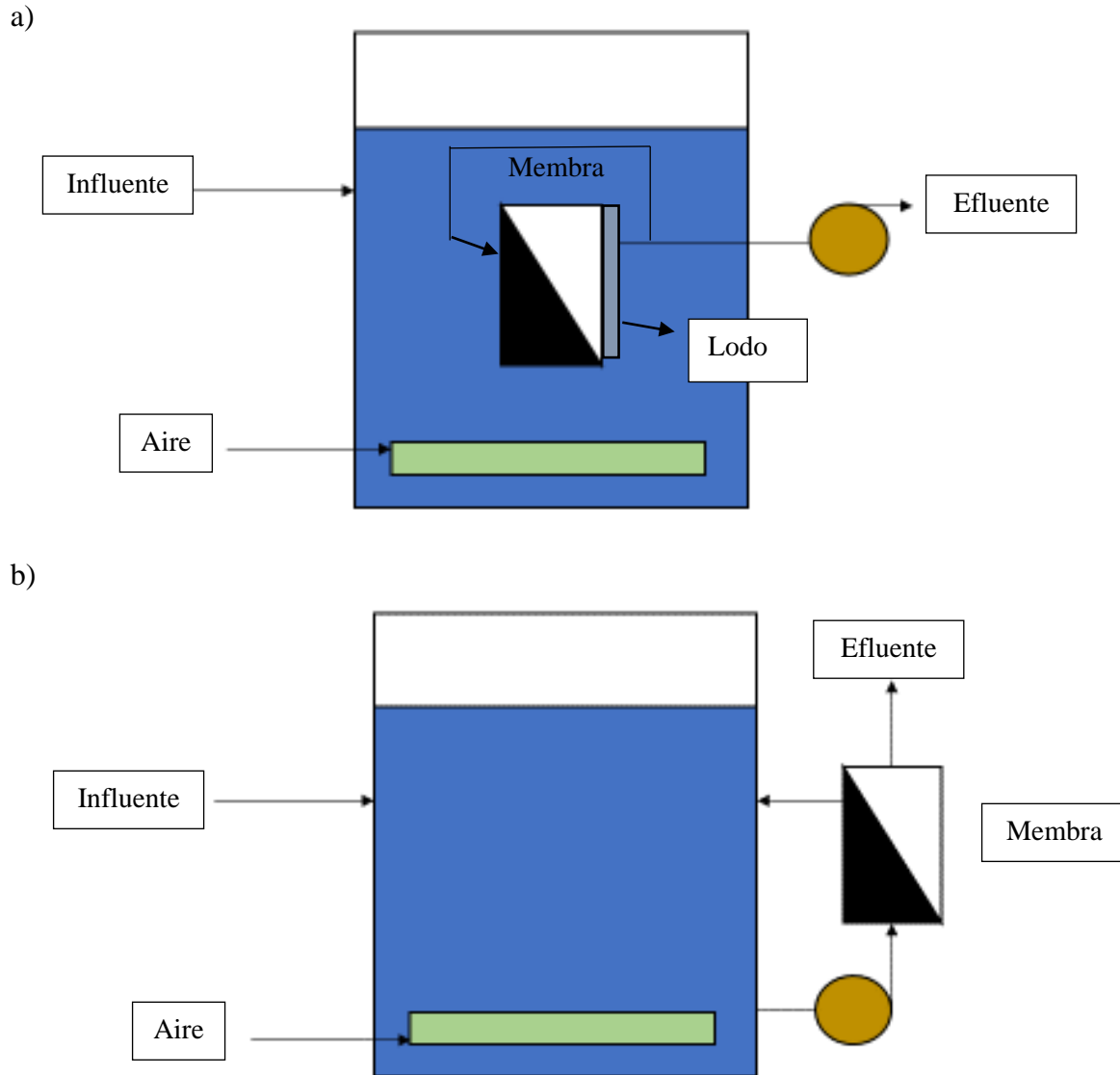


Figura 10: Biorreactor de membrana: a) Membrana interna b) Membrana externa
(Adaptado de Aileen y col., 2006)

2.4.2. Reactores de biopelícula

Los reactores de biopelícula están conformados por un material de soporte de formas diversas en la cual se favorece el crecimiento de bacterias formando una biopelícula, estos materiales deben ser resistentes a la degradación, de fácil manejo y con una densidad que permita su fluidización a partir de la aireación del reactor (di Biase y col., 2019).

Las biopelículas están conformadas por estructuras de microorganismos y su formación se da por un sistema de comunicación celular conocido como Quorum sensing, esto le confiere mayor resistencia al flujo de las aguas residuales (Olarte y col., 2012). A medida que los microorganismos comienzan a adherirse y a desarrollarse en la superficie del material de soporte, este se vuelve más denso en relación con el agua y con esto mejora la capacidad de mezcla (Abdelfattah y col., 2020). La estructura formada entre la biopelícula y la composición microbiana parecen estar también influenciadas por el material de soporte (por ejemplo, poliuretano, polietileno, polipropileno, cloruro de polivinilo, polietileno de alta densidad (HDPE), nylon). El polietileno de alta densidad es el material preferido como material de soporte debido a su plasticidad, densidad y durabilidad (di Biase y col., 2019).

El oxígeno disuelto, que se difunde a través de los poros de la membrana, se transporta a lo largo de la biopelícula donde se consume por los microorganismos durante la degradación del sustrato. La fuente de carbono se encuentra disuelta en el líquido externo, y esta se transfiere a través de la interfase biopelícula-líquido, y se difunde a lo largo de la biopelícula (Figura 11) (González-Brambila y López-Isunza., 2007).

La formación de las películas se da de dos formas:

- La película pseudo-homogénea;
- La película heterogénea.

En el caso de la película pseudo homogénea se presentan varias fases en el sistema: se considera en este caso que los microorganismos que forman la biopelícula son de la misma especie, la actividad celular se da en toda la biopelícula, pero fuera de esta la actividad es nula y por último el material de soporte es impermeable al sustrato y sus poros se encuentran llenos de líquido y oxígeno disuelto (Figura 11a) (González-Brambila y López-Isunza., 2007).

La película heterogénea está constituida por una fase líquida contenida en poros y canales formados por la propia película, que intercambia materia con la parte sólida formada por polímeros extracelulares que albergan a las colonias de microorganismos (Figura 11b) (González-Brambila y López-Isunza., 2007).

a)

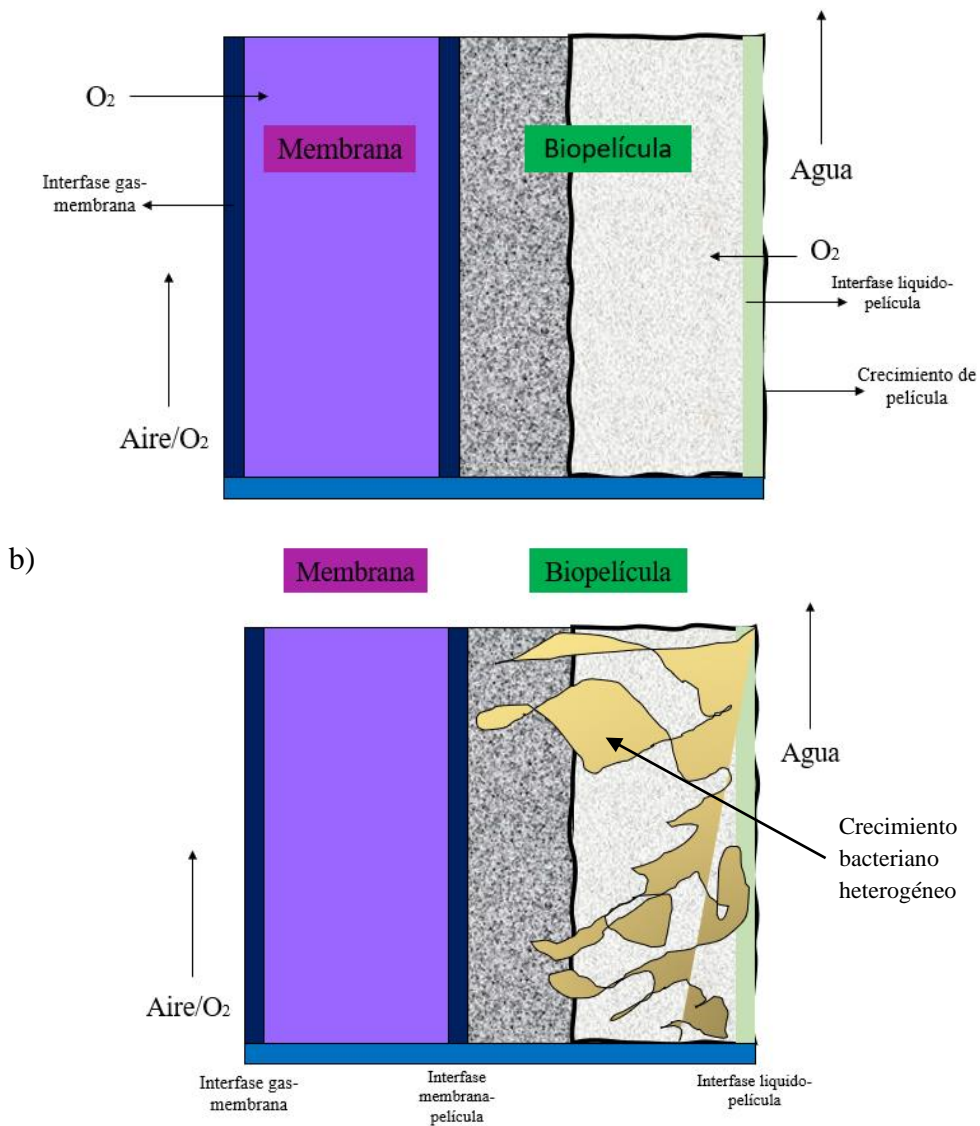


Figura 11. Reactor de biopelícula a) pseudo homogénea y b) heterogénea (Adaptado de González y López-Isunza., 2007).

Otra variante del sistema de biopelícula son los reactores de biopelícula de lecho móvil, en donde se usan soportes principalmente de plástico que puede ser desde cloruro de polivinilo (PVC) o poliuretano de diferentes diseños y tamaños, la ventaja que tiene este sistema es que permite la optimización de los reactores haciendo cambios mínimos en estos. Los reactores de biopelícula tanto fija como móvil son aplicables a sistemas aerobios, anóxicos y anaerobios dependiendo de la aplicación (Olarte y col., 2012).

En el caso del tratamiento aerobio, la aireación se suministra a un nivel mayor que los requisitos del oxígeno disuelto (OD) para la actividad microbiana de organismos

heterótrofos (Abdelfattah y col., 2020). La mezcla en los sistemas aireados se realiza por agitación mientras que en la configuración anaerobia/anóxica puede ser a partir de la mezcla mecánica y/o la recirculación.

Para una biopelícula con características heterotróficas aerobias de crecimiento rápido, los materiales de soporte tendrían aberturas más amplias para evitar la pérdida efectiva causada por la obstrucción. Por otro lado, para una biopelícula autótrofa de crecimiento lento (usada en procesos de nitrificación y Anammox) se requiere de aperturas más pequeñas y de una mayor superficie (di Biase y col., 2019). La eficiencia de remoción que tiene este sistema de tratamiento es de 63 – 94% de remoción de DQO y 46-70% de remoción de nitrógeno total, siendo adecuado en el tratamiento de aguas residuales municipales, aguas residuales industriales y con altas cargas de materia orgánica (Molina, 2015).

Cabe destacar lo importante que es contar con sistemas de tratamiento avanzado de aguas residuales del tipo biológico ya que hay mucha más versatilidad en la elección de configuraciones y materiales. En general, estos sistemas tienen como característica común que aprovechan ciertas características ventajosas de los sistemas de lodos activados, los biodiscos y las biopelículas. Sin embargo, los sistemas avanzados presentan limitaciones para ciertos tipos de aguas residuales complejas, generando subproductos tóxicos debido a la mineralización incompleta del sustrato (Dueñas, 2019).

2.5. Herramientas analíticas para la selección del sistema de tratamiento de aguas residuales.

El crecimiento en la urbanización demanda la implementación de plantas de tratamiento basadas en tecnologías y procesos eficientes y robustos. Debido a ello, es necesario buscar la mejor opción de tratamiento tomando en cuenta todos los factores involucrados, considerando desde aspectos técnicos hasta ambientales, lo cual lo convierte en una decisión compleja.

Para resolver dicha problemática se han acoplado herramientas analíticas usadas en la industria para la selección de nuevos procesos, que han ayudado a seleccionar la mejor opción de tratamiento para cada caso específico.

La matriz de decisión (MD) es una herramienta sencilla la cual permite la identificación rápida de la problemática prioritaria a resolver (Berumen y col., 2007). La Figura 12

muestra un ejemplo sencillo de una MD, la cual está formada por columnas donde se ubican los criterios y filas en donde se muestran los problemas a solucionar. Se comparan las problemáticas contra los criterios, asignándoles un valor de importancia, el cual depende de la escala que el autor determine, se suman los valores de cada fila y al final el valor más alto es la problemática prioritaria por resolver (Mendoza, 2013).

| | Criterio 1 | Criterio N... | Suma | Nivel de prioridad |
|---------------|------------|---------------|------|--------------------|
| Problema 1 | | | | |
| Problema N... | | | | |

Figura 12. Matriz de decisión.

Dentro del desarrollo de la MD para la toma de decisiones se deben considerar distintos aspectos para asegurar la confiabilidad en los resultados entre los cuales destacan: 1) Evitar la pérdida de información en la adopción de decisiones mediante enfoques basados en escenarios, 2) Incluir las opciones de los expertos en un marco de toma de decisiones de grupo y 3) Dar prioridad (jerarquía) a los problemas que se pretenden resolver a fin de que, si bien ningún criterio sea excluido, se garantice un orden a la hora de hacer el proceso de decisión (Grajales y col, 2013). Los actores (tomadores de decisión) involucrados en la resolución del problema juegan un papel importante en la selección de las problemáticas, los criterios y las alternativas. El análisis puede ser tan complejo como así lo requieran los actores involucrados.

Otra metodología ampliamente usada es el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP por sus siglas en inglés). El AHP está diseñado para estructurar un proceso de decisión en un escenario afectado por múltiples factores independientes (Figura 13). En el AHP, un problema complejo se divide en varios subproblemas que se organizan según niveles jerárquicos. El nivel superior de la jerarquía denota el objetivo del problema y los niveles intermedios denotan los factores de los respectivos niveles considerados para alcanzar el objetivo (Saaty, 2008; Peña y col., 2018).

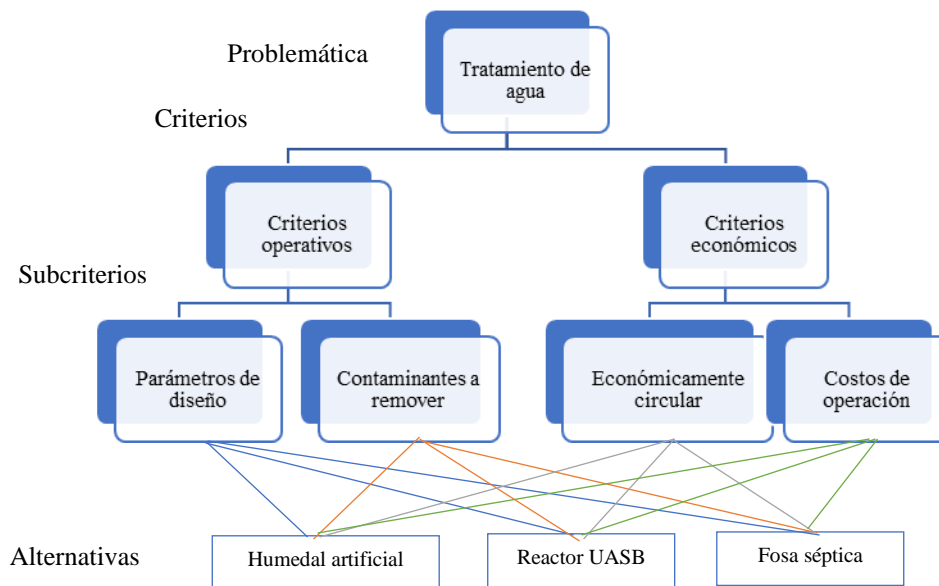


Figura 13. Proceso de Análisis Jerárquico (AHP).

El análisis jerárquico permite comparar los criterios y alternativas, siendo la importancia de los criterios y alternativas individuales relativa a sus efectos en la solución del problema (Bottero y col., 2011).

El problema es definido por el escenario de evaluación, la disponibilidad de información y los posibles conflictos entre los intereses de cada actor involucrado (Castro y col., 2014). Los intereses se asocian al problema en diferentes dimensiones de evaluación que hacen necesario un análisis multicriterio y discreto.

De acuerdo con Wei y col., (2020); los criterios son cualitativos y cuantitativos; y estos son definidos por los distintos actores involucrados en el problema; los cuales tienen un nivel de participación en la toma de decisiones; a fin de que los criterios tengan consistencia y transparencia.

Las alternativas de solución son las posibles propuestas para resolver el problema prioritario; siendo los elementos sobre los cuales se toma la decisión (Grajales y col., 2013). El número de alternativas puede ser finito o infinito.

En el AHP la primera etapa consiste en elaborar una matriz, semejante a la de MD, en donde se analiza la relación de los criterios establecidos entre sí, usando la escala de Saaty para establecer los valores (Tabla 2). El resultado de esta matriz proporciona el criterio

prioritario por atender. La segunda etapa consiste en realizar una matriz comparando los criterios contra las alternativas, asignando valores de acuerdo con la escala de Saaty, el resultado final determina cual es la alternativa con mayor prioridad.

| Tabla 2. Escala de Saaty (1982) | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|--|
| Escala numérica | Escala verbal | Explicación |
| 1 | Igualmente, importante | Dos elementos contribuyen de igual manera a la solución de la problemática. |
| 3 | Moderadamente importante | Preferencia leve de un elemento sobre el otro. |
| 5 | Fuertemente importante | Preferencia fuerte de un elemento sobre el otro. |
| 7 | Importancia fuerte o demostrada | Mucho mayor preferencia de un elemento sobre otro. Predominancia demostrada. |
| 9 | Importancia extremadamente fuerte | Preferencia clara y absoluta de un elemento sobre el otro. |
| 2,4,6,8 | | Intermedio de los valores anteriores. |

Estas herramientas analíticas han sido aplicadas en diversos sectores como el de la salud, manufactura, farmacéutica entre otros (Plakas y col., 2016). El AHP se puede aplicar al estudio de los problemas ambientales en donde encontramos un amplio abanico de problemáticas, criterios y alternativas, que se centran en la minimización del uso de energía, el uso del suelo, la bioacumulación de contaminantes, los olores, ruidos e impactos visuales entre otros (Bottero y col, 2011). Menikpura y col. (2012) usan esta herramienta para la selección de la mejor tecnología para el manejo de lodos residuales de las plantas de TAR, por otro lado, Molinos y col. (2014) lo aplican para la selección de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Para la selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales utilizando herramientas de decisión (MD y AHP) se consideran los siguientes criterios:

Criterio de diseño; en la Tabla 3 se presentan los parámetros a considerar para el diseño de los diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales, que van de parámetros operacionales y concentraciones de contaminantes.

Criterios de espacio de instalación; este criterio considera que cada sistema de tratamiento demanda un área específica para su instalación, las cuales van a depender de la configuración del sistema, del caudal, y de las tasas de degradación de contaminantes a tratar. En la tabla 4 se mencionan las dimensiones de diseño que tienen los diferentes sistemas de tratamiento por unidad de volumen de agua tratada.

Criterio de consumo energético; las plantas de tratamiento como cualquier proceso industrial tienen asociados costos energéticos. Este criterio está definido por el consumo energético medido en kilowatts hora. La tabla 5 presenta el consumo de energía para los sistemas de tratamiento que se abordaran en esta tesis.

Criterio de clasificación de las aguas residuales a partir de su origen; en este caso, el criterio se define como la composición de las aguas residuales que ingresan al sistema de tratamiento. En este sentido, las aguas residuales pueden ser clasificadas de la siguiente forma:

Aguas residuales domésticas: son producto del uso del agua en las diferentes actividades domésticas, las cuales pueden contener sólidos, desechos orgánicos, detergentes, jabones y grasas (Metcalf y col., 1995).

Municipal (Sanitaria): son las generadas de zonas residenciales y de comercios, instituciones y otros, que incluyen tanto aguas residuales domésticas como industriales (Metcalf y col., 1995).

Industrial: Son el resultado de las actividades industriales de los sectores productivos. Es tan diverso el uso que se da en la industria al agua (Sector químico, del petróleo, papel, metalurgia, etc.); esto aplica a las industrias que generan aguas residuales con altas concentraciones de materia orgánica (grasas), contaminantes tóxicos (metales pesados, compuestos orgánicos volátiles) o nutrientes como el amoníaco. (Tchobanoglous y col., 2003).

