



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE
LA OPCIÓN DE ACOPLAR UN HUMEDAL ARTIFICIAL A
UNA PTAR DE LODOS ACTIVADOS PARA OBTENER
AGUA APTA PARA CUERPO RECEPTOR TIPO B**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

LUIS ARTURO MIRANDA ALCIBAR



CIUDAD DE MÉXICO

2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: JOSÉ ANTONIO ORTIZ RAMÍREZ

VOCAL: VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO

SECRETARIO: MARÍA RAFAELA GUTIÉRREZ LARA

1er.SUPLENTE: JOSÉ LUIS LÓPEZ CERVANTES

2° SUPLENTE: LUIS ÁNGEL MORENO AVEDAÑO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA EXPERIMENTAL

DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA

FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Víctor Manuel Luna Pabello

SUPERVISOR TÉCNICO (Si lo hay):

I.Q. Fernando Santiago Gómez Martínez

SUSTENTANTE (S):

Luis Arturo Miranda Alcibar

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por darme el privilegio de llenarme de sabiduría en esta etapa para mí, además de darme la oportunidad de ser parte de una gran casa de estudios como es la Universidad, con sus instalaciones maravillosas.

Agradezco a los miembros del jurado: M. en I. José Antonio Ortiz Ramírez, M. en I. María Rafaela Gutiérrez Lara y Dr. Víctor Manuel Luna Pabello asesor principal de esta tesis.

Se agradece el apoyo proporcionado por el Subprograma 127 “Formación Básica en Investigación” de la Facultad Química de la UNAM, durante el periodo de Agosto de 2017 a Julio de 2018.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Quiero agradecer a mis padres, Silvia y Arturo, por brindarme su cariño y amor incondicional a lo largo de este camino. Sin importar las dificultades por las que han pasado, buscando brindarme siempre lo mejor para mí y mi hermano.

A mi hermano José, quien siempre ha estado conmigo, enseñándome lo maravilloso que es la vida. Con momentos de diversión, pero también en los malos momentos, pero siempre con una sonrisa.

A mi abuela Beatriz por darme todo su cariño y cuidado a lo largo de mi vida. A mis tíos y primos con quien he compartido recuerdos inolvidables que me han hecho ser quien soy.

Al Dr. Víctor Manuel Luna Pabello, por brindarme todo su apoyo y asesoría para el desarrollo de este trabajo.

A la Dra. Martha Ledezma por su inmenso apoyo, sus valiosas consejos, asesorías y conocimientos en la realización de este trabajo.

Al profesor Luciano por estar siempre pendiente del laboratorio y mis compañeros que nos encontramos en el laboratorio.

Un profundo agradecimiento a Fernando Santiago, quién además de ser un gran amigo, ha sido mi maestro tanto académica y profesional.

Un agradecimiento a todos los compañeros del laboratorio de microbiología experimental de la Facultad de Química: Manu, Luis Antonio, Jorge, Ale, Pao, Cicerón, Erick, Charly, Anita, Carlos, Andrés, Luis Enrique, Laura, Lalo, Damián Inna. Gracias por sus conocimientos y apoyo para realizar este trabajo y por todos esos momentos de diversión y alegrías que pasamos juntos.

Gracias a Osvaldo, Juanita y Fer César, por brindarme su apoyo y su sabiduría tanto en la vida académica como en la vida profesional.

Gracias a Andy, Lili, Richard y Peter por sus sabios consejos y apoyo a lo largo de la carrera y la vida.

Finalmente, gracias a mis amigos y compañeros: Javi, Blanca, Emilio, Franco, Selene, Blanca, Juan, Ale, Quique, Sergio, Fernando. Compartiendo momentos de alegría y felicidad, pero también, momentos complicados y difíciles, que nos hicieron crecer y esforzarnos por nuestros sueños.

“Somos polvo de estrellas que piensa acerca de las estrellas. Somos el medio para que el Cosmos se conozca a sí mismo.”

Carl Sagan

ÍNDICE

1	<i>Introducción</i>	2
1.1	Objetivos	3
1.2	Estrategia de trabajo	4
2	<i>Marco teórico y antecedentes</i>	5
2.1	Composición y parámetros de la calidad de agua.....	5
2.1.1	Contaminación del agua	9
2.2	Marco legislativo	11
2.2.1	La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)	12
2.2.2	Ley General de Aguas Nacionales (LAN)	13
2.2.3	Normas Oficiales Mexicanas	14
2.3	Sistemas de tratamiento de agua residual	18
2.3.1	Etapas de los tratamientos de aguas residuales	19
2.4	Agua residual en México	22
2.5	Situación actual de agua residual en México	23
2.5.1	Sistemas de tratamiento de agua residual en México	26
2.6	Lodos activados	27
2.7	Humedales artificiales	28
2.7.1	Clasificación de los Humedales Artificiales.....	30
2.7.2	Vegetación.....	32
2.7.3	Microorganismos	34
2.8	Ejemplos de aplicaciones de HA.....	35
2.9	Ventajas y desventajas de HAFSS.....	38
2.9.1	Humedales artificiales en comparación con tratamiento de lodos activados.....	39
2.9.2	Costos de diferentes tratamientos de agua	39
2.10	Evaluación de un proyecto.....	41
2.11	Evaluación Económica de Proyectos.....	43
2.11.1	Economía Ambiental	43
2.11.2	Análisis Costo-Beneficio.....	44
2.11.3	El valor Presente Neto.....	45
2.11.4	La Tasa Interna de Rendimiento	47

2.11.5	Valoración económica de costos y beneficios	48
2.11.6	Tipos de valor de recursos ambientales	52
2.12	Descripción de la zona de estudio	54
2.13	Clima.....	54
2.14	Hidrografía	55
2.14.1	Precipitación.....	55
2.14.2	Ríos.....	55
2.14.3	Uso del suelo.....	58
2.15	Marco Socioeconómico.....	58
2.15.1	Actividades económicas	58
2.16	Situación Actual en la cuenca Valle de Bravo.....	60
2.17	Situación actual de la PTAR-LA.....	63
3	<i>Metodología</i>	66
3.1	Evaluación técnica de la PTAR-LA	66
3.2	Propuesta conceptual del acoplamiento PTAR-LA y HAFSS.....	71
3.3	Método de Evaluación económica	74
4	<i>Resultados</i>	76
4.1	Funcionamiento de PTAR-LA.....	76
4.2	Acoplamiento del HAFSS con la PTAR-LA	78
4.2.1	Funcionamiento del escenario 1 (S+HAFSS)	78
4.2.2	Funcionamiento del escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS)	79
4.3	Análisis Económico	85
4.3.1	Identificación, cuantificación y valoración de los costos actuales:.....	85
4.3.2	Identificación, cuantificación y valoración de los costos del proyecto escenario 1 (S+HAFSS):.....	87
4.3.3	Identificación, cuantificación y valoración de los costos del proyecto escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS):	88
4.4	Evaluación Económica.....	95
4.4.1	Indicadores	95
5	<i>Análisis y discusión de resultados</i>	97
5.1	Análisis de resultados técnicos	97
5.2	Análisis de resultados económicos	98
5.3	Análisis de resultados ambientales	99

6	Conclusiones y recomendaciones.....	101
6.1	Conclusiones.....	101
6.2	Recomendaciones.....	103
7	Bibliografía	104
8	Anexos	113
8.1	Funcionamiento de la PTAR-LA.....	113
8.2	Resultados de Evaluación costo-beneficio.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Estrategia de trabajo	4
Figura 2.	Marco legislativo de la Nación Mexicana.	12
Figura 3.	Normativa aplicada al control, protección, prevención y aprovechamiento del agua en México.	15
Figura 4.	Diagrama de flujo de un proceso de sistema de tratamiento de aguas residuales.....	20
Figura 5.	Uso del recurso hídrico en México.	22
Figura 6.	Grado de presión sobre el recurso hídrico por Región Hidrológica Administrativa (RHA).....	23
Figura 7.	Agua residual colectada en México.....	24
Figura 8.	Tipos de tratamiento de aguas residuales municipales.....	26
Figura 9.	Proceso convencional de tratamiento de lodos activados.....	28
Figura 10.	Componentes y procesos depuradores de un Humedal Artificial.	29
Figura 11.	Tratamiento con humedales artificiales.	30
Figura 12.	Esquema general de un HAFSS.	31
Figura 13.	Plantas acuáticas comunes utilizadas en humedales.	33
Figura 14.	Humedal artificial en Silkerode, Alemania.	36
Figura 15:	Humedal Artificial de Cucuchucho.....	37
Figura 16.	Composición del VET.....	53
Figura 17.	Área de estudio.	54
Figura 18.	Ríos de la cuenca de Valle de Bravo.	57