Combinada: Mezcla de aguas municipales y de lluvia.

| Tabla 3. Parámetros de diseño comunes para cada sistema (Referencias: Metcalf y col., 1995; Pabón y col., 2009; Zhu y col, 2018; Świątczak y col., 2018; Vymazal, 2010; Conagua-IMTA, 2007*; Cortés y col. 2017; Ozdemir y col, 2012; Palmarin, 2013; Gandarillas y col., 2017; Engida y col., 2020; Abdelfattah y col., 2020; Cortes y col., 2008; IMTA, 2002; EPA, 2011) | | | | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|-------------------|---------------|---------------|-----------------|------------|---------------|--------------------------------------|------------|
| Tratamiento | SST* (mg/L) | DQO* (mg/L) | DBO* (mg/L) | NT (mg/L)* | PT (mg/L)* | F/M (kg SSV) | TRH (h) | TRS (días) | ORL (Kg DBO/m ³ .d) | pH |
| Sistema de lodos activados | 1500 - 3000 | - | 400,000 – 800,000 | 10 | - | 0.2 - 0.4 | 2 – 8 | 5 - 15 | 0.32 - 0.64 | 8.2 - 8.6 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 50 – 200 | 680 – 685 | - | 27 - 27.5 | 9.5 - 10 | 6 - 1.2 | 6 – 18 | - | - | 6.5 - 7.5. |
| Humedales | 20 – 30 | - | 20 – 30 | 0.007 - 4.5 | 0.004 - 4.7 | - | - | 17 - 52 | - | - |
| Lagunas de estabilización facultativas | 80 -300 | 450 | 300 | 35 | 9 | 0.25 - 0.50 | - | 2 - 7 | 67 - 180 | 7.28 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 10.0 - 30.0 | 450 | 300 | 35 | 9 | 0.25 - 0.50 | - | 2 - 7 | < 17 | 7.28 |
| Lagunas de estabilización anaerobias | 80 -160 | 450 | 300 | 35 | 9 | 0.25 - 0.50 | - | 2 - 7 | NA | 7.28 |
| Fosas sépticas (pretratamiento) | 325 | 488.3 | - | - | - | - | 3.2 | - | - | 7.6 |
| Filtro FAFA | 375 - 12 000 | - | 122 - 136 | 50 - 200 | - | - | 4 -10 | - | 0.2 – 0.7 | 6.6 – 7.6 |
| Biorreactores de membrana | 280 | 465 | - | - | - | - | 0.6 – 2 | - | - | - |
| Reactores de biopelícula | 30 – 1000 | - | 100 - 120000 | 17 - 3360 | 2 – 300 | - | - | - | - | 3.5 - 10.5 |
| Biodiscos | - | - | 15 - 30 | - | - | - | 0.25 - 6.6 | - | 9.80 - 17.15 | 4.6 - 7.0 |

*(Parámetros de entrada)

| Tabla 4. Dimensiones de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. (Referencias: Metcalf y col., 1995; IMTA, 2002; EPA, 2011; Jojoa y col., 2014; Mateu, 2016; Pacco y col., 2018) | | |
|--|---|-------------------------------|
| Tratamiento | Área (m ² /m ³ de agua tratada.) | Régimen de operación |
| Sistema de lodos activados | Depende del efluente a tratar. | Depende del efluente a tratar |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 1 | Continuo |
| Humedales | 117.58 | Continuo |
| Lagunas de estabilización facultativas | 10,000 – 40,000 | Serie o paralelo |
| Lagunas de estabilización de maduración | 10,000 – 40,000 | Serie o paralelo |
| Lagunas de estabilización anaerobias | 10,000 – 40,000 | Serie o paralelo |
| Fosas sépticas (pretratamiento)* | 1.77 | Paralelo |
| Filtro FAFA | 2 - 8 | - |
| Biorreactores de membrana | 2 | Paralelo |
| Reactores de biopelícula MBBR (Materiales de soporte)** | 350 – 500 | Paralelo |
| <p>*El cálculo en el caso de las fosas sépticas prefabricadas se hace tomando en cuenta el número de habitantes para las cuales este destinada. En este caso, se está tomando en cuenta un diseño prefabricado para 130 usuarios y un gasto volumétrico de agua de 130 L/día (Lucho y col., 2015) y un área de 1.8 m².</p> <p>**Las medidas presentadas para los medios de soporte en biopelícula son tomados de soportes comerciales. Hay que tomar en cuenta que existen más tipos disponibles en el mercado de diferentes formas y tamaños (Dueñas, 2019).</p> | | |

| Tabla 5. Consumo energético*. (Referencias: Metcalf y col., 1995; IMTA, 2002; EPA, 2011; Nguyen y col., 2020; Abdelfattah y col. 2020) *Dependiendo del tiempo de retención (días). | |
|--|---|
| Tratamiento | Consumo de energía (kWh /m ³) |
| Sistema de lodos activados | 0.483 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | No consume energía |
| Humedales | No consume energía |
| Lagunas de estabilización facultativas | 0.06 - 0.28 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 0.57 - 2.84 |
| Lagunas de estabilización anaerobias | No consume energía |
| Fosas sépticas (pretratamiento) | No consume energía |
| Filtro FAFA (pretratamiento) | No consume energía |
| Biorreactores de membrana | 1.50 |
| Reactores de biopelícula | 0.25 |

Criterio de calidad del agua residual; este criterio depende del destino y propósito que debe cumplir con la legislación vigente. La legislación de referencia en México está conformada por las NOM-001-SEMARNAT-1996, (establece los límites máximos

permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales), y la NOM-002-SEMARNAT-1996 (establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal) y NADF-015-AGUA-2009 que es la norma de la CDMX (establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales de procesos y servicios al sistema de drenaje y alcantarillado de la CDMX, provenientes de las fuentes fijas), las cuales quedan resumidas en la Tabla 6. Las respectivas normas marcan el límite máximo permisible de materia orgánica, sólidos suspendidos, nitrógeno y fósforo en las aguas residuales, los cuales son contaminantes que siempre se evalúan ya sea para términos de descargas, así como para la eficiencia del tratamiento. Así mismo, en ambas normas se establecen los límites máximos permisibles de contaminación por metales pesados, contaminantes que usualmente no son contemplados dentro de los criterios de operación o de eficiencia.

La NOM-003-SEMARNAT-1997, establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsan en servicios al público (tabla 8). Esta norma destaca parámetros de descarga como DBO, coliformes, huevos de Helmintos y sólidos más estrictos que la NOM-001 y la NOM-002 (Tabla 7). Así mismo, establece los límites máximos permisibles de metales pesados y cianuros.

Criterio de eficiencia; se basa en las eficiencias de remoción de contaminantes reportadas para cada sistema de tratamiento de aguas residuales (Tabla 1).

Tabla 6. Límites máximo permisible de contaminantes en la descarga de aguas residuales (NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NADF-015-AGUA-2009)

| CRITERIOS (miligramos por litro excepto cuando se especifique) | NOM-001-SEMARNAT-1996 Suelo | | | | NOM-002-SEMARNAT-1996 Sistemas de alcantarillado urbano y municipal y; NADF-015-AGUA-2009 Aguas residuales provenientes de fuentes fijas. | | |
|---|--------------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|---|-----------------|----------------------|
| | Uso en riego agrícola (A) | | Humedales naturales (B) | | Promedio mensual | Promedio diario | Promedio instantáneo |
| | Promedio mensual | Promedio diario | Promedio mensual | Promedio diario | | | |
| Temperatura °C | N.A. | N.A. | 40 | 40 | - | - | - |
| Grasas y Aceites | 15 | 25 | 15 | 25 | 50 | 75 | 100 |
| Materia Flotante | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | | | |
| Sólidos Sedimentables (ml/l) | N.A. | N.A. | 1 | 2 | 5 | 7.5 | 10 |
| SST | N.A. | N.A. | 75 | 125 | 150 | 200 | - |
| DBO | N.A. | N.A. | 75 | 150 | 150 | 200 | - |
| NT | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | - | - | - |
| FT | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | - | - | - |
| Arsénico | 0.2 | 0.4 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 0.75 | 1 |
| Cadmio | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 0.75 | 1 |
| Cianuro | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1.5 | 2 |
| Cobre | 4 | 6 | 4 | 6 | 10 | 15 | 20 |
| Cromo | 0.5 | 1 | 0.5 | 1 | 0.5 | 0.75 | 1 |
| Mercurio | 0.005 | 0.01 | 0.005 | 0.01 | 0.01 | 0.015 | 0.02 |
| Níquel | 2 | 4 | 2 | 4 | 4 | 6 | 8 |
| Plomo | 5 | 10 | 0.2 | 0.2 | 1 | 1.5 | 2 |
| Zinc | 10 | 20 | 10 | 20 | 6 | 9 | 12 |

| Tabla 7. Comparación de los límites requeridos para el reúso de aguas tratadas | | | | | |
|--|--|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------|
| (México)NOM-003-SEMARNAT-1997 | | | | | |
| Tipo de reúso | Promedio mensual | | | | |
| | Coliformes fecales (NMP/100 mL) | Huevos de helminto (h/L) | Grasas y aceites (mg/L) | DBO ₅ (mg/L) | TSS (mg/L) |
| Servicios al público con contacto directo | 240 | >1 | 15 | 20 | 20 |
| Servicios al público con contacto indirecto u ocasional | 1,000 | <5 | 15 | 30 | 30 |



3.JUSTIFICACIÓN

La sobreexplotación de los recursos hídricos en la CDMX durante el último siglo ha conducido a una reducción significativa en el nivel freático de los mantos acuíferos, así como el hundimiento de su superficie. Esta situación ha generado una crisis en la que no es posible garantizar el servicio de suministro de agua potable en la entidad. Debido a ello, es fundamental fomentar la reutilización del agua mediante estrategias de selección e instalación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales eficientes y adaptables a las condiciones particulares de cada zona.

Se ha detectado que hay una amplia diversidad de tratamientos biológicos los cuales son capaces de eliminar diferentes tipos de contaminantes. Para alcanzar el objetivo de un tratamiento eficaz que cumpla con las normas de calidad del agua, es necesario seleccionar el sistema de tratamiento adecuado a cada tipo de agua a tratar. En este sentido, la matriz de decisión (MD) y el proceso de análisis jerárquico (AHP) representan herramientas factibles para elegir la opción más adecuada de tratamiento tomando en cuenta la definición de problemáticas a resolver y soluciones, a fin de que estos sean sometidos a los criterios para el proceso de selección y así identificar la alternativa más acorde a la problemática particular a cada zona.

El proceso de selección puede dificultarse debido a la amplia variabilidad en los sistemas de tratamiento existentes y las características particulares de cada uno (Grajales y col, 2013). Debido a ello, surge la necesidad de evaluar múltiples criterios, considerando los distintos elementos involucrados en el tratamiento de aguas residuales. Por ello, el presente trabajo propone realizar un análisis jerárquico en el que se evalúan las distintas variables involucradas en la operación de sistemas biológicos de tratamiento para seleccionar el más adecuado con base en dos escenarios distintos: la instalación de un reactor en una zona rural y en una zona urbanizada.



4. OBJETIVO GENERAL

Seleccionar del sistema de tratamiento biológico de aguas residuales más adecuado para dos casos de estudio utilizando herramientas de decisión en una zona rural y una zona urbana.

4.1. Objetivos específicos

1. Seleccionar y definir las características de los casos de estudio para implementar el método de selección en una zona rural y una zona urbana.
2. Determinar las problemáticas a solucionar para cada caso mediante matriz de decisión.
3. Seleccionar los criterios a implementar en la matriz de decisión (MD) y el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP).
4. Elegir las alternativas de tratamiento para cada caso a implementar en el Proceso de Análisis Jerárquico.



5. METODOLOGÍA

En la Figura 14 se presenta el diagrama de la metodología a desarrollar para la selección de la mejor opción de tratamiento para dos casos de estudio, mediante la metodología de matriz de decisión y Proceso de Análisis Jerárquico (AHP). Para ambos casos se consideraron los mismos criterios y las mismas alternativas de solución. Las metodologías de análisis son dependientes, de tal forma que la matriz de decisión se utiliza para determinar la problemática a resolver; la cual posteriormente se solventara a partir del análisis jerárquico.

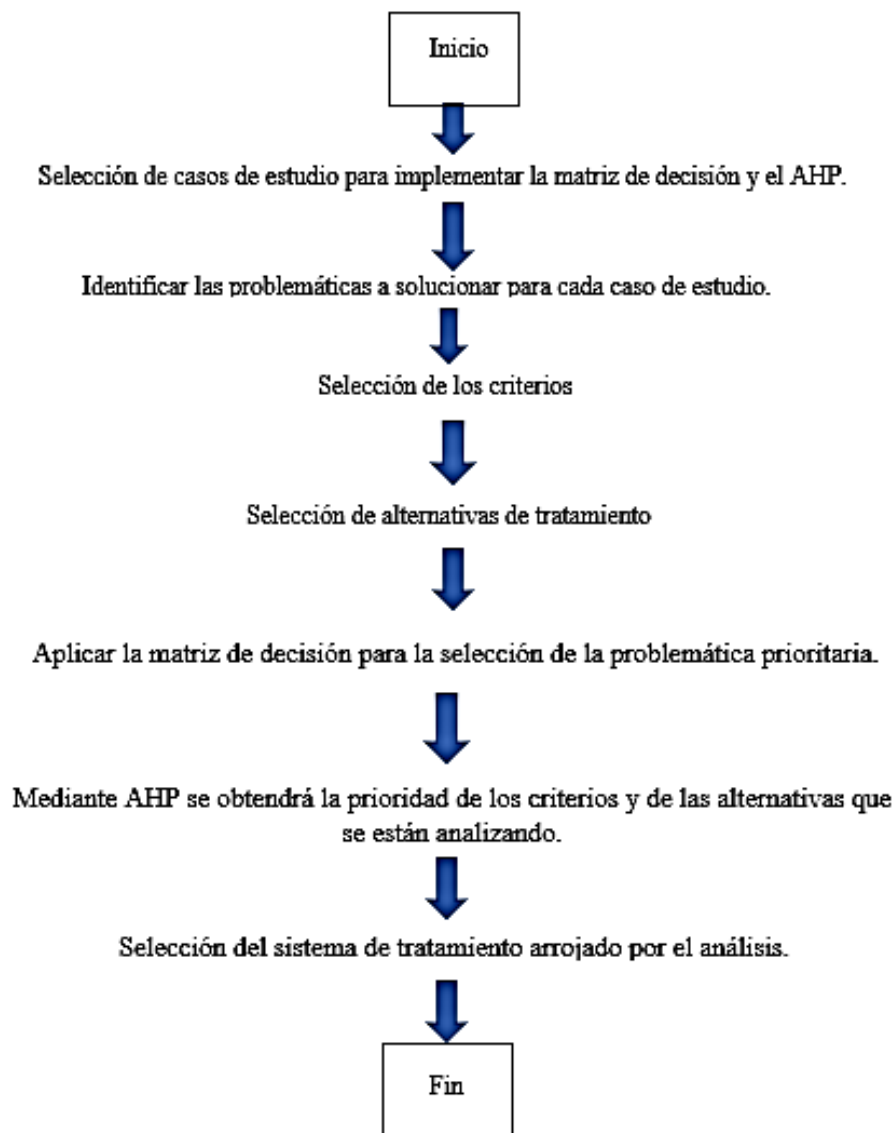


Figura 14. Metodología.

5.1. Elección de casos de estudio

Para este trabajo se eligieron dos casos de estudio, uno en una localidad en el municipio de Amecameca, Edo. México, y en un complejo habitacional de reciente construcción, dentro de la alcaldía Iztacalco, CDMX. Se eligieron estos casos para poder demostrar la versatilidad de los métodos en situaciones diversas y en diferentes ambientes.

5.1.1. Amecameca

Área de estudio: Amecameca, Edo. Méx. (Figura 15).

Habitantes: 300

Se eligió este municipio, debido a que, además de las actividades primarias agricultura y ganadería que se desarrollan en el municipio; se ofrecen también servicios turísticos, principalmente para los habitantes de la zona conurbada de la Ciudad de México y otros municipios cercanos del Estado de México.

El impacto del turismo se observa en el agua que este consume por concepto de las actividades de hospedaje y uso del espacio durante su estadía.



Figura 15. Ubicación de la zona de estudio en el municipio de Amecameca de Juárez.

Coordenadas: 19°07'25.9"N 98°44'21.6"W

Aparte de los contaminantes en el agua, producto de la agricultura (en el caso de Amecameca no hay riego, se espera la llegada de las lluvias) y de la ganadería, está el agua residual de las casas aledañas a la zona donde se llevan a cabo actividades propias de la población, la cual consta de aproximadamente 300 personas. La depuración del agua residual sería de importancia en la zona para la prevención de problemas de salud pública y en la conservación de los recursos hídricos.

5.1.2. Complejo habitacional en la Alcaldía Iztacalco.

Área de estudio: Iztacalco, CDMX

Habitantes por departamento: 4-5

Número de departamentos en el complejo: 149

Disponibilidad de lavadora: 100%

De acuerdo con la última información obtenida de los resultados del censo de población y vivienda del 2020 INEGI Iztacalco (Constitución Política de la Ciudad de México, Art. 52 y 53; 2017); los 338,520 de habitantes de la alcaldía cuentan con drenaje pluvial. Las actividades económicas que se llevan a cabo en la alcaldía son principalmente la industrial y comercial. La alcaldía cuenta con muy pocas áreas verdes sin embargo en este lugar está la Ciudad Deportiva y el Palacio de los deportes, lo cual le confiere una mayor superficie de captación de agua de lluvia por infiltraciones. El caso de estudio es un edificio de nueva creación, en el que se pretende implementar un sistema de tratamiento en el condominio. En este caso se tomará en cuenta el número de departamentos y la capacidad máxima de habitantes en el complejo.



Figura 16. Complejo habitacional en la Alcaldía Iztacalco .

Coordenadas: 19°23'59''N 99°04'42''W

5.3. Identificar las problemáticas en cada caso de estudio

Las problemáticas son definidas por el escenario de evaluación, la disponibilidad de información y los posibles conflictos entre los intereses de cada actor involucrado. Los intereses se asocian al problema en diferentes dimensiones de evaluación que hacen necesario un análisis multicriterio y discreto.

Para la elaboración de la matriz de decisión se establecieron las problemáticas a partir de un análisis en donde se tomaron en cuenta las necesidades de cada caso.

Las problemáticas por resolver en el caso Amecameca son:

1. Capacidad del área para implementación, se cuenta con 1 ha de implementación.
2. Mal manejo de los residuos sólidos, los cuales pueden obstruir el sistema de tratamiento que se pretenda implementar.
3. Zona de implementación rural muy cercana de un área natural protegida.
4. Baja concentración de materia orgánica en el agua residual.
5. Destino del agua tratada va a ser para riego de apoyo.
6. Falta de drenaje.

Las problemáticas por resolver en caso Iztacalco son:

1. Capacidad del área para implementación; se cuenta con muy poco espacio para la implementación.
2. Zona de implementación urbana con una fuerte presión en el consumo hídrico.
3. Impacto sobre las diferentes áreas verdes y recreativas que están dentro de la alcaldía.
4. Cambios de la concentración de contaminantes debido a la temporada de lluvias.
5. Aumento paulatino de habitantes en el complejo habitacional
6. Destino del agua tratada va a ser para sistemas sanitarios y áreas verdes.

5.4. Seleccionar los criterios de evaluación

Los criterios (juicios con los cuales se establecerán las relaciones con las alternativas de solución) evaluados en ambos casos de estudio y con las dos metodologías (Matriz de decisión y AHP) son:

- Criterios de diseño; es definido como los parámetros para el diseño de los diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales, que van de parámetros operacionales y concentraciones de contaminantes,
- Criterios de clasificación de las aguas a tratar; se define como la composición de las aguas residuales que ingresan al sistema de tratamiento,
- Calidad del efluente tratado; este criterio depende del destino y propósito que debe cumplir con la legislación vigente,
- Criterio de eficiencia; este criterio se define tomando como referencia las eficiencias de remoción de contaminantes reportadas para cada sistema de tratamiento de aguas residuales
- Criterio de espacio de instalación es definido como el área específica para su instalación, las cuales van a depender de la configuración del sistema, del caudal, y de las tasas de degradación de contaminantes a tratar y
- Criterio de consumo energético; es definido como los costos energéticos que tienen los sistemas de tratamiento como proceso.

Los detalles en torno a estos criterios mencionados se pueden revisar detalladamente en el capítulo 2.5 corresponden a los que van a ser utilizados para este análisis.

5.5. Alternativas de tratamiento

Como se mencionó las alternativas consideran las posibles situaciones o escenarios de evaluación, en pocas palabras son los elementos sobre los cuales se toma la decisión. En este caso las alternativas de tratamiento a analizar en ambos casos de estudio son: los sistemas de lodos activados, reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB), humedales, lagunas de estabilización facultativas, lagunas de estabilización de maduración, lagunas de estabilización anaerobias fosas sépticas (pretratamiento), filtro FAFA, biorreactores de membrana y los reactores de biopelícula MBBR.

5.6. Matriz de decisión

Dentro del desarrollo de los análisis multicriterio para la toma de decisiones se deben considerar distintos aspectos para asegurar la confiabilidad en los resultados entre los cuales destacan: 1) Evitar la pérdida de información en la adopción de decisiones mediante

enfoques basados en escenarios, 2) Incluir las opciones de los expertos en un marco de toma de decisiones de grupo (Grajales y col, 2013) y 3) Dar prioridad (Jerarquía) a los problemas que se pretenden resolver a fin de que, si bien ningún criterio sea excluido, se garantice un orden a la hora de hacer el proceso de decisión.

En la MD se llevó a cabo una comparación entre las problemáticas y los criterios ocupando una escala, asignándoles un valor del 1 al 4, donde 1 corresponde al valor de menor importancia y 4 al valor de mayor importancia. Se hicieron comparaciones por pares en términos de su importancia, formando matrices (Bottero y col., 2011). Se sumaron los valores obtenidos de la comparación, asignando a la problemática de mayor importancia a aquella que presentara los valores más altos.

5.7. Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)

En el AHP se elaboró un árbol en donde se ilustra la complejidad de este proceso, la problemática que se ubica al inicio en la parte más alta del diagrama después tenemos a los criterios y su relación entre ellos y por ultimo las alternativas que se ven afectadas por los criterios, en la base esa relación indica cual es la alternativa que resuelve la problemática. Posteriormente se realizó una matriz en donde se compararon en una primera etapa los criterios, establecidos previamente contra sí mismos y en una segunda etapa los criterios contra las alternativas propuestas bajo la escala de Saaty, para la asignación de valores (Saaty, 2008), comparando por pares en términos de su importancia. Se construyeron vectores de pesos relativos y se realizó el análisis de prueba de consistencia la cual debe ser menor que 0.1 para que el análisis sea válido. Si no hay consistencia se realiza de nueva cuenta el proceso AHP asignando nuevos valores. Si hay consistencia se calcula la ponderación de pesos de cada criterio para obtener el criterio prioritario (Casseres y col., 2013). Este mismo proceso se hizo para comparar los criterios contra las alternativas, obteniendo la alternativa que solucionara la problemática.

A continuación, se presentan las ecuaciones con las cuales se calculó la relación de coherencia, la cual está dada por las siguientes ecuaciones (Berumen y col., 2007).

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \quad \text{Ec. (1)}$$

$$i=1 \quad j=1$$

Donde:

λ_{\max} : es la suma total de los productos obtenidos de multiplicar la matriz inicial por el vector que corresponde a la ponderación de la matriz normalizada,

a: es la suma del vector de la ponderación y elementos de la matriz,

i: objetivos dados $i = 1, 2, \dots, m$,

j: alternativas

w_j : los pesos para cada i

Para cada objetivo i, se comparan las $j = 1, 2, \dots, n$ alternativas y se determinan los pesos w_j con respecto al objetivo i. Se determina el peso final de la alternativa w_j con respecto a todos los objetivos así $w_j = w_{1j}w_1 + w_{2j}w_2 + \dots + w_{mj}w_m$ (Berumen y col., 2007).

Las alternativas se ordenan de acuerdo con el w_j en orden descendente, donde el mayor valor indica la alternativa de mayor peso (Berumen y col., 2007).

$$CI = \lambda_{\max} - n/n - 1 \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

CI: Índice de consistencia que representa la relación entre los valores de evaluación asignados de la matriz contra las ponderaciones y la cantidad de criterios. Se debe acercar CI a la cantidad de criterios que se están utilizando (Berumen y col., 2007).

n: número de criterios y/o alternativas.

$$CR = CI/RI \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

CR= la relación de coherencia entre el índice de coherencia y el índice aleatorio dependiente de n debe ser inferior a 0.1 para un nivel aceptable de coherencia (Berumen y col., 2007).

RI = índice aleatorio dependiente de n.

Para determinar las prioridades de mayor importancia para cada caso, se tomaron las ponderaciones de las soluciones y las ponderaciones de los criterios antes establecidas mediante la siguiente ecuación. En tal caso esta ecuación es diferente a la ponderación hecha en el AHP (Berumen y col., 2007):

$$P_{Fi} = \sum_{M} P_m W_m \quad \text{Ec. (4)}$$

Priorización de los factores de acreditación.

Donde:

P_{Fi} : Priorización

W_m : representa el peso relativo de las ponderaciones de las alternativas (F_i) dentro del criterio evaluado y,

P_m : peso de cada criterio.

En este trabajo ambas herramientas fueron implementadas en Hoja de cálculo (Microsoft office Excel).



6. RESULTADOS

6.1. Matriz de decisión, Caso Amecameca

Se utilizaron los criterios y problemáticas seleccionados en la metodología para determinar la prioridad a solucionar. En la tabla 8, se muestra la matriz con los criterios y problemáticas seleccionadas para este caso.

Se les dio mayor importancia a las problemáticas enfocadas al reúso del agua y en la calidad del efluente, tomando como referencia lo que se sabe de cada criterio y cuáles eran los que más se enfocaban a la problemática a resolver, asignando a cada comparación el valor más alto.

Tabla 8. Matriz de decisión: criterios vs problemáticas para el caso Amecameca

| Problemática por solucionar | Criterios de diseño | Criterios de clasificación de las aguas a tratar | Calidad de los efluentes vertidos tratados | Criterio de eficiencia | Criterio de espacio de instalación | Criterio de consumo energético | Total | Prioridad |
|---|---------------------|--|--|------------------------|------------------------------------|--------------------------------|-------|-----------|
| 1. Capacidad del área para implementación | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 | 1 |
| 2. Mal manejo de los residuos generados por el turismo | 4 | 4 | 2 | 4 | 1 | 1 | 16 | 3 |
| 3. Zona de implementación rural muy cercana de un área natural protegida. | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 1 | 18 | 5 |
| 4. Baja concentración de contaminantes en el agua residual | 4 | 3 | 1 | 4 | 1 | 1 | 14 | 2 |
| 5. Destino del agua tratada va a ser para riego de cultivos | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 2 | 19 | 6 |
| 6. Falta de drenaje | 4 | 4 | 1 | 1 | 4 | 4 | 18 | 4 |

Con los resultados obtenidos en esta matriz se construyó la gráfica de “estrella” (figura 17) la cual muestra que la problemática con la mayor prioridad por resolver es que el destino del agua tratada va a ser para riego de cultivos, por lo cual la cantidad de patógenos en el agua tratada debe estar a niveles mínimos. La segunda problemática es un empate entre que la zona de implementación rural muy cercana de un área natural protegida y la falta de drenaje que queda como la tercera problemática debido a que es una problemática del tipo social y administrativa.

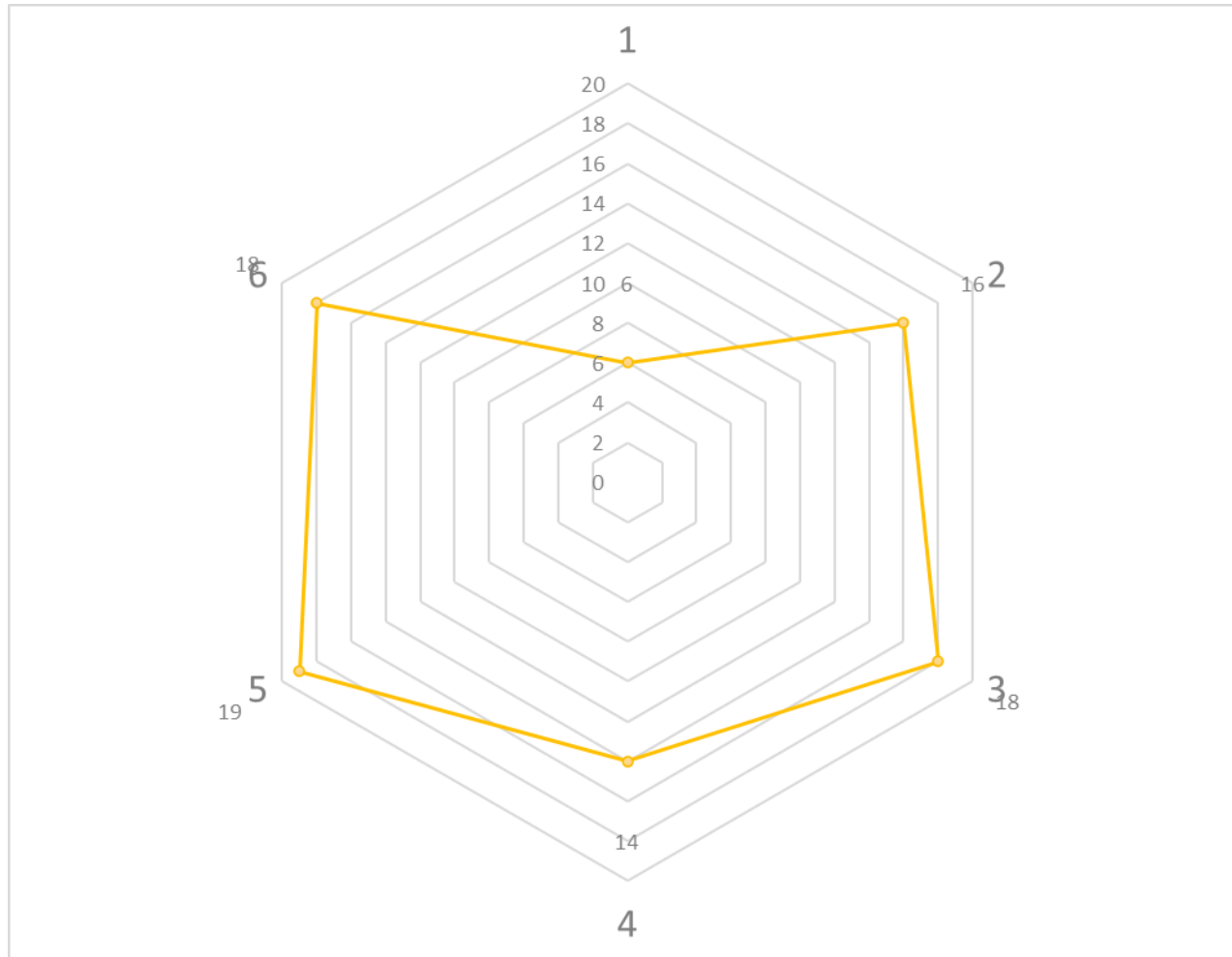


Figura 17 : Análisis multicriterio para determinar la problemática más prioritaria caso Amecameca

Una vez definida la problemática (Figura 17) prioritaria mediante la matriz de decisión, se realizó el diagrama de árbol (Figura 18) para ilustrar la relación entre la problemática a resolver, con los criterios y las alternativas. La figura 18 muestra que los criterios van a afectar a las alternativas en la selección del sistema de tratamiento idóneo.

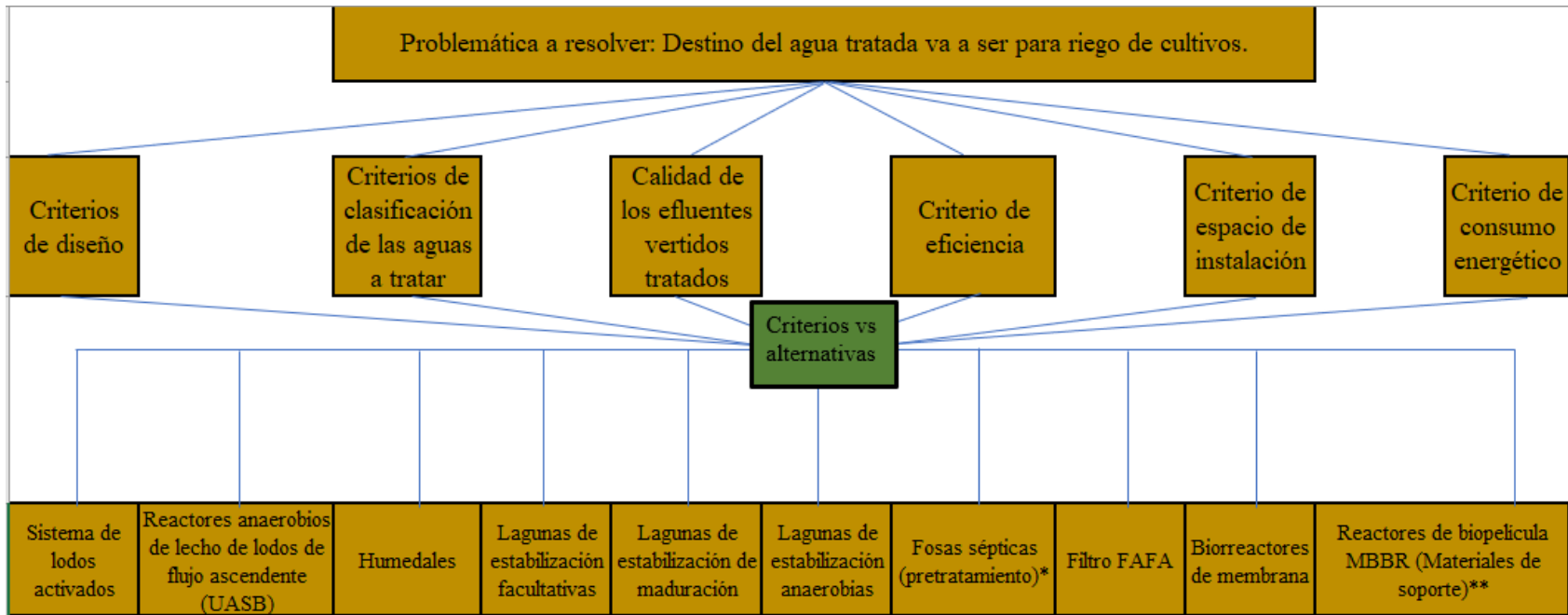


Figura 18. Diagrama de árbol AHP caso Amecameca

El primer análisis AHP se realizó comparando criterios vs criterios, para determinar la prioridad del criterio a considerar.

En la tabla 9 muestra el resultado final de la ponderación del análisis AHP de criterios vs criterios. El análisis permite relacionar los criterios evaluados mediante la información obtenida en cada criterio y al evaluar entre pares cada criterio definir cuál es más importante.

Se reportan los valores de la λ_{\max} obtenida, la cual para este caso fue de 6.54, el índice de coherencia fue de 0.107, el índice de relación fue de 1.32 y la relación de coherencia fue de 0.081 (Tabla 9). Estos valores sirven para saber si el análisis realizado tiene coherencia y está bien implementado; si la relación de coherencia fuera mayor a 0.1 eso quiere decir que el análisis no presenta subjetividades. Se encamino el análisis al criterio bajo el cual se puede resolver la problemática a resolver que es el reusó de agua para riego de cultivos. La calidad de los efluentes se definió desde el punto de vista de cumple o no con los parámetros establecidos por las normas oficiales mexicanas. Lo cual sigue la lógica de tener efluentes que garanticen su uso seguro en cultivos.

| Tabla 9. Priorización del análisis AHP Criterios vs Criterios | |
|---|--------------|
| Criterios | Priorización |
| Diseño | 0.049 |
| Espacio para la instalación | 0.060 |
| Consumo energético | 0.135 |
| Clasificación de las aguas tratadas | 0.168 |
| Calidad de los efluentes | 0.355 |
| Criterio de eficiencia | 0.231 |
| λ_{\max} | 6.536 |
| CI | 0.107 |
| RI | 1.32 |
| CR | 0.0813 |
| (La matriz de proceso AHP se puede consultar en el Anexo I) | |

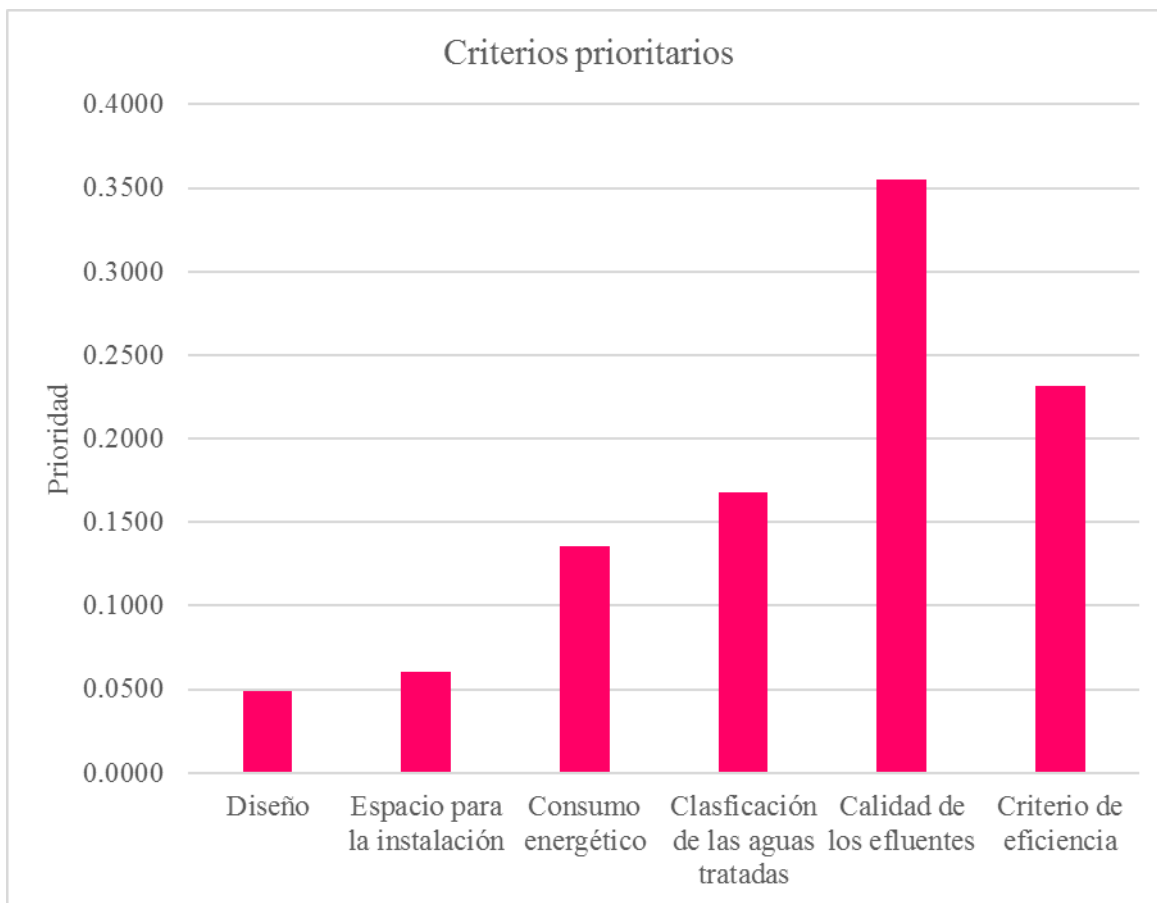


Figura 19. Prioridades obtenidas caso Amecameca

6.1.1. Proceso de análisis jerárquico (AHP): Criterios vs Alternativas caso Amecameca

Al realizar el AHP de alternativas vs criterios (Tabla 10) los resultados mostraron que las alternativas de mayor prioridad son los reactores de biopelícula, en segundo lugar, estuvieron los humedales y en tercero los reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB) (Figura 20). Se dieron mayor peso y valor a las alternativas que ayudaran más a conseguir que el agua tratada tenga la calidad establecida por la normativa en materia de aguas tratadas y de límites máximos permisibles para su uso agrícola. Al también hacer el análisis evaluando las alternativas contra cada criterio se toman en cuenta todos los aspectos antes de llegar a la opción más prioritaria. En tal caso, los reactores de biopelícula MBBR cumplen con las ventajas de mayor remoción de contaminantes dando una calidad de agua tratada buena para su uso en riego de cultivos. La alternativa que tuvo mayor peso es la que presento la mayor relación con respecto a los criterios bajo los cuales se hizo el proceso.

| Tabla 10. AHP Alternativas vs Criterios | |
|---|--------------|
| Alternativas / Criterios | Priorización |
| Sistema de lodos activados | 0.073 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 0.117 |
| Humedales | 0.118 |
| Lagunas de estabilización facultativas | 0.086 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 0.067 |
| Lagunas de estabilización anaerobias | 0.077 |
| Fosas sépticas (pretratamiento) | 0.087 |
| Filtro FAFA | 0.105 |
| Biorreactores de membrana | 0.116 |
| Reactores de biopelícula MBBR | 0.149 |

En análisis AHP completo se puede consultar en el Anexo II.

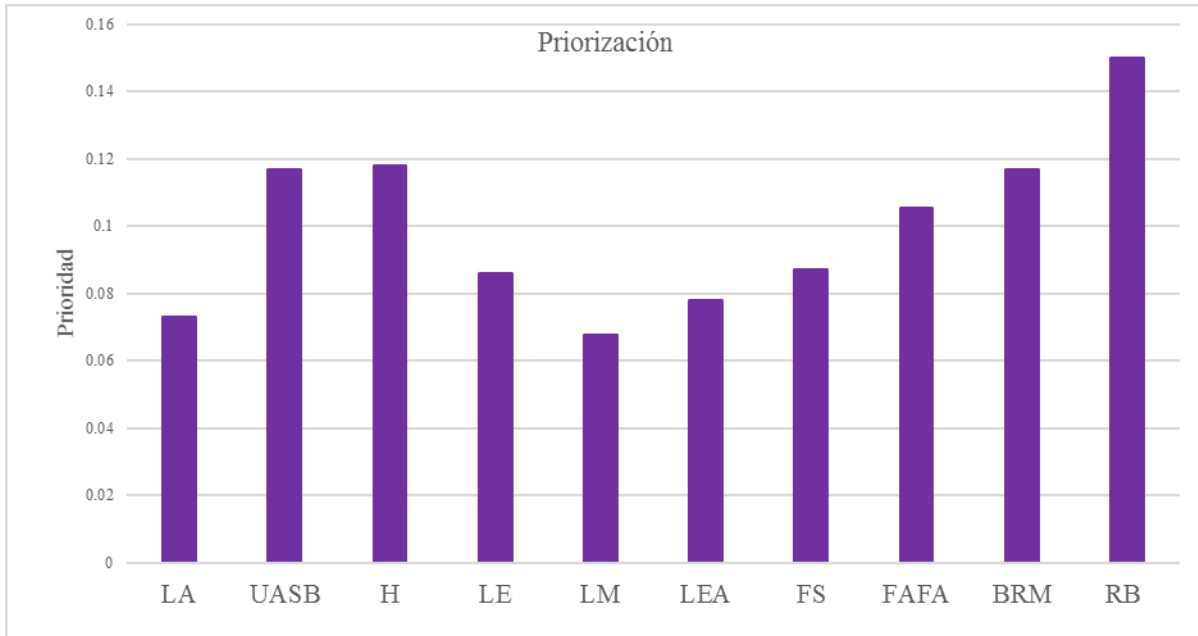


Figura 20: AHP Alternativas contra criterios caso Amecameca (En el Anexo II se pueden consultar las Ponderaciones del AHP alternativas vs alternativas para cada criterio del Caso Amecameca).

6.2. Matriz de decisión: Caso Iztacalco

Tomando como referencia la situación de la ciudad de México y de sus recursos hídricos y de la información que se tiene sobre el área de estudio, el objetivo es establecer un sistema de tratamiento de aguas en un complejo habitacional, que soporte las variaciones de carga de contaminantes debido a la temporada de lluvias y que en esa época la carga esta más diluida con respecto a la época de secas.

En este caso se utilizaron las problemáticas y criterios seleccionados en la metodología con la finalidad de determinar la prioridad a seleccionar. En la tabla 11 se muestra la matriz correspondiente a los criterios y problemáticas seleccionados para este caso.