Figura 19. Esquema de sistema Cutzamala.....	62
Figura 20. Situación ambiental del sitio de estudio, río Amanalco.	63
Figura 21. Esquema de flujo de agua Río Amanalco-presa Valle de Bravo.....	64
Figura 22. Planta de tratamiento de aguas residuales de lodos activados ubicada en la cabecera municipal de Amanalco, Estado de México.	65
Figura 23. Diagrama de Flujo de Proceso de la PTAR-LA en Amanalco.	68
Figura 24. Diferentes etapas de la PTAR-LA en Amanalco.	69
Figura 25. Diseño y funcionamiento de un planta de lodos activados.....	69
Figura 26. Sitio de la colocación y posibles escenarios del tratamiento de HAFSS en acoplamiento con la PTAR-LA.	73
Figura 27. Diseño y funcionamiento ideal de la PTAR-LA del Municipio de Amanalco.	77
Figura 28. Comparativa de remoción de contaminantes en los diferentes escenarios.....	80
Figura 29. Escenario 1. Diagrama de Flujo de Proceso de la propuesta conceptual del S+HAFSS.	81
Figura 30. Diagrama conceptual de la propuesta del S+HAFSS.....	82
Figura 31. Escenario 2. Diagrama de Flujo de Proceso de la propuesta conceptual de la PTAR-LA+HAFSS.	83
Figura 32. Diagrama conceptual de la propuesta de la PTAR-LA+HAFSS.	84
Figura 33. Costo de tratamiento de agua residual de los diferentes escenarios. ...	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros físicos del agua residual.....	6
Tabla 2. Parámetros químicos orgánicos.	7
Tabla 3. Parámetros biológicos.	7
Tabla 4. Contaminantes presentes en el agua.	8
Tabla 5. Tipos de contaminantes en el agua.....	9
Tabla 6. Composición típica del agua residual doméstica (mg/L).	10
Tabla 7. Tabla de límites máximos permisibles para contaminantes.	16
Tabla 8. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos.	17
Tabla 9. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.	17

Tabla 10. Aprovechamiento de biosólidos.....	18
Tabla 11. Operaciones y procesos unitarios utilizados para eliminar.....	21
Tabla 12. Descarga de aguas residuales municipales.	24
Tabla 13. Carga de contaminantes de las agua residuales.....	24
Tabla 14. PTAR municipal en operación por RHA.	25
Tabla 15. Listado de especies que comprenden el componente vegetal.	34
Tabla 16. Rendimiento del HAFSS de Silkrode, Alemania.	36
Tabla 17. Rendimiento de los HA del lago de Pátzcuaro, Mich.....	37
Tabla 18. Ventajas y desventajas del tratamiento de agua residual de un HAFSS.	38
Tabla 19. Comparativa de funcionamiento de HA con LA.....	39
Tabla 20. Comparación de costos por m ³ de agua tratada por proceso de tratamiento.	40
Tabla 21. Clasificación de Costos y Beneficios.....	51
Tabla 22. Ríos y características que conforman la cuenca del Vale de Bravo- Amanalco.	56
Tabla 23. Ingresos en la población de Valle de Bravo-Amanalco.	59
Tabla 24. Datos de alimentación inicial.....	70
Tabla 25. Datos de calidad del efluente.	70
Tabla 26. Parámetros de diseño de un reactor de LA y salida del sedimentador..	71
Tabla 27. Parámetros biocinéticos de aguas residuales urbanas.	71
Tabla 28. Porcentaje de remoción de diversos parámetros en HAFSS	72
Tabla 29. Parámetros obtenidos del funcionamiento ideal de PTAR-LA.....	78
Tabla 30. Parámetros obtenidos del escenario 1 (S+HAFSS).	79
Tabla 31. Parámetros obtenidos del escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS).....	79
Tabla 32. INPP de diferentes años requeridos para la actualización de costos. ...	86
Tabla 33. Costo de Inversión de una PTAR-LA.....	86
Tabla 34. Costos de Operación mantenimiento de una PTAR-LA	87
Tabla 35. Costos de Inversión del escenario 1 (S+HAFSS).....	87
Tabla 36. Costo de operación y mantenimiento del escenario 1 (S+HAFSS).	88
Tabla 37. Costos de Inversión del escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS).	88
Tabla 38. Costo de operación y mantenimiento del escenario 2 (PTAR- LA+HAFSS).....	89
Tabla 39. Beneficios por tratar el agua residual de Amanalco	90

Tabla 40. Resultados de los Beneficios Intangibles para la alternativa del HAFSS.	92
Tabla 41. Resumen de resultados del Evaluación Económica.....	95
Tabla 42. Matriz de Evaluación comparativa de los diferentes escenarios	96
Tabla 43. Resultados del escenario 1 (HAFSS).....	116
Tabla 44. Resultados del escenario 2 (HAFSS en acoplamiento con PTAR-LA).117	
Tabla 45. Resultados de la PTAR-LA.....	118