Se asignó mayor importancia a las problemáticas centradas en su capacidad de resistir variaciones de concentración de contaminantes y en la mitigación de la presión hídrica de la ciudad, tomando como referencia lo que se sabe de cada criterio y cuáles eran los que más se enfocaban a ese objetivo principal asignando a cada comparación el valor más alto.

| Tabla 1. Matriz de decisión: Problemáticas vs Criterios para el caso Iztacalco | | | | | | | | |
|---|---------------------|--|--|------------------------|------------------------------------|--------------------------------|-------|-----------|
| Problemáticas para solucionar | Criterios de diseño | Criterios de clasificación de las aguas a tratar | Calidad de los efluentes vertidos tratados | Criterio de eficiencia | Criterio de espacio de instalación | Criterio de consumo energético | Total | Prioridad |
| 1. Capacidad del área para implementación | 3 | 1 | 3 | 2 | 4 | 4 | 17 | 3 |
| 2. Zona de implementación urbana con una fuerte presión en el consumo hídrico. | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 19 | 5 |
| 3. Impacto sobre las diferentes áreas verdes y recreativas que están dentro de la alcaldía. | 2 | 1 | 4 | 2 | 1 | 1 | 11 | 1 |
| 4. Variaciones de la concentración de contaminantes debido a la temporada de lluvias. | 4 | 4 | 4 | 3 | 1 | 4 | 20 | 6 |
| 5. Aumento paulatino de habitantes en el complejo habitacional | 4 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 18 | 4 |
| 6. Destino del agua tratada va a ser para sistemas sanitarios y áreas verdes. | 1 | 1 | 4 | 4 | 3 | 4 | 17 | 2 |

Con los resultados obtenidos en esta matriz se construyó la gráfica de “estrella” (figura 21) la cual muestra que la problemática con la mayor prioridad es variaciones de la concentración de contaminantes debido a la temporada de lluvias (Sosa, 2020). En la ciudad la temporada de lluvias es intensa y siempre se registran inundaciones en la zona oriente de la ciudad; todo el tiempo se reporta que calles y sistemas de transporte se inundan, además del reporte de inundaciones de condominios en donde hay sótanos y la situación de que el agua de lluvia se mezcla con el agua del sistema de alcantarillado obtenemos un problema ambiental y de salud pública importante (Sosa, 2020). La implementación de sistemas de tratamiento descentralizados en desarrollos inmobiliarios ayudaría a solucionar la situación hídrica de la entidad. La segunda problemática de mayor relevancia es que la zona de implementación es una zona urbana con una fuerte presión en el consumo hídrico, y la tercera el aumento paulatino de habitantes en el complejo habitacional.

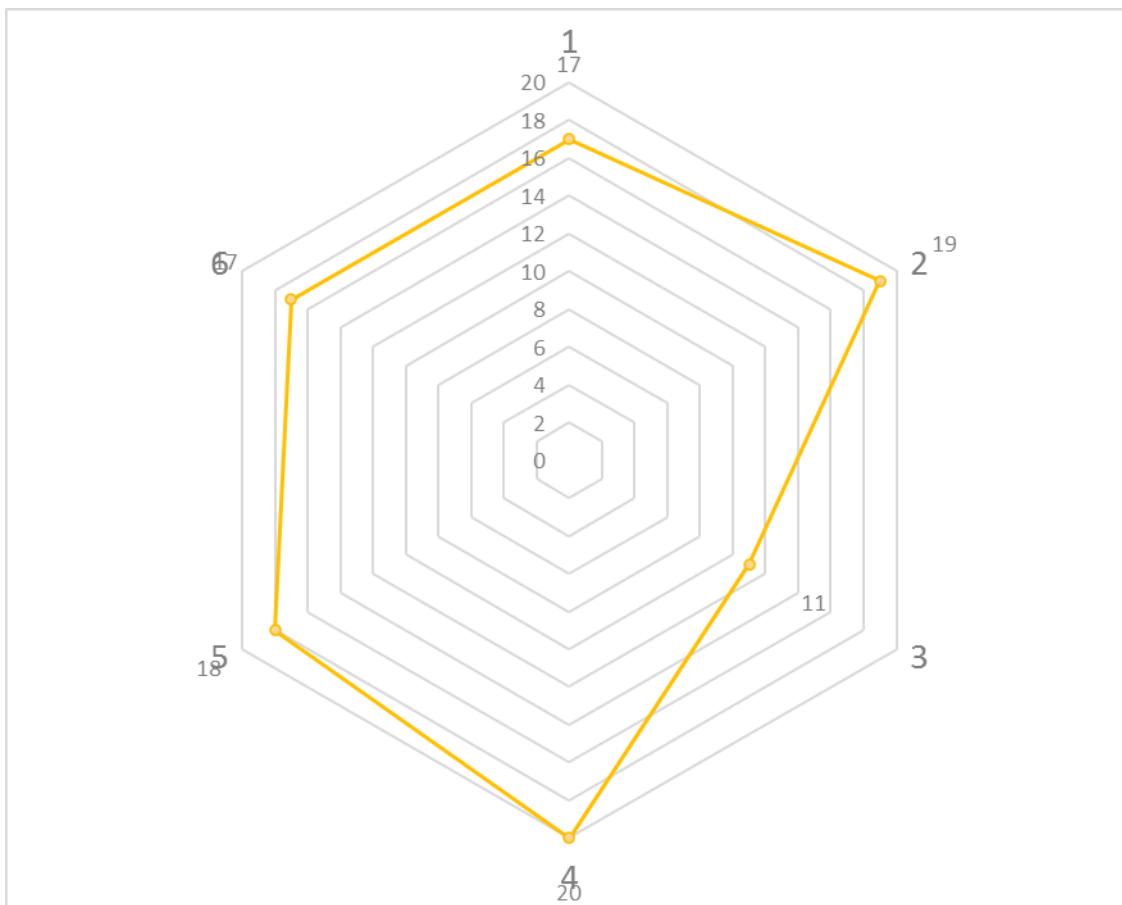


Figura 21 : Resultado de la matriz de decisión para determinar la problemática más prioritaria

A continuación, se presenta el diagrama de árbol a utilizar para el AHP en el caso de Iztacalco (Figura 22). Empleando la misma metodología se utilizaron los mismos criterios y las mismas alternativas para resolver una problemática diferente en una zona distinta. Destaca la complejidad del análisis AHP con respecto al análisis MD.

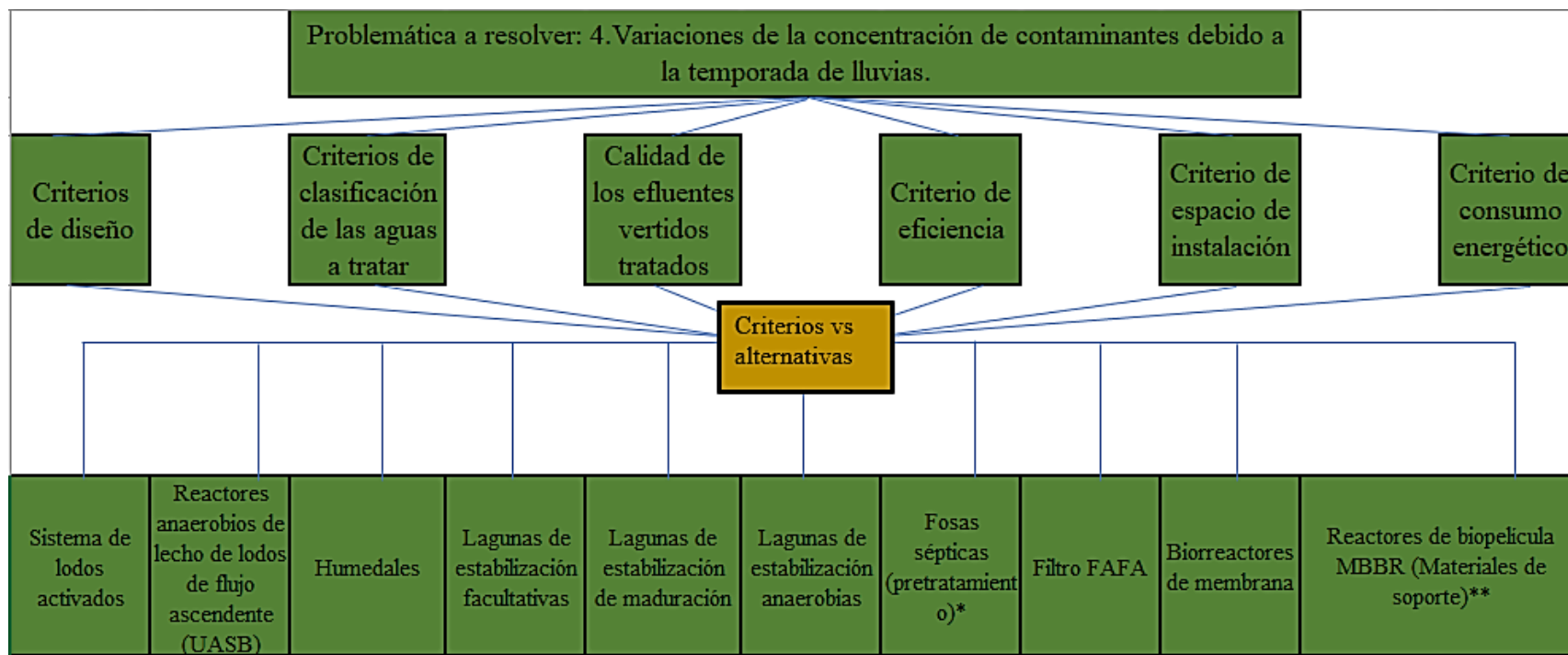


Figura 22. Diagrama de análisis AHP

Proceso de análisis jerárquico (AHP): Criterios vs Criterios

Para este caso el criterio de mayor prioridad fue el de diseño (Figura 23), la λ_{max} obtenida para este caso fue de 6.53, el índice de coherencia fue de 0.107, el índice de relación fue de 1.32 y la relación de coherencia fue de 0.081 (Tabla 12). El resultado está dentro del parámetro establecido de la CR de ser menor de 0.1 para decir que la herramienta está bien implementada y no tiene subjetividades. Siguiendo la lógica de solucionar el problema de instalar un sistema de tratamiento que resista variaciones de carga y que se pueda instalar en un complejo habitacional. Asignando en la matriz de decisión valores más altos a los criterios que ayuden a resolver la problemática.

| Tabla 12. Priorización del análisis AHP Criterios vs los Criterios. | |
|---|--------------|
| Criterios | Priorización |
| Diseño | 0.325 |
| Espacio para la instalación | 0.209 |
| Consumo energético | 0.186 |
| Clasificación de las aguas tratadas | 0.112 |
| Calidad de los efluentes | 0.096 |
| Criterio de eficiencia | 0.069 |
| λ_{max} | 6.5 |
| CI | 0.105 |
| RI | 1.32 |
| CR | 0.0802 |
| (El proceso de AHP se puede consultar en el Anexo I) | |

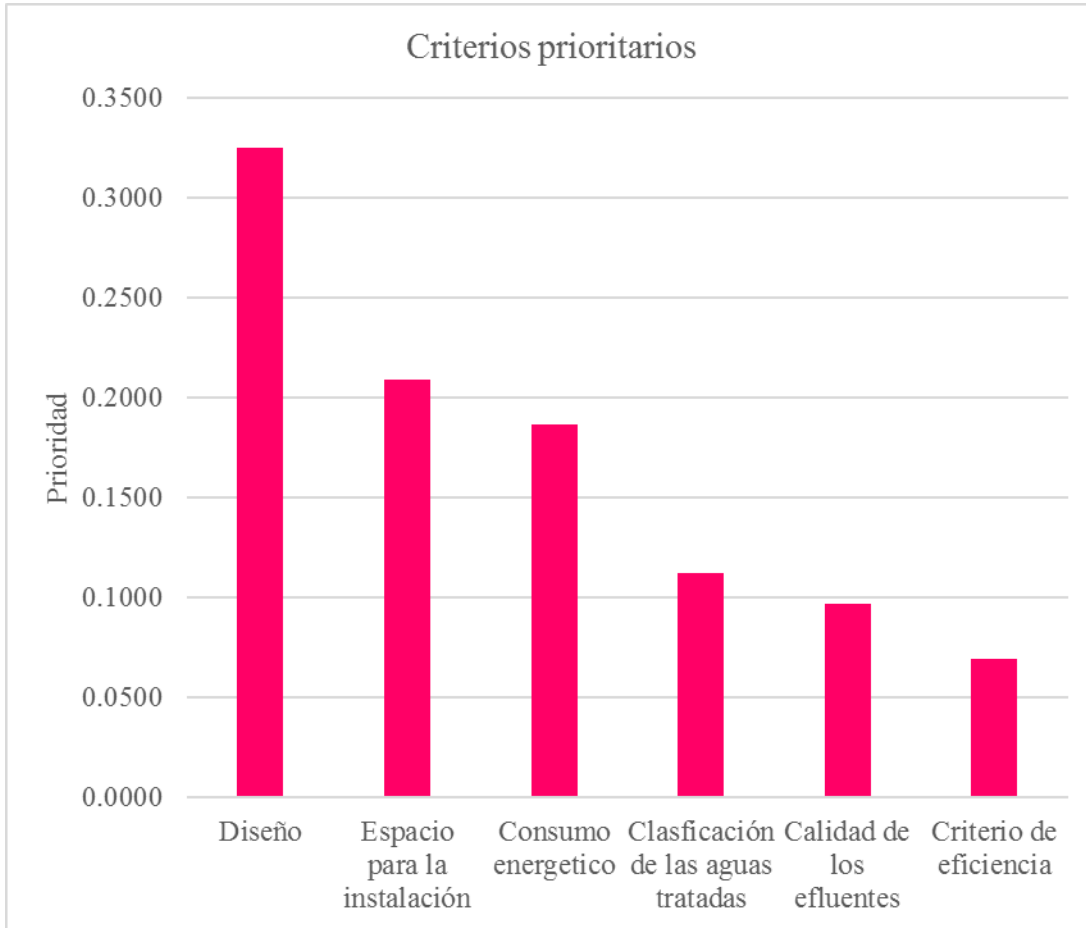


Figura 23: Criterios prioritarios caso Iztacalco

6.2.1. Proceso de análisis jerárquico (AHP): Criterios vs Alternativas caso Iztacalco

Se muestra a continuación en la figura 24 y la tabla 13; que el AHP dio como alternativas de mayor prioridad al reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB), en segunda prioridad quedo el filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) y en tercera opción la fosa séptica. En este caso se le dio mayor peso a esas alternativas que permitan el tratamiento de agua residual que constantemente va a tener cambios de concentración de contaminantes, los procesos anaerobios son simples, muy efectivos, soportan cambios de carga constantemente y que además fuesen compactos para su implementación en un complejo habitacional (Pacco y col. 2018). Igual se tomó en cuenta el análisis de las alternativas contra cada criterio. El espacio y el diseño fue lo que más peso tuvo en este análisis, los reactores UASB tienen esa gran ventaja en cuestión a su diseño y tamaño el cual es una excelente alternativa para complejos habitacionales.

El resultado sigue esta lógica establecida desde la selección de la problemática a solucionar que es la resistencia a variaciones de carga y un diseño que garantice que se puede instalar el sistema de tratamiento en un edificio de departamentos.

| Criterios | Priorización |
|---|--------------|
| Sistema de lodos activados | 0.076 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 0.128 |
| Humedales | 0.079 |
| Lagunas de estabilización facultativas | 0.078 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 0.084 |
| Lagunas de estabilización anaerobias | 0.099 |
| Fosas sépticas (pretratamiento) | 0.116 |
| Filtro FAFA | 0.124 |
| Biorreactores de membrana | 0.111 |

| | |
|--|-------|
| Reactores de biopelícula MBBR | 0.101 |
| La matriz AHP se puede consultar en el Anexo II. | |

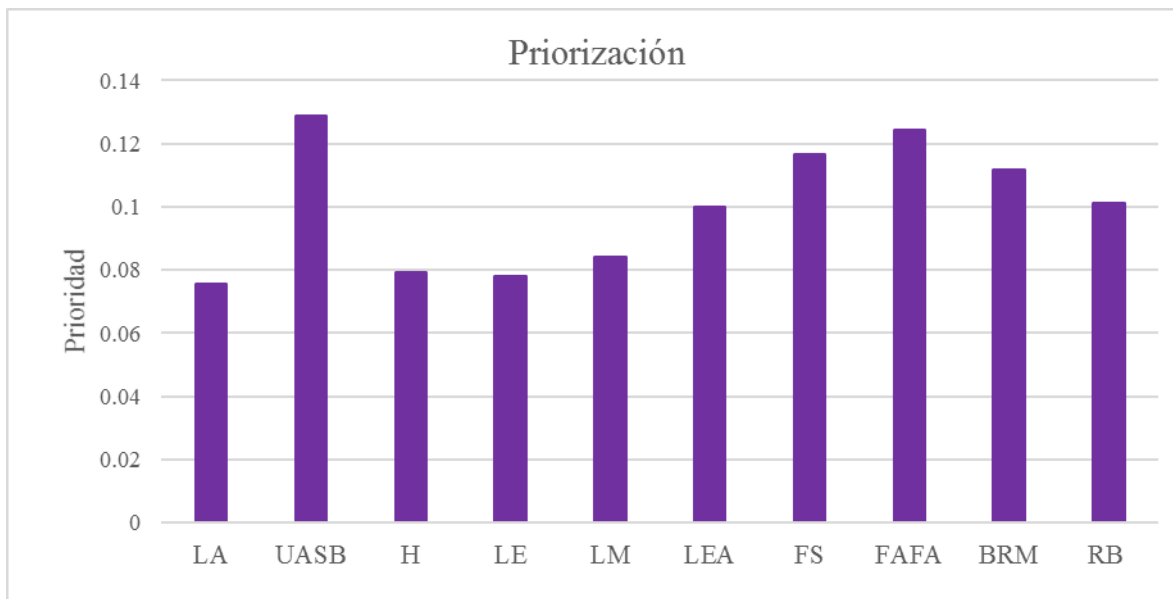


Figura 24: AHP Alternativas contra criterios

Para ambos casos se llevó el análisis de relación de coherencia entre las opiniones pareadas (que es el cociente entre el índice de consistencia y el índice de relación) para cada criterio y alternativa. Esto se hace con el fin de garantizar que el análisis no presenta subjetividades. En la siguiente tabla se presentan las λ_{\max} para cada análisis realizado. Se puede observar que los valores obtenidos son muy cercanos entre sí y a la cantidad de alternativas que se están evaluando en el AHP en relación con los criterios contra los que se les evaluó. Al final es de destacar que aunque se hizo el análisis para ambos casos el resultado de las relaciones entre los criterios y las alternativas fueron totalmente distintos. Dándonos la pauta para poder tomar en cuenta estas herramientas para resolver problemas complejos.

| Criterio | Caso | |
|----------|-----------|-----------|
| | Amecameca | Iztacalco |
| Diseño | 11.327 | 10.568 |

| | | |
|--------------------------|---------|---------|
| Clasificación | 11.259 | 11.096 |
| Dimensiones | 11.384 | 10.576 |
| Consumo energético | 11.378 | 11.0036 |
| Calidad de los efluentes | 11.0062 | 11.4104 |
| Criterio de eficiencia | 11.4095 | 11.3959 |

6.3. Discusión de resultados

6.3.1. Caso Amecameca

Los criterios utilizados para atender las problemáticas propuestas fueron analizados en la matriz de decisión desde el punto de vista técnico. Esta herramienta permitió identificar el problema prioritario por atender, que, en este caso de estudio, fue que el agua tratada va a ser usada en el riego de tierras agrícolas, y la problemática con menor importancia es la baja concentración de contaminantes en el agua residual.

El diagrama de árbol para este caso muestra que la solución del problema a atender es compleja, ya que se deben considerarse todas las interacciones entre los criterios, así como entre las distintas alternativas propuestas.

El AHP comparando criterios vs criterios, permitió identificar que el criterio de mayor prioridad para este caso de estudio fue la calidad de los efluentes. Así mismo, los criterios de contaminantes a tratar y clasificación del agua residual están estrechamente relacionados con la calidad de los efluentes. Este resultado tiene sentido, ya que se requiere que la calidad de agua tratada sea la adecuada para poder ser usada para el riego de los cultivos y asegurar la salud de los consumidores. Establecer prioridades permite establecer cuál va a ser la condicionante para la elección del sistema de tratamiento. Esto se observó mucho más cuando se determinó el criterio de mayor prioridad que fue la calidad de los efluentes. La elección fue encaminada a que el agua tenga la calidad para poder ser reusada en cultivos y mejorar la calidad de los efluentes.

Amecameca.

El análisis AHP comparando Alternativas vs Criterios (Figura 21) mostró que la mejor alternativa tratamiento para este caso de estudio el reactor de biopelícula MBBR, en segundo lugar, los humedales y en tercer lugar los reactores UASB. A continuación, se

presentan en la siguiente tabla 15 las ventajas y desventajas que hay con el sistema MBBR aplicado en Amecameca.

| Tabla 15. Ventas y desventajas del sistema MBBR (Alibaba, 2021 y Abdelfattah, 2020). | |
|--|--|
| Ventajas | Desventajas |
| En los reactores MBBR la biomasa es más resistente a las variaciones en las concentraciones de aguas residuales influentes y a los cambios repentinos de pH, temperatura y sustancias toxicas. | <p>Diseño requiere de recursos humanos especializados para la operación y control del reactor.</p> <p>El costo de los materiales es elevado, en el caso del material de soporte en el costo por kilogramo de materiales de soporte es de \$13.50 pesos mexicanos en una compra mínima de 1 tonelada.</p> <p>Las desventajas de este sistema son que, para ponerlo en marcha, se requiere de mucho tiempo, alto consumo de energía.</p> |

De acuerdo con Liang (2005), para la implementación de un sistema MBBR el efluente debe tener un rango de concentración de SST y SSV de 135 – 176 mg/L y 112 – 144 mg/L, respectivamente (Liang, 2005). En estos sistemas, la biomasa que se desprende del material de soporte en el reactor permite la recirculación de lodos para mantener la biomasa constante en los materiales de soporte. Cabe destacar que, con respecto a los materiales de soporte, hoy en día hay opciones de compra al mayoreo o pueden ser construidos a partir de materiales inocuos y de bajo costo (Abdelfattah, 2020).

El reactor MBBR fue la opción de tratamiento seleccionada debido a que produce efluentes con concentraciones de contaminantes usualmente bajas, lo que permite que su destino sea como agua de riego, lo cual encaja con el contexto de la localidad donde se pretende implementar. Sin embargo, al tomar como único punto de referencia la calidad de efluentes, se descartan aspectos como los sociales, los ecológicos y los económicos como criterios de análisis para resolver la problemática principal.

Siendo los MBR sistemas de tratamiento avanzado, es importante considerar que su grado de tecnificación y los costos de capital y operación asociados a su instalación suelen ser elevados, por lo que sería importante considerar como una segunda opción la instalación de humedales artificiales, los cuales se caracterizan por ser sistemas robustos, que producen efluentes con bajas concentraciones de contaminantes a bajo costo y con nulo consumo ya que mejoraría el espacio desde un punto de vista estético. Además de que aparece en segundo lugar de prioridad en el análisis AHP.

6.3.2. Iztacalco

La matriz de decisión para el caso Iztacalco se realizó desde el punto de vista técnico, esto permitió identificar el problema prioritario por atender, que fue que durante la temporada de lluvias la zona sufre de inundaciones. Como segunda problemática se consideró que la zona de implementación es una zona urbana con una fuerte presión en el consumo hídrico, y la tercera es el aumento paulatino de habitantes en el complejo habitacional. Al igual que en el caso Amecameca, el diagrama de árbol muestra que la solución del problema por atender es igual de compleja. El AHP comparando criterios vs criterios permitió identificar en este caso el criterio de mayor prioridad, el cual fue el diseño y en segundo lugar el espacio para la instalación. Lo cual es coherente, ya que el sistema de tratamiento se pretende implementar en un complejo habitacional, en donde la disponibilidad de área es generalmente limitada.

En el AHP comparando alternativas vs criterios (Figura 25), el sistema de tratamiento de aguas residuales que obtuvo la mayor prioridad fue el reactor UASB. En la tabla 16 se presentan las ventajas y desventajas de implementar un reactor de estas características en un complejo habitacional. Particularmente se observa que la remoción de nutrientes y patógenos se lleva a cabo sólo de forma parcial; por lo tanto, se recomienda combinar este sistema con un pretratamiento (fosa séptica) el cual es adaptable a una zona habitacional.

| Tabla 16. Ventajas y desventajas del reactor UASB (Engida y col, 2020; Gandarillas y col, 2017; Pacco y col. 2018;). | |
|---|---|
| Ventajas | Desventajas |
| <p>Las ventajas de este sistema son que requiere de áreas pequeñas para su instalación. Presenta altas eficiencias de remoción, obtenidas incluso con aguas altamente concentradas en contaminantes y de huevos de helminto. Los UASB no requieren de ningún tipo de soporte para la retención de la biomasa ni de agitación mecánica. El reactor puede arrancar casi de inmediato. Presenta lodos con altas propiedades de compactación y bajas tasas de crecimiento. Produce biogás. Su construcción es simple y de bajo costo, con muy limitados requerimientos de equipo electromecánico.</p> | <p>Las desventajas son que presenta bajas eficiencias de remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo).</p> <p>La remoción de patógenos es parcial en el reactor UASB. El proceso biológico, es sensible a la temperatura del agua residual (inferior a 16 °C) y a cambios bruscos de pH fuera del intervalo de 6.5 a 7.5. Los fallos en la operación o las sobrecargas suelen provocar malos olores al escape de gases.</p> |

El AHP no permite obtener resultados de una forma tan sencilla y muchas veces es necesario todo un grupo de expertos para elegir los valores a establecer. Sin embargo, permite hacer un análisis de relación entre los propios criterios que se están evaluando y posteriormente de los criterios contra las alternativas. Se observa como los criterios afectan a las alternativas generando con esto un análisis más amplio a la hora de la toma de decisión.

Tomando de referencia a Molinos-Senante y col. (2014), quienes aplicaron el análisis AHP para analizar entre varios sistemas de tratamiento cual es el más sustentable. Analizando

bajo criterios y subcriterios: ambiental (diez subcriterios), social (cinco subcriterios) y económico (dos subcriterios). Las alternativas definidas fueron los humedales artificiales, lagunas de estabilización, aireación extendida, bioreactor de membrana, reactor RBC, filtro de goteo y el reactor Batch. El resultado fue que el criterio ambiental fue el de mayor prioridad y tomando como referencia ese criterio para el análisis AHP, los humedales artificiales fueron la alternativa con mayor importancia.

6.4. Matriz de decisión y Proceso de análisis jerárquico

La ventaja que hay en la implementación de la matriz de decisión es la obtención de resultados inmediatos y de forma sencilla, en este caso la matriz de decisión se utilizó para determinar la problemática prioritaria para cada caso de estudio. Su principal ventaja es que el establecimiento del peso entre las diferentes problemáticas y los criterios, permiten orientar al tomador de decisión y aproximarlos al siguiente paso que puede ser otra herramienta de decisión por ejemplo el AHP.

El AHP como herramienta de decisión establece las relaciones entre los criterios que se definen para resolver una problemática y cómo los criterios afectan a las alternativas buscando siempre que el análisis no tenga subjetividades. La finalidad de este es tener la alternativa que toma en cuenta todos los criterios, en este caso se utilizó para seleccionar el sistema de tratamiento más idóneo para resolver la problemática prioritaria.

A manera de resumir las dos metodologías, es destacable mencionar que es ampliamente recomendable la aplicación acoplada de la matriz de decisión con el proceso de análisis jerárquico, pues son métodos que pueden ser implementados en programas comerciales para la elaboración de tablas de datos (Microsoft office Excel) y en software de código abierto; además existen una amplia gama de softwares especializados para este análisis, accesibles a profesionales de diferentes áreas.

6.5. Conclusiones

Las herramientas de decisión utilizadas en este estudio, MD y AHP permitieron seleccionar la mejor opción de tratamiento para los dos casos de estudio.

Mediante el análisis MD se determinaron las problemáticas prioritarias a atender; para el caso Amecameca la problemática a resolver fue el destino del agua tratada para riego de

cultivos. Para el caso Iztacalco, fueron las variaciones de la concentración de contaminantes debido a la temporada de lluvias que afectan la operación del reactor.

El análisis AHP permitió seleccionar la mejor opción de tratamiento para los dos casos de estudio, para Amecameca la mejor opción fue un sistema de tratamiento avanzado (reactor de biopelícula MBBR). La principal ventaja que presenta este sistema es que la biomasa es más resistente a las variaciones en las concentraciones de contaminantes, cambios repentinos de pH, temperatura y sustancias tóxicas.

Para el caso Iztacalco arrojó que la mejor opción fue el reactor UASB por ser compacto y su capacidad para soportar variaciones de carga. Su principal ventaja es que no requieren de ningún tipo de soporte para la retención de la biomasa ni de agitación mecánica.

6.6. RECOMENDACIONES

Es ampliamente recomendable el proceso AHP debido a que es un método que puede ser implementado en programas comerciales para la elaboración de tablas de datos (Microsoft office Excel) y en software de código abierto; además de que hay software especializado para este análisis por lo que profesionales de diferentes áreas pueden usar esta herramienta para decidir por una de muchas alternativas que hay para el tratamiento de aguas residuales.

Como áreas de oportunidad para darle continuidad a este trabajo de investigación se debe considerar; desarrollar análisis de campo e incluir dentro del AHP criterios económicos, ecológicos y sociales a fin de darle un enfoque más global a la elección de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Es recomendable continuar haciendo este tipo de trabajos a fin de fortalecer la implementación de las herramientas de toma de decisión en temas ambientales.



7. BIBLIOGRAFIA

- Abdelfattah, A., Hossain, M. I., & Cheng, L. (2020). High-strength wastewater treatment using microbial biofilm reactor: a critical review. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02853-y>
- Aileen. Ng., & Kim, A. S. (2007). A mini-review of modeling studies on membrane bioreactor (MBR) treatment for municipal wastewaters. *Desalination*, 212(1-3), 261-281. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.10.013>.
- Arias I., Carlos A., & Brix, Hans (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, (13),17-24.[fecha de Consulta 27 de Julio de 2021]. ISSN: 0124-8170. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101302>
- Atlas, Ronald M., 1946- *Ecología microbiana y microbiología ambiental / Madrid :* Pearson Educación, 2002.
- Berumen, Sergio A., & Llamazares Redondo, Francisco (2007). La utilidad de los métodos dedecisión multicriterio(como el ahp) en un entornode competitividad creciente. *Cuadernos de Administración*, 20(34),65-87.[fecha de Consulta 12 de Octubre de 2021]. ISSN: 0120-3592. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=20503404>
- Bottero, M., Comino, E., & Riggio, V. (2011). Application of the analytic hierarchy process and the analytic network process for the assessment of different wastewater treatment systems.

Environmental modelling & software, 26(10), 1211-1224.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.04.002>.

- Camacho Ríos, C. M., & Gómez Benavides, G. R. (1996). Diseño a escala de un sistema de discos rotatorios para el tratamiento de aguas residuales domésticas (Bachelor's thesis, Universidad Autónoma de Occidente).
- Carrera, J. (2004). Eliminación biológica de nitrógeno en un efluente con alta carga estudio de los parámetros del proceso y diseño de una depuradora industrial. Universitat Autònoma de Barcelona.
- Castillo-Borges, E., Santos-Ocampo, B., Méndez-Novelo, R.,I., Pietrogiovanna-Bronca, J., Espadas-Solís, A., Quintal-Franco, C., & Pat-Canul, R. (2013). Tratamiento de efluentes de fosas sépticas mediante el uso de un sistema de contactor biológico rotatorio. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 4(3), 125-134. Retrieved from <http://bidi.uam.mx:6086/login?url=https://bidi.uam.mx:3350/docview/1441279962?accountid=37347>
- Casseres, D. A. M. (2013). Aplicación de la teoría de decisión multicriterio discreta para ponderar factores en procesos de acreditación de alta calidad. *Inge Cuc*, 9(1), 25-41.
- Castro, A., García, J. L., Sifuentes de la Hoya, E., & Linares, M. V. (2016). Estudio del Estado del arte de las aplicaciones de Analytic Hierarchy Process. *Cultura Científica Y Tecnológica*, (51). Recuperado a partir de <http://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/950>
- Cegarra, L., Gómez, C., Márquez, R., & Ríos-Bolívar, M. (2014). Promediación de un proceso de tratamiento de aguas residuales con lodos activados basado en el modelo ASM3, Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, CLCA 2014 Octubre 14-17, 2014. Cancún, Quintana Roo, México.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2018). Estadísticas del agua en México. CONAGUA.
- Conagua-IMTA (2007b). Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Manual de diseño de lagunas de estabilización (234 pp.). Jiutepec, México: Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Conagua-IMTA (2015). Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Filtros Anaerobios de

Flujo Ascendente. Jiutepec, México: Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

- Publicada en la gaceta oficial de la ciudad de México el 05 de febrero de 2017; Constitución política de la Ciudad de México.
- Cortés-Martínez, Facundo, Treviño-Cansino, Alejandro, Espinoza-Fraire, Arturo Tadeo, Sáenz-López, Agustín, Alcorta-García, María Aracelia, González-Barrios, José Luis, Martínez-Rojas, Rodolfo, & Cruz-Acosta, Francisco Javier de la. (2017). Optimización en el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales integrado por tres lagunas de estabilización. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(4), 139-155. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-09>
- di Biase, A., Kowalski, M. S., Devlin, T. R., & Oleszkiewicz, J. A. (2019). Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: A review. *Journal of environmental management*, 247, 849-866. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.053>
- Dueñas Israel, D. B. (2019). Diseño de un sistema de tratamiento asistido de biopelículas para la remoción de PCBs en aguas residuales. Universidad de Chile facultad de ciencias físicas y matemáticas departamento de ingeniería química, biotecnología y materiales. Santiago de Chile.
- Engida, T. M., Wu, J. M., Xu, D., & Wu, Z. B. (2020). Review paper on treatment of industrial and domestic wastewaters using uasb reactors integrated into constructed wetlands for sustainable reuse. *Applied ecology and environmental research*, 18(2), 3101-3129. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1802_31013129
- EPA. (2011). Principles of Design and Operations of Wastewater Treatment Pond Systems for Plant Operators, Engineers, and Managers. Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory. EPA/600/R-11/088.
- EPA. (2011). Principles of Design and Operation of Wastewater Treatment Pond Systems for Plant Operators, Engineers, and Managers. Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory. EPA/600/R-11/088.
- Erkan, H. S., Çağlak, A., Soysaloglu, A., Takatas, B., & Engin, G. O. (2020). Performance evaluation of conventional membrane bioreactor and moving bed membrane bioreactor for synthetic textile wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101631. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101631>

- Escolero, Oscar, Kralisch, Stefanie, Martínez, Sandra E., & Perevochtchikova, María. (2016). Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 409-427. Recuperado en 11 de noviembre de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222016000300409&lng=es&tlng=es.
- Gandarillas, V., Saavedra, O., Escalera, R., & Montoya, R. (2017). Revisión de las experiencias en el tratamiento de aguas residuales domésticas mediante reactores UASB en Cochabamba-Bolivia comparadas con las de Latinoamérica, India y Europa. *Investigación & Desarrollo*, 1(17), 83-98. DOI: 10.23881/idupbo.017.1-7i
- García Serrano, J., & Corzo Hernández, A. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Barcelona: Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya.
- Grajales-Quintero, Alberto, & Serrano-Moya, Edgar d., & Hahn Von-h., Christine m. (2013). Los métodos y procesos multicriterio para la evaluación. *Revista Luna Azul*, (36),285-306.[fecha de Consulta 7 de junio de 2021]. ISSN: . Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321728584014>
- González-Brambila, M., & López-Isunza, F. (2007). Transporte de masa y reacción en una biopelícula. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 6(2),127-136.[fecha de Consulta 12 de Octubre de 2021]. ISSN: 1665-2738. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62060201>
- Hashemi, S., & Boudaghpour, S. (2020). Economic analysis and probability of benefit of implementing onsite septic tank and resource-oriented sanitation systems in Seoul, South Korea. *Environmental Technology & Innovation*, Vol. 18, p.100762. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100762>
- Jojoa Unigarro, Germán Dimitriv, Rodríguez Zambrano, Hilda Lizeth, & Cardona Gallo, Santiago. (2014). CARACTERIZACIÓN Y MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN REACTOR UASB. *Revista EIA*, (22), 67-75. Retrieved March 11, 2021, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372014000200006&lng=en&tlng=es.

- IMTA, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2002). Tratamiento anaerobio de aguas residuales. Morelos: IMTA.
- Izazola, H. (2001). Agua y sustentabilidad en la Ciudad de México. Estudios Demográficos y Urbanos, 16(2 (47)), 285–320. <http://www.jstor.org/stable/40315074>
- Jördening, H. J., & Winter, J. (Eds.). (2005). Environmental biotechnology: concepts and applications. John Wiley & Sons. Capítulo 4.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). Treatment wetlands. CRC press. Edition 4 páginas
- Lorenzo, Yaniris, & Obaya, Ma. Cristina (2006). La digestión anaerobia y los reactores UASB. Generalidades. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, XL(1),13-21.[fecha de Consulta 12 de Octubre de 2021]. ISSN: 0138-6204. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223121549002>.
- Lucho-Constantino, C.A., Medina-Moreno, S.A., Beltrán-Hernández, R.I., Juárez-Cruz, B., Vázquez-Rodríguez, G.A., & Lizárraga-Mendiola, L.. (2015). Diseño de fosas sépticas rectangulares mediante el uso de la herramienta FOSEP. Revista mexicana de ingeniería química, 14(3), 757-765. Recuperado en 13 de octubre de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382015000300018&lng=es&tlng=es.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Dunalp, P. V., & Clark, D. P. (2009). Brock. Biología de los microorganismos 12 ed.
- Manahan, S. (2017). Environmental chemistry CRC Press. Capítulo 3.
- Mendoza Casseres, D. (2013). Aplicación de la teoría de decisión multicriterio discreta para ponderar factores en procesos de acreditación de alta calidad. INGE CUC, 9(1), 25-41. Recuperado a partir de <https://revistascientificas.cuc.edu.co/ingecuc/article/view/143>
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México. (2018). *Registro de Descargas de Aguas Residuales de la Ciudad de México*. 33. file:///R:/Documentos/Aguas tratadas/rdar-2015publicacionnueva-portada.pdf
- Merizalde, Edgar, Montenegro, Lucía, & Cabrera, Marcelo. (2019). Estudio de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Provenientes de una Industria de Papel. Revista Politécnica, 43(1), 7-14. Recuperado en 14 de noviembre de 2020, de

http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-01292019000200007&lng=es&tlng=es.

- Menikpura, S. N. M., Gheewala, S. H. & Bonnet, S. Framework for life cycle sustainability assessment of municipal solid waste management systems with an application to a case study in Thailand. *Waste Management & Research* 30 (7), 708–719. <https://doi.org/10.1177%2F0734242X12444896>
- Metcalf & Eddy Inc. (1995). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*. New York: McGraw-Hill.
- Molina, J. (2015). *Evaluación de la eliminación de materia orgánica y nitrógeno de las aguas residuales en un reactor biopelícula de membrana tubular aireada* (Doctoral dissertation, Universidade da Coruña).
- Molinos-Senante, M., Gómez, T., Garrido-Baserba, M., Caballero, R. & Sala-Garrido, R. Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: a composite indicator approach. *The Science of the Total Environment* 497–498, 607–617. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.026>
- Muñoz Paredes, Juan Fernando, & Ramos, Mauricio (2014). Reactores discontinuos secuenciales: una tecnología versátil en el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 24(1), 49-66. [fecha de Consulta 22 de noviembre de 2020]. ISSN: 0124-8170. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=911/91131484003>
- NADF-015-AGUA-2009, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales de procesos y servicios al sistema de drenaje y alcantarillado del distrito federal, provenientes de las fuentes fijas.
- National Research Council (1993). *In Situ Bioremediation: When Does it Work?* National Academy Press, Washington, D.C..
- Nguyen, T. K. L., Ngo, H. H., Guo, W. S., Chang, S. W., Nguyen, D. D., Nghiem, L. D., & Nguyen, T. V. (2020). A critical review on life cycle assessment and plant-wide models towards emission control strategies for greenhouse gas from wastewater treatment plants. *Journal of environmental management*, 264, 110440. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110440>
- NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

- NOM-002-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
- NOM-003-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios públicos.
- Olarte Avellaneda, Sergio, & Cristiano Sánchez, Juliet (2012). Aplicación de microorganismos asociados a biopelículas. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 4(1),153-163.[fecha de Consulta 14 de noviembre de 2020]. ISSN: 2145-549X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=5177/517751763012>
- Olguín, Eugenia J., & Hernández, María Elizabeth, & Sánchez-Galván, Gloria (2007). Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 23(3),139-154.[fecha de Consulta 29 de abril de 2021]. ISSN: 0188-4999. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37023304>
- Ozdemir, B., Saatci, A., & Yenigun, O. (2012). Evaluation of cake filtration biological reactors (CFBR) vs. membrane biological reactors (MBR) in a pilot scale plant. *Desalination*, 288, 135-144. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.12.024>
- Pabón, S. L., & Gélvez, J. H. S. (2009). Arranque y operación a escala real de un sistema de tratamiento de lodos activos para aguas residuales de matadero. *Ingeniería e Investigación*, 29(2), 53-58.
- Pacco, A., Vela, R., Miglio, R., Quipuzco, L., Juscamaita, J., Álvarez, C., & Fernández - Polanco, F. (2018). Propuesta de parámetros de diseño de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales porcinas. (Spanish). *Scientia Agropecuaria*, 9(3), 381. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.03.09>
- Palmarin, M. J. (2013). Development and evaluation of a hybrid membrane bioreactor for greywater reclamation (Order No. 28141791). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (2434044353). Retrieved from <http://bidi.uam.mx:6086/login?url=https://bidi.uam.mx:3350/docview/2434044353?accountid=37347>

- Parra Rodríguez, L. M. (2006). Operación de un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) hasta alcanzar el estado estable (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales).
- Peña Florez, L. A., & Rodríguez-Rojas, Y. L. (2018). Evaluation and selection of providers procedure based on the Hierarchical Analysis Process and a mixed integer/linear programming. *Ingeniería*, 23(3), 230-251. <https://doi.org/10.14483/23448393.13316>
- Plakas, K. V., Georgiadis, A. A., & Karabelas, A. J. (2016). Sustainability assessment of tertiary wastewater treatment technologies: a multi-criteria analysis. *Water Science and Technology*, 73(7), 1532-1540. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.630>
- Plata, Lorena, & Rivera, Dayana, & Castro, Liliana, & Guzmán, Carolina, & Escalante, Humberto (2012). Jerarquización de tecnologías para el aprovechamiento industrial del subproducto de la digestión anaerobia del bagazo de fique. *Revista UIS Ingenierías*, 11(2),171-185.[fecha de Consulta 12 de Octubre de 2021]. ISSN: 1657-4583. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=553756872004>
- Robles López, J. I. (2010). Aplicacion de un sistema de aireacion en la laguna de Bojorquez, Cancun, Mexico. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 31(3), 28+. <https://link.gale.com/apps/doc/A304306624/IFME?u=anon~1f60876b&sid=googleScholar&xid=52d61393>
- Rodríguez, S., Pérez, R. M., & Fernández, M. (2000). Estudio de la biodegradabilidad anaerobia de las aguas residuales del beneficio húmedo del café. *Interciencia*, 25(8), 386-390.
- Rolim, M. S. (2000). Sistemas de lagunas de estabilización. Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío (OPS/ OMS). Bogotá: McGraw-Hill.
- Romero Granda, P. A. (2015). Utilización de materiales de reciclaje como medio de soporte en reactores aerobios de biopelícula para tratamiento de agua residual doméstica (Bachelor's thesis, Machala: Universidad Técnica de Machala).
- Romero Rojas, J. A. (2004). Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. Bogotá, CO, Escuela Colombiana de Ingenieros.
- Saaty, Thomas L. Decision Making for Leaders: The Analytical Hierarchy Process for Decisions in a Complex World (1982). Belmont, California: Wadsworth. ISBN 0-534-97959-9; Paperback, Pittsburgh: RWS. ISBN 0-9620317-0-4. "Focuses on practical application of the AHP; briefly covers theory."