Listado de abreviaturas y acrónimos

$\$/m^3$	Costo por metro cúbico
$^{\circ}C$	grados Celsius
CAEM	Comisión del Agua del Estado de México
CE	Conductividad
CONAGUA	Comisión Nacional de Agua
COT	Carbón orgánico total
DBO_5	Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días
DQO	Demanda química de oxígeno
DTP	Distribución de tamaño de partícula
HA	Humedal artificial
HAFS	Humedal artificial de flujo superficial
HAFSS	Humedal artificial de flujo subsuperficial
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
INPP	Índice Nacional de Precios al Productor
K	constante de velocidad de consumo
K_d	coeficiente de descomposición microbiana
Km	Kilómetro
Km^2	Kilómetro cuadrado
L/s	Litro por segundo
LA	Lodos activados
LAN	Ley General de Aguas Nacionales
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
LMP	Límites Máximos Permisibles
m^3/s	Metro cúbico por segundo
mg/Kg	miligramo por Kilogramo
mg/L	Miligramo por litro
msnm	metros sobre el nivel del mar
NMP	Número más probable de colonias
NMP/g	Número más probable de colonias por gramo
NOM	Norma Oficial Mexicana
NT	Nitrógeno Total
NTU	Turbidez
pH	Potencial de hidrógeno
PT	Fósforo Total
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
PTAR-LA	Planta de tratamiento de aguas residuales tipo lodos activados
SAIMEX	Sistema de Acceso a la Información Mexiquense
SDT	Sólidos disueltos totales
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales

SS	Sólidos sedimentables
SSNV	Sólidos suspendidos no volátiles
SST	Sólidos sedimentables totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
ST	Sólidos totales
SVT	Sólidos volátiles totales
T	Temperatura
TIR	Tasa interna de retorno
TP	Tamaño de partícula
UT	Unidades tóxicas
VAN	Valor Actual Neto
VET	Valor Económico Total
Y	Producción de lodo biológico por kilogramo de sustrato total consumido.

Resumen

El río Amanalco es uno de los ríos que alimenta la presa Valle de Bravo, siendo éste el principal aportador del sistema Cutzamala, el cual provee agua a la zona metropolitana de la Ciudad de México y Toluca.

Actualmente, el municipio de Amanalco cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales tipo Lodos Activados (PTAR-LA) la cual fue diseñada para una capacidad de tratamiento de 18 L/s. Sin embargo, el municipio de Amanalco se ha negado a operarla por los altos costos que esto representa y por los diversos problemas de funcionamiento que ha tenido. Provocando que no opere por largos tiempos y cuando se opera sólo trata una capacidad de 2 L/s. Por otro lado, la disponibilidad de agua está siendo afectada por el poco mantenimiento que tiene la infraestructura ocasionando problemas en la zona desde actividades cotidianas hasta la agricultura.

Para mitigar parte de los problemas que se tienen en la presa Valle de Bravo asociado a los contaminantes presentes en el agua (DBO_5 , sólidos suspendidos totales, nitrógeno y fósforo), se propone acoplar un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFSS), el cual es una tecnología que imita los procesos de depuración que efectúan los ecosistemas de humedales naturales, además, estudios demuestran su alta remoción de nitrógeno y fósforo del agua residual, además de tener un bajo costo de mantenimiento y operación en comparación con otras tecnologías.

Por ello, se proponen dos alternativas, a) Hacer uso sólo del sedimentador con el que cuenta la PTAR-LA y acoplarlo con el HAFSS (S+HAFSS); b) acoplar la PTAR-LA completa con el HAFSS (HAFSS+PTAR-LA) brindando la posibilidad de que el municipio de Amanalco mantenga en operación y cumpla con el marco legislativo, como lo marca el artículo 115° de la constitución y la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 para descarga a un cuerpo receptor tipo B. Asimismo el llevar a cabo la construcción del HAFSS puede generar beneficios tanto a la protección de la vida acuática, a la comunidad de Amanalco, poblaciones cercanas al río y a la

presa Valle de Bravo con el problema de la eutrofización que se tiene actualmente. Por ello se lleva a cabo una evaluación técnica, económica y ambiental.