- Saaty, T. L. (2008). Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process. *RACSAM-Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie A. Matemáticas*, 102(2), 251-318. <https://doi.org/10.1007/BF03191825>
- Singh, R. P., Kun, W., & Fu, D. (2019). Designing process and operational effect of modified septic tank for the pre-treatment of rural domestic sewage. *Journal of Environmental Management*, Vol. 251, p. 109552. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109552>
- Sosa Rodríguez, F. (2020). Los impactos del cambio climático en la gestión del agua en la Ciudad de México. *Argumentos. Estudios Críticos De La Sociedad*, 1(92), 81-102. <https://doi.org/10.24275/uamxoc-dcsh/argumentos/202092-04>
- Świątczak, P., & Cydzik-Kwiatkowska, A. (2018). Performance and microbial characteristics of biomass in a full-scale aerobic granular sludge wastewater treatment plant. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(2), 1655-1669. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0615-9>
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L., and Stensel, H.D. (2003). *Wastewater Engineering (Treatment Disposal Reuse) / Metcalf & Eddy, Inc (4th ed.)*. McGraw-Hill Book Company.
- Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, 2(3), 530-549. <https://doi.org/10.3390/w2030530>
- De la Vega, M. (2012). *Eficiencia en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Contribución a la gestión y desarrollo social.*(Primera ed.). México: REFUGIA. Obtenido de <http://indesol.gob.mx/cedoc/pdf/III.%20Desarrollo%20Social/Agua%20y,20>.
- Del Villar, A. (2010). *Guía de tratamientos avanzados de aguas residuales urbanas.* Recuperado de http://www.consolider-tragua.com/documentos/guia_tratamientos_avanzados.pdf.
- Wei, C., Wei, J., Kong, Q., Fan, D., Qiu, G., Feng, C., ... & Wei, C. (2020). Selection of optimum biological treatment for coking wastewater using analytic hierarchy process. *Science of The Total Environment*, 742, 140400. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140400>
- Zamora Vacca, F. N. (2014). *Estudio de ensuciamiento de una membrana de microfiltración de poliétersulfona en un bioreactor anaerobio de membrana inmersa* (Master's thesis, Maestría en Ingeniería Ambiental).

- Zhu, Z., Chen, W., Tao, T., & Li, Y. (2018). A novel AAO-SBSPR process based on phosphorus mass balance for nutrient removal and phosphorus recovery from municipal wastewater. *Water research*, 144, 763-773. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.08.058>

7.1. Referencias electrónicas

Alibaba,2021; Materiales de soporte para reactor MBBR:
https://m.alibaba.com/product/1592600036/China-manufacturer-fish-farm-waste-water.html?spm=a2706.7835515.0.0.5b8f76bf1ZMyGs&__detailProductImg=//s.alicdn.com/@sc01/kf/HTB1mdRpcHus3KVjSZKbq6xqkFXak.jpg_220x220.jpg

Consultado el 03 de enero del 2021

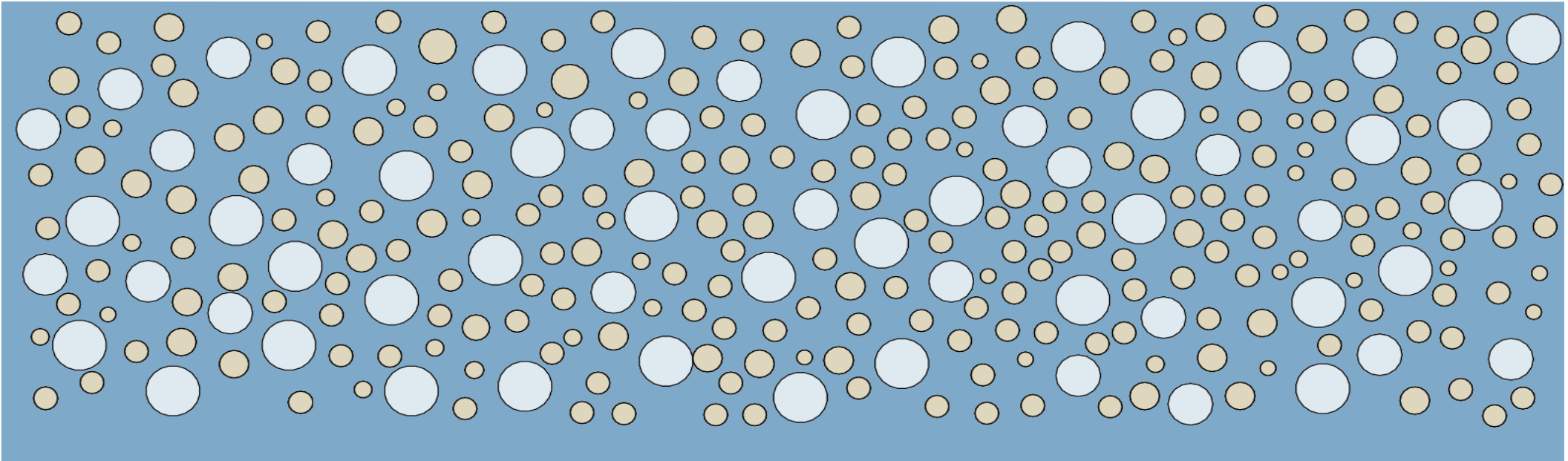
CONAGUA,2018; Estadísticas del agua en México:
http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf

Lenntech, 2021; Glosario de agua: <https://www.lenntech.es/glosario-agua.htm#T>

Consultado el 27 de Julio del 2021

SEMARNAT, 2021 Glosario de educación ambiental: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/glosario-de-educacion-ambiental>

Consultado el 27 de Julio del 2021



**Anexo I A: AHP; relación de coherencia Criterios contra criterios caso
Iztacalco**

| Criterios contra criterios | | | | | | |
|-------------------------------------|--------|-----------------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------------|------------------------|
| C x C | Diseño | Espacio para la instalación | Consumo energético | Clasificación de las aguas residuales | Calidad de los efluentes | Criterio de eficiencia |
| Diseño | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/5 | 1/5 | 1/4 |
| Espacio para la instalación | 2 | 1 | 1/4 | 1/3 | 1/5 | 1/4 |
| Consumo energético | 2 | 4 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Clasificación de las aguas tratadas | 5 | 3 | 2 | 1 | 1/3 | 1/3 |
| Calidad de los efluentes | 5 | 5 | 2 | 3 | 1 | 3 |
| Criterio de eficiencia | 4 | 4 | 2 | 3 | 1/3 | 1 |
| Total | 19.00 | 17.50 | 7.75 | 8.03 | 2.57 | 5.33 |
| | | | | | | |

| Criterios vs criterios | | | | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| Normalización | | | | | | Priorización |
| 0.0526 | 0.0286 | 0.0645 | 0.0249 | 0.0779 | 0.0469 | 0.0492 |
| 0.1053 | 0.0571 | 0.0323 | 0.0415 | 0.0779 | 0.0469 | 0.0602 |
| 0.1053 | 0.2286 | 0.1290 | 0.0622 | 0.1948 | 0.0938 | 0.1356 |
| 0.2632 | 0.1714 | 0.2581 | 0.1245 | 0.1299 | 0.0625 | 0.1683 |
| 0.2632 | 0.2857 | 0.2581 | 0.3734 | 0.3896 | 0.5625 | 0.3554 |
| 0.2105 | 0.2286 | 0.2581 | 0.3734 | 0.1299 | 0.1875 | 0.2313 |

| Criterios | |
|-----------|-----------|
| A x P | CI |
| 0.3097 | 0.1073679 |
| 0.3775314 | RI |
| 0.8522154 | 1.32 |
| 1.0617074 | CR |
| 2.3723483 | 0.08134 |
| 1.5633515 | |
| 6.5368 | |



**Anexo I B: AHP; relación de coherencia criterios contra criterios caso
Iztacalco**

| Criterios contra criterios | | | | | | |
|-------------------------------------|--------|-----------------------------|--------------------|-------------------------------------|--------------------------|------------------------|
| C x C | Diseño | Espacio para la instalación | Consumo energético | Clasificación de las aguas tratadas | Calidad de los efluentes | Criterio de eficiencia |
| Diseño | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Espacio para la instalación | 1/2 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 |
| Consumo energético | 1/3 | ½ | 1 | 3 | 3 | 3 |
| Clasificación de las aguas tratadas | 1/3 | ½ | 1/3 | 1 | 2 | 2 |
| Calidad de los efluentes | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/2 | 1 | 3 |
| Criterio de eficiencia | 1/3 | ½ | 1/3 | 1/2 | 1/3 | 1 |
| Total | 2.83 | 4.83 | 7.00 | 10.00 | 12.33 | 14.00 |

| Criterios | | | | | | |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| Normalización | | | | | | Priorización |
| 0.3529 | 0.4138 | 0.4286 | 0.3000 | 0.2432 | 0.2143 | 0.3255 |
| 0.1765 | 0.2069 | 0.2857 | 0.2000 | 0.2432 | 0.1429 | 0.2092 |
| 0.1176 | 0.1034 | 0.1429 | 0.3000 | 0.2432 | 0.2143 | 0.1869 |
| 0.1176 | 0.1034 | 0.0476 | 0.1000 | 0.1622 | 0.1429 | 0.1123 |
| 0.1176 | 0.0690 | 0.0476 | 0.0500 | 0.0811 | 0.2143 | 0.0966 |
| 0.1176 | 0.1034 | 0.0476 | 0.0500 | 0.0270 | 0.0714 | 0.0695 |

| Criterios | |
|-----------|-----------|
| A x P | CI |
| 2.1399 | 0.1058737 |
| 1.3991941 | RI |
| 1.2352539 | 1.32 |
| 0.7199389 | CR |
| 0.6018569 | 0.0802073 |
| 0.4332665 | |
| 6.5294 | |



Anexo II A: AHP; Alternativas vs alternativas para cada criterio caso Amecameca

Criterio de diseño

| Alternativa | Sistema de lodos activados | Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | Humedales | Lagunas de estabilización facultativas | Lagunas de estabilización de maduración | Lagunas de estabilización anaerobias | Fosas sépticas | Filtro FAFA | Biorreactores de membrana | Reactores de biopelícula MBBR |
|---|----------------------------|---|-----------|--|---|--------------------------------------|----------------|-------------|---------------------------|-------------------------------|
| Sistema de lodos activados | 1 | 1/2 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/2 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 2 | 1 | 1/3 | 1/2 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | ¼ | 1/4 |
| Humedales | 3 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 3 | 3 | 5 | 5 |
| Lagunas de estabilización facultativas | 3 | 2 | 1/2 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | ½ | 1/2 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 3 | 3 | 1/3 | 2 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | ½ | 1/2 |
| Lagunas de estabilización anaerobias | 2 | 3 | 1/4 | 2 | 2 | 1 | 1/2 | 1/2 | ½ | 1/2 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|----|------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|
| Fosas sépticas | 3 | 3 | 1/3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| Filtro FAFA | 3 | 3 | 1/3 | 2 | 2 | 2 | 1/3 | 1 | 3 | 3 |
| Biorreactores de membrana | 3 | 4 | 1/5 | 2 | 2 | 2 | 1/3 | 1/3 | 1 | 2 |
| Reactores de biopelícula MBBR | 3 | 4 | 1/5 | 2 | 2 | 2 | 1/3 | 1/3 | 1/2 | 1 |
| Total | 26 | 26.5 | 3.81666667 | 15.83333333 | 15.16666667 | 14.83333333 | 7.16666667 | 9.83333333 | 14.58333333 | 16.08333333 |

| Normalización | | | | | | | | | | Priorización | A x P | CI |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 0.038461 54 | 0.018867 92 | 0.087336 24 | 0.021052 63 | 0.021978 02 | 0.033707 87 | 0.046511 63 | 0.033898 31 | 0.022857 14 | 0.020725 39 | 0.034539 67 | 0.3756654 8 | 0.147545 23 |
| 0.076923 08 | 0.037735 85 | 0.087336 24 | 0.031578 95 | 0.021978 02 | 0.022471 91 | 0.046511 63 | 0.033898 31 | 0.017142 86 | 0.015544 04 | 0.039112 09 | 0.4119880 78 | RI |
| 0.115384 62 | 0.113207 55 | 0.262008 73 | 0.126315 79 | 0.197802 2 | 0.269662 92 | 0.418604 65 | 0.305084 75 | 0.342857 14 | 0.310880 83 | 0.246180 92 | 2.8953312 21 | 1.584 |
| 0.115384 62 | 0.075471 7 | 0.131004 37 | 0.063157 89 | 0.032967 03 | 0.033707 87 | 0.069767 44 | 0.050847 46 | 0.034285 71 | 0.031088 08 | 0.063768 22 | 0.6769014 13 | CR |
| 0.115384 62 | 0.113207 55 | 0.087336 24 | 0.126315 79 | 0.065934 07 | 0.033707 87 | 0.069767 44 | 0.050847 46 | 0.034285 71 | 0.031088 08 | 0.072787 48 | 0.7751453 07 | 0.093147 24 |
| 0.076923 08 | 0.113207 55 | 0.065502 18 | 0.126315 79 | 0.131868 13 | 0.067415 73 | 0.069767 44 | 0.050847 46 | 0.034285 71 | 0.031088 08 | 0.076722 12 | 0.8312391 02 | |
| 0.115384 62 | 0.113207 55 | 0.087336 24 | 0.126315 79 | 0.131868 13 | 0.134831 46 | 0.139534 88 | 0.305084 75 | 0.205714 29 | 0.186528 5 | 0.154580 62 | 1.8210784 98 | |
| 0.115384 62 | 0.113207 55 | 0.087336 24 | 0.126315 79 | 0.131868 13 | 0.134831 46 | 0.046511 63 | 0.101694 92 | 0.205714 29 | 0.186528 5 | 0.124939 31 | 1.4681461 28 | |
| 0.115384 62 | 0.150943 4 | 0.052401 75 | 0.126315 79 | 0.131868 13 | 0.134831 46 | 0.046511 63 | 0.033898 31 | 0.068571 43 | 0.124352 33 | 0.098507 88 | 1.1052637 58 | |

| | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|-----------------|
| 0.115384 62 | 0.150943 4 | 0.052401 75 | 0.126315 79 | 0.131868 13 | 0.134831 46 | 0.046511 63 | 0.033898 31 | 0.034285 71 | 0.062176 17 | 0.088861 7 | 0.9671481 21 |
| | | | | | | | | | | λ_{\max} | 11.327907 11 |

Clasificación de las aguas a tratar

| Clasificación de aguas residuales | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|---|-----------|--|---|--------------------------------------|----------------|-------------|---------------------------|-------------------------------|
| Alternativa | Sistema de lodos activados | Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | Humedales | Lagunas de estabilización facultativas | Lagunas de estabilización de maduración | Lagunas de estabilización anaerobias | Fosas sépticas | Filtro FAFA | Biorreactores de membrana | Reactores de biopelícula MBBR |
| Sistema de lodos activados | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 2 | 1 | 1/3 | 1/2 | 1/3 | 1/3 | 1/4 | 1/4 | 1/2 | 1/2 |
| Humedales | 2 | 3 | 1 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 |
| Lagunas de estabilización facultativas | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 2 | 3 | 3 | 1/2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Lagunas de estabilización anaerobias | 2 | 3 | 3 | 1/2 | 1/2 | 1 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| Fosas sépticas | 2 | 4 | 3 | 1/2 | 1/2 | 1/4 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Filtro FAFA | 2 | 4 | 3 | 1/2 | 1/2 | 1/4 | 1/2 | 1 | 2 | 2 |
| Biorreactores de membrana | 2 | 2 | 3 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 | 3 |
| Reactores de biopelícula MBBR | 2 | 2 | 3 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/3 | 1 |

| | | | | | | | | | | |
|-------|----|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Total | 19 | 24.5 | 22.83333333 | 5.333333333 | 6.666666667 | 7.666666667 | 11.58333333 | 13.08333333 | 12.66666667 | 15.33333333 |
|-------|----|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|

| Normalización | | | | | | | | | | Priorización | A x P | CI |
|---------------|------------|------------|----------|-------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------------|------------|------------|
| 0.05263158 | 0.02040816 | 0.02189781 | 0.093755 | 0.075 | 0.06521739 | 0.04316547 | 0.03821656 | 0.03947368 | 0.0326087 | 0.049973406 | 0.5249867 | 0.13996844 |
| 0.10526316 | 0.04081633 | 0.01459854 | 0.093755 | 0.05 | 0.04347826 | 0.02158273 | 0.01910828 | 0.03947368 | 0.0326087 | 0.047563443 | 0.48507271 | RI |
| 0.10526316 | 0.12244898 | 0.04379562 | 0.0625 | 0.05 | 0.04347826 | 0.02877698 | 0.02547771 | 0.02631579 | 0.02173913 | 0.056450722 | 0.58109201 | 1.584 |
| 0.10526316 | 0.08163265 | 0.13138686 | 0.1875 | 0.3 | 0.26086957 | 0.17266187 | 0.15286624 | 0.15789474 | 0.13043478 | 0.172230565 | 1.88422016 | CR |
| 0.10526316 | 0.12244898 | 0.13138686 | 0.093755 | 0.15 | 0.26086957 | 0.17266187 | 0.15286624 | 0.15789474 | 0.13043478 | 0.149682379 | 1.69598594 | 0.08836391 |
| 0.10526316 | 0.12244898 | 0.13138686 | 0.093755 | 0.075 | 0.13043478 | 0.34532374 | 0.30573248 | 0.15789474 | 0.13043478 | 0.163026083 | 1.87525939 | |
| 0.10526316 | 0.16326531 | 0.13138686 | 0.093755 | 0.075 | 0.0326087 | 0.08633094 | 0.15286624 | 0.15789474 | 0.13043478 | 0.110929548 | 1.272483 | |
| 0.10526316 | 0.16326531 | 0.13138686 | 0.093755 | 0.075 | 0.0326087 | 0.04316547 | 0.07643312 | 0.15789474 | 0.13043478 | 0.097640816 | 1.11937741 | |
| 0.10526316 | 0.08163265 | 0.13138686 | 0.093755 | 0.075 | 0.06521739 | 0.04316547 | 0.03821656 | 0.07894737 | 0.19565217 | 0.079175496 | 1.01033868 | |
| 0.10526316 | 0.08163265 | 0.13138686 | 0.093755 | 0.075 | 0.06521739 | 0.04316547 | 0.03821656 | 0.02631579 | 0.06521739 | 0.073327542 | 0.81089993 | |
| | | | | | | | | | | λ_{max} | 11.2597159 | |

Dimensiones de los sistemas de tratamiento

| Espacio para instalación | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|---|-----------|--|---|--------------------------------------|----------------|-------------|---------------------------|-------------------------------|
| Alternativa | Sistema de lodos activados | Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | Humedales | Lagunas de estabilización facultativas | Lagunas de estabilización de maduración | Lagunas de estabilización anaerobias | Fosas sépticas | Filtro FAFA | Biorreactores de membrana | Reactores de biopelícula MBBR |
| Sistema de lodos activados | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 1/2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Humedales | 1/2 | 1/2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| Lagunas de estabilización facultativas | 1 | 1/2 | ½ | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 1 | 1/2 | ½ | ½ | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Lagunas de estabilización anaerobias | 1 | 1/2 | ½ | ½ | 1/2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Fosas sépticas (pretratamiento)* | 1/2 | 1/2 | 1/3 | ½ | 1/2 | 1/3 | 1 | 5 | 2 | 3 |
| Filtro FAFA | 1/2 | 1/2 | 1/3 | ½ | 1/2 | 1/3 | 1/5 | 1 | 1/3 | 1/4 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----|-----|------------|---|------|-------------|-------------|----|-------------|-------|
| Biorreactores de membrana | 1/2 | 1/2 | ¼ | ½ | 1/2 | 1/3 | 1/2 | 3 | 1 | 5 |
| Reactores de biopelícula MBBR | 1/2 | 1/2 | ¼ | ½ | 1/2 | 1/3 | 1/3 | 4 | 1/5 | 1 |
| Total | 7 | 7 | 7.66666667 | 9 | 10.5 | 11.33333333 | 16.03333333 | 27 | 18.53333333 | 24.25 |

| Normalización | | | | | | | | | | Priorización | A x P | CI |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 0.142857 14 | 0.285714 29 | 0.260869 57 | 0.111111 11 | 0.095238 1 | 0.088235 29 | 0.124740 12 | 0.074074 07 | 0.107913 67 | 0.082474 23 | 0.1373227 59 | 1.5429323 74 | 0.153794 14 |
| 0.071428 57 | 0.142857 14 | 0.260869 57 | 0.222222 22 | 0.190476 19 | 0.176470 59 | 0.124740 12 | 0.074074 07 | 0.107913 67 | 0.082474 23 | 0.1453526 38 | 1.6486632 24 | RI |
| 0.071428 57 | 0.071428 57 | 0.130434 78 | 0.222222 22 | 0.190476 19 | 0.176470 59 | 0.187110 19 | 0.111111 11 | 0.215827 34 | 0.164948 45 | 0.1541458 02 | 1.7892259 99 | 1.584 |
| 0.142857 14 | 0.071428 57 | 0.065217 39 | 0.111111 11 | 0.190476 19 | 0.176470 59 | 0.124740 12 | 0.074074 07 | 0.107913 67 | 0.082474 23 | 0.1146763 09 | 1.2987532 73 | CR |
| 0.142857 14 | 0.071428 57 | 0.065217 39 | 0.055555 56 | 0.095238 1 | 0.176470 59 | 0.124740 12 | 0.074074 07 | 0.107913 67 | 0.082474 23 | 0.0995969 44 | 1.1418181 75 | 0.097092 26 |
| 0.142857 14 | 0.071428 57 | 0.065217 39 | 0.055555 56 | 0.047619 05 | 0.088235 29 | 0.187110 19 | 0.111111 11 | 0.161870 5 | 0.123711 34 | 0.1054716 14 | 1.2299820 23 | |
| 0.071428 57 | 0.071428 57 | 0.043478 26 | 0.055555 56 | 0.047619 05 | 0.029411 76 | 0.062370 06 | 0.185185 19 | 0.107913 67 | 0.123711 34 | 0.0798102 03 | 0.9139913 28 | |
| 0.071428 57 | 0.071428 57 | 0.043478 26 | 0.055555 56 | 0.047619 05 | 0.029411 76 | 0.012474 01 | 0.037037 04 | 0.017985 61 | 0.010309 28 | 0.0396727 71 | 0.4275567 71 | |
| 0.071428 57 | 0.071428 57 | 0.032608 7 | 0.055555 56 | 0.047619 05 | 0.029411 76 | 0.031185 03 | 0.111111 11 | 0.053956 83 | 0.206185 57 | 0.0710490 75 | 0.8166498 97 | |

| | | | | | | | | | | | |
|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|-----------------|
| 0.071428 57 | 0.071428 57 | 0.032608 7 | 0.055555 56 | 0.047619 05 | 0.029411 76 | 0.020790 02 | 0.148148 15 | 0.010791 37 | 0.041237 11 | 0.0529018 86 | 0.5745741 66 |
| | | | | | | | | | | λ_{\max} | 11.384147 23 |

Consumo energético

| Consumo energético | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|---|-----------|--|---|--------------------------------------|----------------|-------------|---------------------------|-------------------------------|
| Alternativas | Sistema de lodos activados | Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | Humedales | Lagunas de estabilización facultativas | Lagunas de estabilización de maduración | Lagunas de estabilización anaerobias | Fosas sépticas | Filtro FAFA | Biorreactores de membrana | Reactores de biopelícula MBBR |
| Sistema de lodos activados | 1 | 1/5 | 1/5 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 5 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| Humedales | 5 | 1/3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| Lagunas de estabilización facultativas | 2 | 1/3 | 1/3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 2 | 1/3 | 1/3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Lagunas de estabilización anaerobias | 2 | 1/3 | 1/3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| Fosas sépticas | 2 | 1/2 | 1/3 | 1 | 1 | 1/3 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| Filtro FAFA | 2 | 1/2 | 1/3 | 1 | 1 | 1/3 | 1/3 | 1 | 4 | 4 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|----|-------------|-------------|------|------|--------------|------|-----|------|-------|
| Biorreactores de membrana | 2 | 1/2 | ¼ | 1 | 1 | 1/4 | 1/3 | 1/4 | 1 | 1/4 |
| Reactores de biopelícula MBBR | 2 | 1/2 | ¼ | 1 | 1 | 1/4 | 1/3 | 1/4 | 4 | 1 |
| Total | 25 | 4.533333333 | 6.366666667 | 13.5 | 13.5 | 10.666666667 | 12.5 | 15 | 24.5 | 21.75 |

| Normalización | | | | | | | | | | Priorización | A x P | CI |
|---------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|--------------|-------------|------------|
| 0.04 | 0.04411765 | 0.03141361 | 0.03703704 | 0.03703704 | 0.046875 | 0.04 | 0.03333333 | 0.02040816 | 0.02298851 | 0.03532103 | 0.395445042 | 0.15318176 |
| 0.2 | 0.22058824 | 0.47120419 | 0.22222222 | 0.22222222 | 0.28125 | 0.16 | 0.13333333 | 0.08163265 | 0.13793103 | 0.21303839 | 2.412387893 | RI |
| 0.2 | 0.07352941 | 0.15706806 | 0.22222222 | 0.22222222 | 0.28125 | 0.24 | 0.2 | 0.16326531 | 0.18390805 | 0.19434653 | 2.228897955 | 1.584 |
| 0.08 | 0.07352941 | 0.05235602 | 0.07407407 | 0.07407407 | 0.09375 | 0.08 | 0.06666667 | 0.04081633 | 0.04597701 | 0.06812436 | 0.76373109 | CR |
| 0.08 | 0.07352941 | 0.05235602 | 0.07407407 | 0.07407407 | 0.09375 | 0.08 | 0.06666667 | 0.04081633 | 0.04597701 | 0.06812436 | 0.76373109 | 0.09670566 |
| 0.08 | 0.07352941 | 0.05235602 | 0.07407407 | 0.07407407 | 0.09375 | 0.24 | 0.2 | 0.16326531 | 0.18390805 | 0.12349569 | 1.473881682 | |
| 0.08 | 0.11029412 | 0.05235602 | 0.07407407 | 0.07407407 | 0.03125 | 0.08 | 0.2 | 0.12244898 | 0.13793103 | 0.09624283 | 1.119520645 | |
| 0.08 | 0.11029412 | 0.05235602 | 0.07407407 | 0.07407407 | 0.03125 | 0.02666667 | 0.06666667 | 0.16326531 | 0.18390805 | 0.0862555 | 0.997899077 | |
| 0.08 | 0.11029412 | 0.03926702 | 0.07407407 | 0.07407407 | 0.0234375 | 0.02666667 | 0.01666667 | 0.04081633 | 0.01149425 | 0.04967907 | 0.512537482 | |

| | | | | | | | | | | | |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|-----------------|
| 0.0 8 | 0.110294 12 | 0.039267 02 | 0.074074 07 | 0.074074 07 | 0.02343 75 | 0.026666 67 | 0.016666 67 | 0.163265 31 | 0.045977 01 | 0.0653722 4 | 0.7106038 72 |
| | | | | | | | | | | λ_{\max} | 11.378635 83 |

Calidad de los efluentes vertidos

| Calidad de los efluentes | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|---|-----------|--|---|--------------------------------------|----------------|-------------|---------------------------|-------------------------------|
| Alternativas | Sistema de lodos activados | Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | Humedales | Lagunas de estabilización facultativas | Lagunas de estabilización de maduración | Lagunas de estabilización anaerobias | Fosas sépticas | Filtro FAFA | Biorreactores de membrana | Reactores de biopelícula MBBR |
| Sistema de lodos activados | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 1/2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Humedales | 1/2 | 1/2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Lagunas de estabilización facultativas | 1/2 | 1/2 | 1/3 | 1 | 5 | 5 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 1/2 | 1/2 | 1/3 | 1/5 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Lagunas de estabilización anaerobias | 1/2 | 1/2 | 1/3 | 1/5 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Fosas sépticas | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Filtro FAFA | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1/2 | 1/2 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------|----|----|------|----|----|----|-----|---|-----|
| Biorreactores de membrana | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1/2 |
| Reactores de biopelícula MBBR | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| Total | 10.5 | 12 | 13 | 15.4 | 21 | 21 | 13 | 8.5 | 7 | 5.5 |

| Normalización | | | | | | | | | | Priorización | P x A | CI |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 0.095238 1 | 0.166666 67 | 0.153846 15 | 0.129870 13 | 0.095238 1 | 0.095238 1 | 0.076923 08 | 0.058823 53 | 0.071428 57 | 0.090909 09 | 0.103418 15 | 1.164094 24 | 0.111802 92 |
| 0.047619 05 | 0.083333 33 | 0.153846 15 | 0.129870 13 | 0.095238 1 | 0.095238 1 | 0.076923 08 | 0.058823 53 | 0.071428 57 | 0.090909 09 | 0.090322 91 | 1.022062 25 | RI |
| 0.047619 05 | 0.041666 67 | 0.076923 08 | 0.194805 19 | 0.142857 14 | 0.142857 14 | 0.076923 08 | 0.058823 53 | 0.071428 57 | 0.090909 09 | 0.094481 25 | 1.082080 42 | 1.584 |
| 0.047619 05 | 0.041666 67 | 0.025641 03 | 0.064935 06 | 0.238095 24 | 0.238095 24 | 0.076923 08 | 0.058823 53 | 0.071428 57 | 0.090909 09 | 0.095413 65 | 1.036760 05 | CR |
| 0.047619 05 | 0.041666 67 | 0.025641 03 | 0.012987 01 | 0.047619 05 | 0.047619 05 | 0.076923 08 | 0.058823 53 | 0.071428 57 | 0.090909 09 | 0.052123 61 | 0.543440 24 | 0.071 |
| 0.047619 05 | 0.041666 67 | 0.025641 03 | 0.012987 01 | 0.047619 05 | 0.047619 05 | 0.076923 08 | 0.058823 53 | 0.071428 57 | 0.090909 09 | 0.052123 61 | 0.543440 24 | |
| 0.095238 1 | 0.083333 33 | 0.076923 08 | 0.064935 06 | 0.047619 05 | 0.047619 05 | 0.076923 08 | 0.058823 53 | 0.071428 57 | 0.090909 09 | 0.071375 19 | 0.779629 19 | |
| 0.190476 19 | 0.166666 67 | 0.153846 15 | 0.129870 13 | 0.095238 1 | 0.095238 1 | 0.153846 15 | 0.117647 06 | 0.071428 57 | 0.090909 09 | 0.126516 62 | 1.402145 89 | |
| 0.190476 19 | 0.166666 67 | 0.153846 15 | 0.129870 13 | 0.095238 1 | 0.095238 1 | 0.153846 15 | 0.235294 12 | 0.142857 14 | 0.090909 09 | 0.145424 18 | 1.601374 61 | |

| | | | | | | | | | | | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| 0.190476 19 | 0.166666 67 | 0.153846 15 | 0.129870 13 | 0.095238 1 | 0.095238 1 | 0.153846 15 | 0.235294 12 | 0.285714 29 | 0.181818 18 | 0.168800 81 | 1.831199 19 |
| | | | | | | | | | | λ_{\max} | 11.00622 63 |

Criterio de eficiencia

| Criterio de eficiencia | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|---|-----------|--|---|--------------------------------------|----------------|-------------|---------------------------|-------------------------------|
| Alternativas | Sistema de lodos activados | Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | Humedales | Lagunas de estabilización facultativas | Lagunas de estabilización de maduración | Lagunas de estabilización anaerobias | Fosas sépticas | Filtro FAFA | Biorreactores de membrana | Reactores de biopelícula MBBR |
| Sistema de lodos activados | 1 | 1/5 | ½ | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/4 | 1/5 | 1/3 | 1/4 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 5 | 1 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1/2 | 1/3 | 1/4 |
| Humedales | 2 | 1/3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 1/2 | 1/3 | 1/4 |
| Lagunas de estabilización facultativas | 2 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/2 | 1/3 | 1/4 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 2 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/2 | 1/3 | 1/4 |
| Lagunas de estabilización anaerobias | 2 | 1/2 | 1/3 | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/2 | 1/3 | 1/4 |
| Fosas sépticas | 4 | 1/3 | ½ | 3 | 3 | 4 | 1 | 1/5 | 1/3 | 1/4 |
| Filtro FAFA | 5 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 | 1 | 1/3 | 1/4 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| Biorreactores de membrana | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1/4 |
| Reactores de biopelícula MBBR | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 |
| Total | 30.00 | 12.37 | 16.33 | 18.50 | 18.50 | 21.50 | 19.25 | 10.90 | 7.67 | 3.25 |

| Normalización | | | | | | | | | | Priorización | A x P | CI |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|------------|------------|
| 0.0333 | 0.0162 | 0.0306 | 0.0270 | 0.0270 | 0.0233 | 0.0130 | 0.0183 | 0.0435 | 0.0769 | 0.0309 | 0.3291 | 0.15661167 |
| 0.1667 | 0.0809 | 0.1837 | 0.1081 | 0.1081 | 0.0930 | 0.1558 | 0.0459 | 0.0435 | 0.0769 | 0.1063 | 1.20997375 | RI |
| 0.0667 | 0.0270 | 0.0612 | 0.0541 | 0.0541 | 0.1395 | 0.1039 | 0.0459 | 0.0435 | 0.0769 | 0.0673 | 0.76792393 | 1.584 |
| 0.0667 | 0.0404 | 0.0612 | 0.0541 | 0.0541 | 0.0465 | 0.0173 | 0.0459 | 0.0435 | 0.0769 | 0.0507 | 0.54382887 | CR |
| 0.0667 | 0.0404 | 0.0612 | 0.0541 | 0.0541 | 0.0465 | 0.0173 | 0.0459 | 0.0435 | 0.0769 | 0.0507 | 0.54382887 | 0.09887101 |
| 0.0667 | 0.0404 | 0.0204 | 0.0541 | 0.0541 | 0.0465 | 0.0173 | 0.0459 | 0.0435 | 0.0769 | 0.0466 | 0.49898505 | |
| 0.1333 | 0.0270 | 0.0306 | 0.1622 | 0.1622 | 0.1860 | 0.0519 | 0.0183 | 0.0435 | 0.0769 | 0.0892 | 0.91915215 | |
| 0.1667 | 0.1617 | 0.1224 | 0.1081 | 0.1081 | 0.0930 | 0.2597 | 0.0917 | 0.0435 | 0.0769 | 0.1232 | 1.48895591 | |
| 0.1000 | 0.2426 | 0.1837 | 0.1622 | 0.1622 | 0.1395 | 0.1558 | 0.2752 | 0.1304 | 0.0769 | 0.1629 | 1.92509163 | |

| | | | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|------------|
| 0.1333 | 0.3235 | 0.2449 | 0.2162 | 0.2162 | 0.1860 | 0.2078 | 0.3670 | 0.5217 | 0.3077 | 0.2724 | 3.18269305 |
| | | | | | | | | | | λ_{\max} | 11.4095 |



**Anexo II B: AHP; Alternativas vs alternativas para cada criterio caso
Iztacalco**

Diseño

| Criterio de diseño | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|---|-----------|--|---|--------------------------------------|----------------|-------------|---------------------------|-------------------------------|
| Alternativa | Sistema de lodos activados | Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | Humedales | Lagunas de estabilización facultativas | Lagunas de estabilización de maduración | Lagunas de estabilización anaerobias | Fosas sépticas | Filtro FAFA | Biorreactores de membrana | Reactores de biopelícula MBBR |
| Sistema de lodos activados | 1 | 1/3 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/3 | 1/3 | 1/3 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 3 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/3 | 1/3 | 1/3 |
| Humedales | 2 | 2 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Lagunas de estabilización facultativas | 2 | 2 | 2 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| Lagunas de estabilización anaerobias | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Fosas sépticas | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Filtro FAFA | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1/2 | 1/2 |
| Biorreactores de membrana | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| Reactores de biopelícula MBBR | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1/2 | 1 |
| Total | 23.00 | 20.33 | 16.00 | 14.50 | 13.00 | 11.50 | 10.00 | 8.17 | 5.17 | 6.67 |

| Normalización | | | | | | | | | | Priorización | A x P | CI |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|-------------|------------|
| 0.0435 | 0.0164 | 0.0313 | 0.0345 | 0.0385 | 0.0435 | 0.0500 | 0.0408 | 0.0645 | 0.0500 | 0.0413 | 0.4329 | 0.1568245 |
| 0.1304 | 0.0492 | 0.0313 | 0.0345 | 0.0385 | 0.0435 | 0.0500 | 0.0408 | 0.0645 | 0.0500 | 0.0533 | 0.551011191 | RI |
| 0.0870 | 0.0984 | 0.0625 | 0.0345 | 0.0385 | 0.0435 | 0.0500 | 0.0612 | 0.0968 | 0.0750 | 0.0647 | 0.674186447 | 1.584 |
| 0.0870 | 0.0984 | 0.1250 | 0.0690 | 0.0385 | 0.0435 | 0.0500 | 0.0612 | 0.0968 | 0.0750 | 0.0744 | 0.776121348 | CR |
| 0.0870 | 0.0984 | 0.1250 | 0.1379 | 0.0769 | 0.0435 | 0.0500 | 0.0612 | 0.0968 | 0.0750 | 0.0852 | 0.893125877 | 0.09900537 |
| 0.0870 | 0.0984 | 0.1250 | 0.1379 | 0.1538 | 0.0870 | 0.0500 | 0.0612 | 0.0968 | 0.0750 | 0.0972 | 1.026893179 | |
| 0.0870 | 0.0984 | 0.1250 | 0.1379 | 0.1538 | 0.1739 | 0.1000 | 0.0612 | 0.0968 | 0.0750 | 0.1109 | 1.179548441 | |
| 0.1304 | 0.1475 | 0.1250 | 0.1379 | 0.1538 | 0.1739 | 0.2000 | 0.1224 | 0.0968 | 0.0750 | 0.1363 | 1.453143193 | |
| 0.1304 | 0.1475 | 0.1250 | 0.1379 | 0.1538 | 0.1739 | 0.2000 | 0.2449 | 0.1935 | 0.3000 | 0.1807 | 1.91383845 | |

| | | | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|-------------|
| 0.1304 | 0.1475 | 0.1250 | 0.1379 | 0.1538 | 0.1739 | 0.2000 | 0.2449 | 0.0968 | 0.1500 | 0.1560 | 1.667449017 |
| | | | | | | | | | | λ_{\max} | 10.5682 |

Clasificación de las aguas residuales a tratar

| Clasificación de aguas residuales | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|---|-----------|--|---|--------------------------------------|----------------|-------------|---------------------------|-------------------------------|
| Alternativa | Sistema de lodos activados | Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | Humedales | Lagunas de estabilización facultativas | Lagunas de estabilización de maduración | Lagunas de estabilización anaerobias | Fosas sépticas | Filtro FAFA | Biorreactores de membrana | Reactores de biopelícula MBBR |
| Sistema de lodos activados | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Humedales | 1 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1/4 | 1/2 | 1 | 1 |
| Lagunas de estabilización facultativas | 1 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 1 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Lagunas de estabilización anaerobias | 1 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Fosas sépticas | 2 | 1/2 | 4 | 2 | 2 | 1/2 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| Filtro FAFA | 2 | 1/2 | 2 | 2 | 2 | 1/2 | 1 | 1 | 5 | 5 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|----|-----|----|----|----|-----|-------------|-----|------|------|
| Biorreactores de membrana | 2 | 1/2 | 1 | 2 | 2 | 1/2 | 1/3 | 1/5 | 1 | 1 |
| Reactores de biopelícula MBBR | 2 | 1/2 | 1 | 2 | 2 | 1/2 | 1/3 | 1/5 | 1 | 1 |
| Total | 14 | 6 | 15 | 15 | 15 | 9 | 8.416666667 | 8.4 | 16.5 | 16.5 |

| Normalización | | | | | | | | | | Priorización | A x P | CI |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 0.071428 57 | 0.166666 67 | 0.066666 67 | 0.066666 67 | 0.066666 67 | 0.111111 11 | 0.059405 94 | 0.059523 81 | 0.030303 03 | 0.030303 03 | 0.072874 22 | 0.772917 43 | 0.121832 73 |
| 0.071428 57 | 0.166666 67 | 0.133333 33 | 0.133333 33 | 0.133333 33 | 0.222222 22 | 0.237623 76 | 0.238095 24 | 0.121212 12 | 0.121212 12 | 0.157846 07 | 1.769279 71 | RI |
| 0.071428 57 | 0.083333 33 | 0.066666 67 | 0.066666 67 | 0.066666 67 | 0.111111 11 | 0.029702 97 | 0.059523 81 | 0.060606 06 | 0.060606 06 | 0.067631 19 | 0.738550 52 | 1.584 |
| 0.071428 57 | 0.083333 33 | 0.066666 67 | 0.066666 67 | 0.066666 67 | 0.111111 11 | 0.059405 94 | 0.059523 81 | 0.030303 03 | 0.030303 03 | 0.064540 88 | 0.693994 4 | CR |
| 0.071428 57 | 0.083333 33 | 0.066666 67 | 0.066666 67 | 0.066666 67 | 0.111111 11 | 0.059405 94 | 0.059523 81 | 0.030303 03 | 0.030303 03 | 0.064540 88 | 0.693994 4 | 0.076914 6 |
| 0.071428 57 | 0.083333 33 | 0.066666 67 | 0.066666 67 | 0.066666 67 | 0.111111 11 | 0.237623 76 | 0.238095 24 | 0.121212 12 | 0.121212 12 | 0.118401 63 | 1.375242 1 | |
| 0.142857 14 | 0.083333 33 | 0.266666 67 | 0.133333 33 | 0.133333 33 | 0.055555 56 | 0.118811 88 | 0.119047 62 | 0.181818 18 | 0.181818 18 | 0.141657 52 | 1.586607 7 | |
| 0.142857 14 | 0.083333 33 | 0.133333 33 | 0.133333 33 | 0.133333 33 | 0.055555 56 | 0.118811 88 | 0.119047 62 | 0.303030 3 | 0.303030 3 | 0.152566 61 | 1.771227 3 | |

| | | | | | | | | | | | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| 0.142857 14 | 0.083333 33 | 0.066666 67 | 0.133333 33 | 0.133333 33 | 0.055555 56 | 0.039603 96 | 0.023809 52 | 0.060606 06 | 0.060606 06 | 0.079970 5 | 0.847340 49 |
| 0.142857 14 | 0.083333 33 | 0.066666 67 | 0.133333 33 | 0.133333 33 | 0.055555 56 | 0.039603 96 | 0.023809 52 | 0.060606 06 | 0.060606 06 | 0.079970 5 | 0.847340 49 |
| | | | | | | | | | | λ_{\max} | 11.09649 45 |

Dimensiones de los sistemas de tratamiento

| Espacio para la instalación | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|---|-----------|--|---|--------------------------------------|----------------|-------------|---------------------------|-------------------------------|
| Alternativa | Sistema de lodos activados | Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | Humedales | Lagunas de estabilización facultativas | Lagunas de estabilización de maduración | Lagunas de estabilización anaerobias | Fosas sépticas | Filtro FAFA | Biorreactores de membrana | Reactores de biopelícula MBBR |
| Sistema de lodos activados | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 1/2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Humedales | 1/2 | 1/2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Lagunas de estabilización facultativas | 1 | 1/2 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 1 | 1/2 | 1/2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Lagunas de estabilización anaerobias | 1 | 1/2 | 1/2 | 1 | 1/2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Fosas sépticas | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Filtro FAFA | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 | 2 | 2 |
| Biorreactores de membrana | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 | 2 |
| Reactores de biopelícula MBBR | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 |
| Total | 7.00 | 7.00 | 8.50 | 10.00 | 9.50 | 11.00 | 14.50 | 16.00 | 17.50 | 19.00 |

| Normalización | | | | | | | | | | Priorización | A x P | CI |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------|-------------|------------|
| 0.1429 | 0.2857 | 0.2353 | 0.1000 | 0.1053 | 0.0909 | 0.1379 | 0.1250 | 0.1143 | 0.1053 | 0.1443 | 1.5364 | 0.15761207 |
| 0.0714 | 0.1429 | 0.2353 | 0.2000 | 0.2105 | 0.1818 | 0.1379 | 0.1250 | 0.1143 | 0.1053 | 0.1524 | 1.631181921 | RI |
| 0.0714 | 0.0714 | 0.1176 | 0.2000 | 0.2105 | 0.1818 | 0.1379 | 0.1250 | 0.1143 | 0.1053 | 0.1335 | 1.421428849 | 1.584 |
| 0.1429 | 0.0714 | 0.0588 | 0.1000 | 0.1053 | 0.0909 | 0.1379 | 0.1250 | 0.1143 | 0.1053 | 0.1052 | 1.107432133 | CR |
| 0.1429 | 0.0714 | 0.0588 | 0.1000 | 0.1053 | 0.1818 | 0.1379 | 0.1250 | 0.1143 | 0.1053 | 0.1143 | 1.207345115 | 0.09950257 |
| 0.1429 | 0.0714 | 0.0588 | 0.1000 | 0.0526 | 0.0909 | 0.1379 | 0.1250 | 0.1143 | 0.1053 | 0.0999 | 1.050298608 | |
| 0.0714 | 0.0714 | 0.0588 | 0.0500 | 0.0526 | 0.0455 | 0.0690 | 0.1250 | 0.1143 | 0.1053 | 0.0763 | 0.799300043 | |
| 0.0714 | 0.0714 | 0.0588 | 0.0500 | 0.0526 | 0.0455 | 0.0345 | 0.0625 | 0.1143 | 0.1053 | 0.0666 | 0.694506141 | |
| 0.0714 | 0.0714 | 0.0588 | 0.0500 | 0.0526 | 0.0455 | 0.0345 | 0.0313 | 0.0571 | 0.1053 | 0.0578 | 0.603400663 | |
| 0.0714 | 0.0714 | 0.0588 | 0.0500 | 0.0526 | 0.0455 | 0.0345 | 0.0313 | 0.0286 | 0.0526 | 0.0497 | 0.524835128 | |
| | | | | | | | | | | λ_{max} | 10.5761 | |

Consumo energético

| Consumo energético | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|---|-----------|--|---|--------------------------------------|----------------|-------------|---------------------------|-------------------------------|
| Alternativas | Sistema de lodos activados | Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | Humedales | Lagunas de estabilización facultativas | Lagunas de estabilización de maduración | Lagunas de estabilización anaerobias | Fosas sépticas | Filtro FAFA | Biorreactores de membrana | Reactores de biopelícula MBBR |
| Sistema de lodos activados | 1 | 1/2 | 1 | ½ | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Humedales | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Lagunas de estabilización facultativas | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Lagunas de estabilización anaerobias | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------|
| Fosas sépticas | 2 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| Filtro FAFA | 2 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/3 | 1 | 4 | 4 |
| Biorreactores de membrana | 2 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/3 | 1/4 | 1 | 1/4 |
| Reactores de biopelícula MBBR | 2 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/3 | 1/4 | 4 | 1 |
| Total | 18 | 7.5 | 10 | 9.5 | 9.5 | 7.5 | 9.5 | 12 | 19.5 | 15.75 |

| Normalización | | | | | | | | | | Priorización | P x A | CI |
|----------------|----------------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 0.055555 56 | 0.066666 67 | 0. 1 | 0.052631 58 | 0.052631 58 | 0.066666 67 | 0.052631 58 | 0.041666 67 | 0.025641 03 | 0.031746 03 | 0.0545837 35 | 0.5740978 25 | 0.111512 62 |
| 0.111111 11 | 0.133333 33 | 0. 1 | 0.105263 16 | 0.105263 16 | 0.133333 33 | 0.210526 32 | 0.166666 67 | 0.102564 1 | 0.126984 13 | 0.1295045 31 | 1.4490440 85 | RI |
| 0.055555 56 | 0.133333 33 | 0. 1 | 0.105263 16 | 0.105263 16 | 0.133333 33 | 0.105263 16 | 0.083333 33 | 0.051282 05 | 0.063492 06 | 0.0936119 14 | 1 | 1.584 |
| 0.111111 11 | 0.133333 33 | 0. 1 | 0.105263 16 | 0.105263 16 | 0.133333 33 | 0.105263 16 | 0.083333 33 | 0.051282 05 | 0.063492 06 | 0.0991674 7 | 1.0545837 35 | CR |
| 0.111111 11 | 0.133333 33 | 0. 1 | 0.105263 16 | 0.105263 16 | 0.133333 33 | 0.105263 16 | 0.083333 33 | 0.051282 05 | 0.063492 06 | 0.0991674 7 | 1.0545837 35 | 0.070399 38 |
| 0.111111 11 | 0.133333 33 | 0. 1 | 0.105263 16 | 0.105263 16 | 0.133333 33 | 0.210526 32 | 0.166666 67 | 0.102564 1 | 0.126984 13 | 0.1295045 31 | 1.4490440 85 | |
| 0.111111 11 | 0.066666 67 | 0. 1 | 0.105263 16 | 0.105263 16 | 0.066666 67 | 0.105263 16 | 0.25 | 0.153846 15 | 0.190476 19 | 0.1254556 26 | 1.4630886 51 | |
| 0.111111 11 | 0.066666 67 | 0. 1 | 0.105263 16 | 0.105263 16 | 0.066666 67 | 0.035087 72 | 0.083333 33 | 0.205128 21 | 0.253968 25 | 0.1132488 27 | 1.3087098 09 | |

| | | | | | | | | | | | |
|----------------|----------------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|-----------------|
| 0.111111 11 | 0.066666 67 | 0. 1 | 0.105263 16 | 0.105263 16 | 0.066666 67 | 0.035087 72 | 0.020833 33 | 0.051282 05 | 0.015873 02 | 0.0678046 88 | 0.6905420 94 |
| 0.111111 11 | 0.066666 67 | 0. 1 | 0.105263 16 | 0.105263 16 | 0.066666 67 | 0.035087 72 | 0.020833 33 | 0.205128 21 | 0.063492 06 | 0.0879512 08 | 0.9599195 64 |
| | | | | | | | | | | λ_{\max} | 11.003613 58 |

Calidad de los efluentes a tratar

| Calidad de los efluentes | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|---|-----------|--|---|--------------------------------------|----------------|--------------|---------------------------|-------------------------------|
| | Sistema de lodos activados | Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | Humedales | Lagunas de estabilización facultativas | Lagunas de estabilización de maduración | Lagunas de estabilización anaerobias | Fosas sépticas | Filtro FAF A | Biorreactores de membrana | Reactores de biopelícula MBBR |
| Sistema de lodos activados | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 1/2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 |
| Humedales | 1/2 | 1/2 | 1 | ½ | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Lagunas de estabilización facultativas | 1 | 1/3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | 1/5 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 1 | 1/3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Lagunas de estabilización anaerobias | 1 | 1/3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---|-----------------|----|------|------|------|-----------------|------|-------------|------|
| Fosas sépticas | 1 | 1/3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Filtro FAFA | 1 | 1/3 | 2 | 4 | 2 | 2 | 1/2 | 1 | 2 | 2 |
| Biorreactores de membrana | 1 | 1/5 | 2 | 5 | 2 | 2 | 1/2 | 1/2 | 1 | 3 |
| Reactores de biopelícula MBBR | 1 | 1/5 | 2 | 5 | 2 | 2 | 1/2 | 1/2 | 1/3 | 1 |
| Total | 9 | 5.56666666 7 | 19 | 24.5 | 15.5 | 15.5 | 8.33333333 3 | 9.75 | 13.03333333 | 15.7 |

| Normalización | | | | | | | | | | Priorización | A x P | CI |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 0.111111 11 | 0.359281 44 | 0.105263 16 | 0.040816 33 | 0.064516 13 | 0.064516 13 | 0.1 2 | 0.102564 1 | 0.076726 34 | 0.063694 27 | 0.1108489 | 1.268422 47 | 0.156711 5 |
| 0.055555 56 | 0.179640 72 | 0.105263 16 | 0.122448 98 | 0.193548 39 | 0.193548 39 | 0.3 6 | 0.307692 31 | 0.383631 71 | 0.318471 34 | 0.2219800 5 | 2.634183 24 | RI |
| 0.055555 56 | 0.089820 36 | 0.052631 58 | 0.020408 16 | 0.032258 06 | 0.032258 06 | 0.0 6 | 0.051282 05 | 0.038363 17 | 0.031847 13 | 0.0464424 1 | 0.523221 21 | 1.584 |
| 0.111111 11 | 0.059880 24 | 0.105263 16 | 0.040816 33 | 0.064516 13 | 0.064516 13 | 0.0 4 | 0.025641 03 | 0.015345 27 | 0.012738 85 | 0.0539828 2 | 0.568015 79 | CR |
| 0.111111 11 | 0.059880 24 | 0.105263 16 | 0.040816 33 | 0.064516 13 | 0.064516 13 | 0.0 6 | 0.051282 05 | 0.038363 17 | 0.031847 13 | 0.0627595 4 | 0.677842 35 | 0.098934 03 |
| 0.111111 11 | 0.059880 24 | 0.105263 16 | 0.040816 33 | 0.064516 13 | 0.064516 13 | 0.0 6 | 0.051282 05 | 0.038363 17 | 0.031847 13 | 0.0627595 4 | 0.677842 35 | |
| 0.111111 11 | 0.059880 24 | 0.105263 16 | 0.122448 98 | 0.129032 26 | 0.129032 26 | 0.1 2 | 0.205128 21 | 0.153452 69 | 0.127388 54 | 0.1262737 4 | 1.446893 42 | |
| 0.111111 11 | 0.059880 24 | 0.105263 16 | 0.163265 31 | 0.129032 26 | 0.129032 26 | 0.0 6 | 0.102564 1 | 0.153452 69 | 0.127388 54 | 0.1140989 7 | 1.323640 41 | |
| 0.111111 11 | 0.035928 14 | 0.105263 16 | 0.204081 63 | 0.129032 26 | 0.129032 26 | 0.0 6 | 0.051282 05 | 0.076726 34 | 0.191082 8 | 0.1093539 8 | 1.273122 47 | |

| | | | | | | | | | | | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| 0.111111 11 | 0.035928 14 | 0.105263 16 | 0.204081 63 | 0.129032 26 | 0.129032 26 | 0.0 6 | 0.051282 05 | 0.025575 45 | 0.063694 27 | 0.0915000 3 | 1.017219 75 |
| | | | | | | | | | | λ_{\max} | 11.41040 35 |

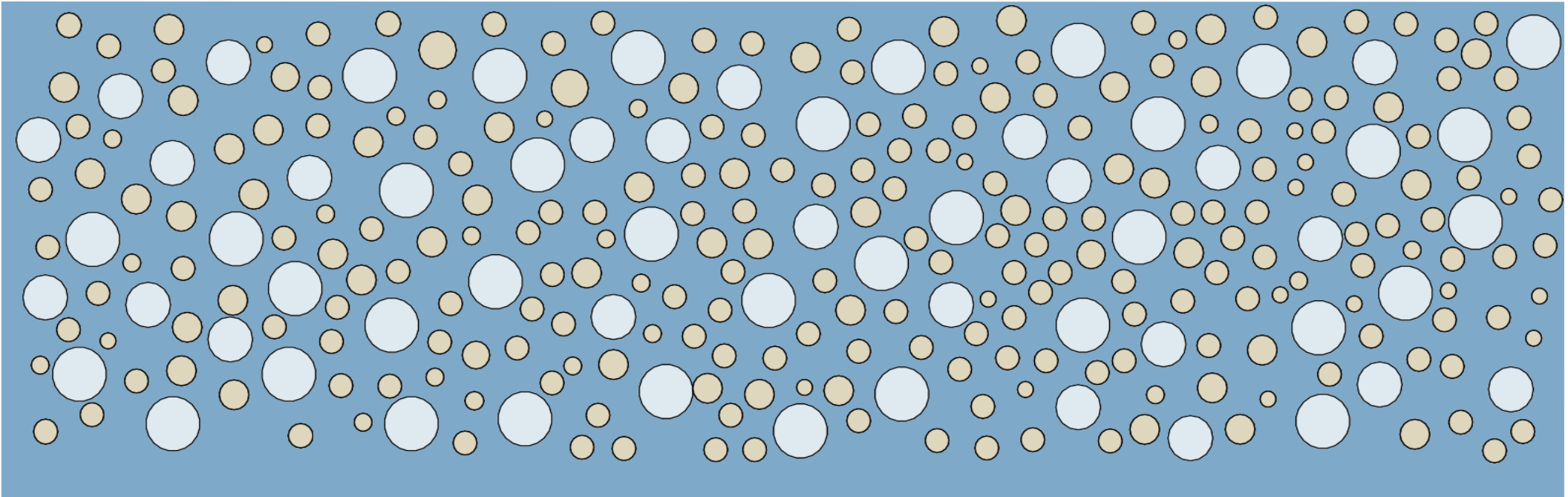
Contaminantes por tratar

| Criterio de eficiencia | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|---|-----------|--|---|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------|---------------------------|-------------------------------|
| Alternativas | Sistema de lodos activados | Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | Humedales | Lagunas de estabilización facultativas | Lagunas de estabilización de maduración | Lagunas de estabilización anaerobias | Fosas sépticas (pretratamiento) * | Filtro FAF A | Biorreactores de membrana | Reactores de biopelícula MBBR |
| Sistema de lodos activados | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 | 3 | 3 |
| Humedales | 2 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1/4 | 1/5 | 1/2 | 1/2 |
| Lagunas de estabilización facultativas | 2 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/4 | 1/2 | 1/2 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 2 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/4 | 1/2 | 1/2 |
| Lagunas de estabilización anaerobias | 2 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/4 | 1/2 | 1/2 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| Fosas sépticas | 2 | 1/2 | 4 | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 |
| Filtro FAFA | 2 | 1/5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 1/3 | 1 | 3 | 3 |
| Biorreactores de membrana | 2 | 1/3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1/2 | 1/3 | 1 | 3 |
| Reactores de biopelícula MBBR | 2 | 1/3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1/2 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| Total | 19.00 | 4.87 | 19.50 | 16.50 | 16.50 | 16.50 | 6.58 | 11.12 | 11.83 | 14.50 |

| Normalización | | | | | | | | | | Priorización | A x P | CI |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|-------------|------------|
| 0.0526 | 0.1027 | 0.0256 | 0.0303 | 0.0303 | 0.0303 | 0.0759 | 0.0450 | 0.0423 | 0.0345 | 0.0470 | 0.5235 | 0.1551 |
| 0.1053 | 0.2055 | 0.1026 | 0.1212 | 0.1212 | 0.1212 | 0.3038 | 0.4498 | 0.2535 | 0.2069 | 0.1991 | 2.508253002 | RI |
| 0.1053 | 0.1027 | 0.0513 | 0.0606 | 0.0606 | 0.0606 | 0.0380 | 0.0180 | 0.0423 | 0.0345 | 0.0574 | 0.60200123 | 1.584 |
| 0.1053 | 0.1027 | 0.0513 | 0.0606 | 0.0606 | 0.0606 | 0.0759 | 0.0225 | 0.0423 | 0.0345 | 0.0616 | 0.648293378 | CR |
| 0.1053 | 0.1027 | 0.0513 | 0.0606 | 0.0606 | 0.0606 | 0.0759 | 0.0225 | 0.0423 | 0.0345 | 0.0616 | 0.648293378 | 0.09791885 |
| 0.1053 | 0.1027 | 0.0513 | 0.0606 | 0.0606 | 0.0606 | 0.0759 | 0.0225 | 0.0423 | 0.0345 | 0.0616 | 0.648293378 | |
| 0.1053 | 0.1027 | 0.2051 | 0.1212 | 0.1212 | 0.1212 | 0.1519 | 0.2699 | 0.1690 | 0.1379 | 0.1505 | 1.838678144 | |
| 0.1053 | 0.0411 | 0.2564 | 0.2424 | 0.2424 | 0.2424 | 0.0506 | 0.0900 | 0.2535 | 0.2069 | 0.1731 | 1.947554586 | |
| 0.1053 | 0.0685 | 0.1026 | 0.1212 | 0.1212 | 0.1212 | 0.0759 | 0.0300 | 0.0845 | 0.2069 | 0.1037 | 1.134421474 | |

| | | | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|-------------|
| 0.1053 | 0.0685 | 0.1026 | 0.1212 | 0.1212 | 0.1212 | 0.0759 | 0.0300 | 0.0282 | 0.0690 | 0.0843 | 0.896663355 |
| | | | | | | | | | | λ_{\max} | 11.3959 |



Anexo III: Sistema de tratamiento con la mayor prioridad en el análisis Criterios vs alternativas.

Caso Amecameca

| Alternativas vs criterios | | | | | | | |
|---|-------------|---------------------------------------|-------------|-------------|--------------------------|---------------|--------------|
| A x C | Diseño | Clasificación de las aguas residuales | Dimensiones | Consumo | Calidad de los efluentes | Contaminantes | Priorización |
| Sistema de lodos activados | 0.034539669 | 0.049973406 | 0.137322759 | 0.035321034 | 0.10341815 | 0.030916493 | 0.073180386 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 0.039112088 | 0.047563443 | 0.145352638 | 0.213038389 | 0.090322912 | 0.10625592 | 0.11702446 |
| Humedales | 0.246180917 | 0.056450722 | 0.154145802 | 0.194346527 | 0.094481254 | 0.067265733 | 0.118260124 |
| Lagunas de estabilización facultativas | 0.063768217 | 0.172230565 | 0.114676309 | 0.068124359 | 0.095413655 | 0.050653107 | 0.086143171 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 0.072787482 | 0.149682379 | 0.099596944 | 0.068124359 | 0.052123612 | 0.050653107 | 0.0677999 |
| Lagunas de estabilización anaerobias | 0.076722116 | 0.163026083 | 0.105471614 | 0.123495693 | 0.052123612 | 0.046571475 | 0.077965084 |
| Fosas sépticas (pretratamiento)* | 0.15458062 | 0.110929548 | 0.079810203 | 0.09624283 | 0.071375193 | 0.089196861 | 0.087301944 |
| Filtro FAFA | 0.124939312 | 0.097640816 | 0.039672771 | 0.086255497 | 0.126516621 | 0.12319649 | 0.105382889 |
| Biorreactores de membrana | 0.098507883 | 0.079175496 | 0.071049075 | 0.049679069 | 0.145424184 | 0.162855165 | 0.116965877 |
| Reactores de biopelícula MBBR (Materiales de soporte)** | 0.088861695 | 0.073327542 | 0.052901886 | 0.065372243 | 0.168800807 | 0.272435649 | 0.149976163 |
| Priorización de los criterios | 0.049235413 | 0.060159156 | 0.135610451 | 0.168250407 | 0.355415178 | 0.231329396 | |

| | | | | | | |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| λ_{\max} | 11.32790711 | 11.25971592 | 11.38414723 | 11.37863583 | 11.00622632 | 11.40950507 |
| CI | 0.147545234 | 0.139968436 | 0.153794137 | 0.153181759 | 0.111802925 | 0.156611675 |
| RI | 1.584 | 1.584 | 1.584 | 1.584 | 1.584 | 1.584 |
| CR | 0.093147244 | 0.088363911 | 0.097092258 | 0.096705656 | 0.070582655 | 0.098871007 |

Sistema de tratamiento con la mayor prioridad en el análisis Criterios vs alternativas.

Caso Iztacalco

| Alternativas vs criterios | | | | | | | |
|---|-------------|---------------------------------------|-------------|-------------|--------------------------|---------------|--------------|
| A x C | Diseño | Clasificación de las aguas residuales | Dimensiones | Consumo | Calidad de los efluentes | Contaminantes | Priorización |
| Sistema de lodos activados | 0.041287672 | 0.072874216 | 0.14425177 | 0.054583735 | 0.1108489 | 0.046958458 | 0.075747746 |
| Reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) | 0.053262012 | 0.15784607 | 0.152440424 | 0.129504531 | 0.221980054 | 0.199093334 | 0.12867719 |
| Humedales | 0.064723842 | 0.067631192 | 0.133532861 | 0.093611914 | 0.046442414 | 0.057380508 | 0.079160651 |
| Lagunas de estabilización facultativas | 0.074422118 | 0.064540883 | 0.10517614 | 0.09916747 | 0.053982824 | 0.061627752 | 0.078017966 |
| Lagunas de estabilización de maduración | 0.085164823 | 0.064540883 | 0.114267049 | 0.09916747 | 0.062759545 | 0.061627752 | 0.084061464 |
| Lagunas de estabilización anaerobias | 0.097204957 | 0.118401626 | 0.099912982 | 0.129504531 | 0.062759545 | 0.061627752 | 0.099971246 |
| Fosas sépticas (pretratamiento)* | 0.110900609 | 0.141657523 | 0.076328119 | 0.125455626 | 0.126273743 | 0.150547637 | 0.116748794 |
| Filtro FAFA | 0.136288917 | 0.152566614 | 0.066629843 | 0.113248827 | 0.114098965 | 0.173104764 | 0.124502989 |

| | | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Biorreactores de membrana | 0.180711234 | 0.079970497 | 0.057790557 | 0.067804688 | 0.109353976 | 0.103729474 | 0.111737372 |
| Reactores de biopelícula MBBR (Materiales de soporte)** | 0.156033815 | 0.079970497 | 0.049670256 | 0.087951208 | 0.091500033 | 0.084302568 | 0.101374582 |
| Priorización de los criterios} | 0.325472444 | 0.209196969 | 0.186913573 | 0.112288948 | 0.096599737 | 0.06952833 | |
| λ_{max} | 10.56824498 | 11.09649454 | 10.57612066 | 11.00361358 | 11.41040346 | 11.39593116 | |
| CI | 0.156824498 | 0.121832727 | 0.157612066 | 0.11151262 | 0.156711496 | 0.155103462 | |
| RI | 1.584 | 1.584 | 1.584 | 1.584 | 1.584 | 1.584 | |
| CR | 0.099005365 | 0.0769146 | 0.099502567 | 0.070399381 | 0.098934025 | 0.097918852 | |



Unidades

| Unidad | Abreviatura |
|--------------------|----------------|
| Miligramo | mg |
| Kilogramo | Kg |
| Litro | L |
| Horas | h |
| Días | d |
| Metro lineal | m |
| Metro cuadrado | m ² |
| Metro cubico | m ³ |
| Milímetro | mm |
| Micrómetro | μm |
| Kilovatios | Kwh |
| Vatios | wh |
| Grados centígrados | °C |