Los resultados obtenidos en la modelación de la PTAR-LA de forma ideal cuenta con una remoción de contaminantes cumpliendo con la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 para descarga de cuerpo receptor tipo B. En contraste, la propuesta conceptual del HAFSS acoplado a la PTAR-LA tiene una capacidad de tratamiento de 5.5 L/s.

El análisis de los resultados técnicos, económicos y ambientales revelan que el escenario 1 (S+HAFSS) cuenta con un bajo costo de operación y mantenimiento además de brindar una tasa de rendimiento de 25%, 1% más que el escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS) y ofrece \$1.17 por cada peso invertido en el proyecto. Por otra parte, el escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS) tiene una alta remoción de contaminantes en comparación con el escenario 1 (S+HAFSS). Ambas alternativas brindan una alta remoción de nitrógeno y fósforo, disminuyendo la eutrofización que descarga en la presa Valle de Bravo.

Se concluye que es viable llevar a cabo la construcción del HAFSS y acoplarlo a la PTAR-LA en cualquiera de las dos alternativas presentadas (escenario 1 o escenario 2). Lo que implicaría beneficios al municipio de Amanalco y sus alrededores, además de disminuir el proceso de la eutrofización que pueda dañar al ecosistema de la zona.

1 Introducción

El agua es uno de los recursos naturales que forma parte del desarrollo de cualquier país, resulta indispensable para el desarrollo de la vida. Su disponibilidad es paulatinamente menor debido a su contaminación por diversos medios, incluyendo a los mantos acuíferos, lo cual representa un desequilibrio ambiental, económico y social (Esponda, 2001).

Ante esta problemática, el saneamiento de las aguas residuales adquiere más importancia para asegurar su recolección, conducción, tratamiento y adecuada disposición en los cuerpos receptores, en condiciones que no perjudiquen al medio ambiente y la salud de la población (BID, 2013).

Por diversas razones, el tratamiento de aguas en México no se encuentra al nivel que exige la protección ambiental y la normatividad, y en general se ha avanzado poco en la construcción y operación de la infraestructura que realmente se necesita para alcanzar niveles de tratamiento aceptables, esto principalmente debido a obstáculos como la mala administración de los recursos económicos que se entregan por parte del gobierno, la poca disponibilidad de espacio para la construcción de dicha infraestructura y el repudio de la sociedad hacia instalaciones de este tipo en la cercanía de las comunidades (BID, 2013).

En el tratamiento del agua residual, la tecnología Convencional más utilizada son Lodos Activados, la cual, para depurar el agua implica una demanda alta de energía y costos de operación que se incrementan por el traslado de subproductos, como los lodos residuales, éstos no siempre encuentran un sitio de disposición final.

Existen otras técnicas alternativas, que pueden ser parte de la respuesta para el tratamiento y en particular para aquellas áreas dispersas, las cuales no cuentan con los recursos económicos para ello, pero sobretodo, éste tipo de técnicas siguen la dinámica de la naturaleza (Díaz-Cuenca *et al.*, 2012).

Por lo anterior, y dada la amplitud del problema, conviene llevar el tratamiento de aguas residuales de otras tecnologías, como son los Humedales Artificiales ya que, además de brindar una integración paisajística y un costo mínimo para la operación y mantenimiento se muestran como una alternativa eficaz frente a la tecnología convencional a la hora de tratar aguas con un alto contenido en nitratos y fosfatos (Díaz- Cuenca *et al.*, 2016).

1.1 Objetivos

General:

Evaluar técnica, ambiental y económicamente el resultado de acoplar un HAFSS con una PTAR de lodos activados ya existente, ubicada en el margen del Río Amanalco, Estado de México, cumpliendo con los criterios permisibles de calidad del agua establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 de un cuerpo receptor tipo B.

Particulares:

- Revisar documentos relacionados con el funcionamiento y situación actual de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales tipo Lodos Activados (PTAR-LA) ubicada en el Municipio de Amanalco, Estado de México y del funcionamiento teórico de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFSS).
- Elaborar una propuesta conceptual del acoplamiento de la PTAR-LA existente, con un posible HAFSS susceptible a ser instalado en sus inmediaciones, permitiendo el tratamiento acorde con la normatividad mexicana aplicable, de las aguas residuales del Municipio de Amanalco.
- Realizar la modelación técnica-económica del acoplamiento, de la PTAR-LA existente, con un posible HAFSS, para el tratamiento del agua residual proveniente de la comunidad de Amanalco, que permita obtener un efluente susceptible a ser descargado en un cuerpo receptor tipo B, establecida por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

1.2 Estrategia de trabajo

En la Figura 1 se muestra de forma conceptual la estrategia de trabajo.

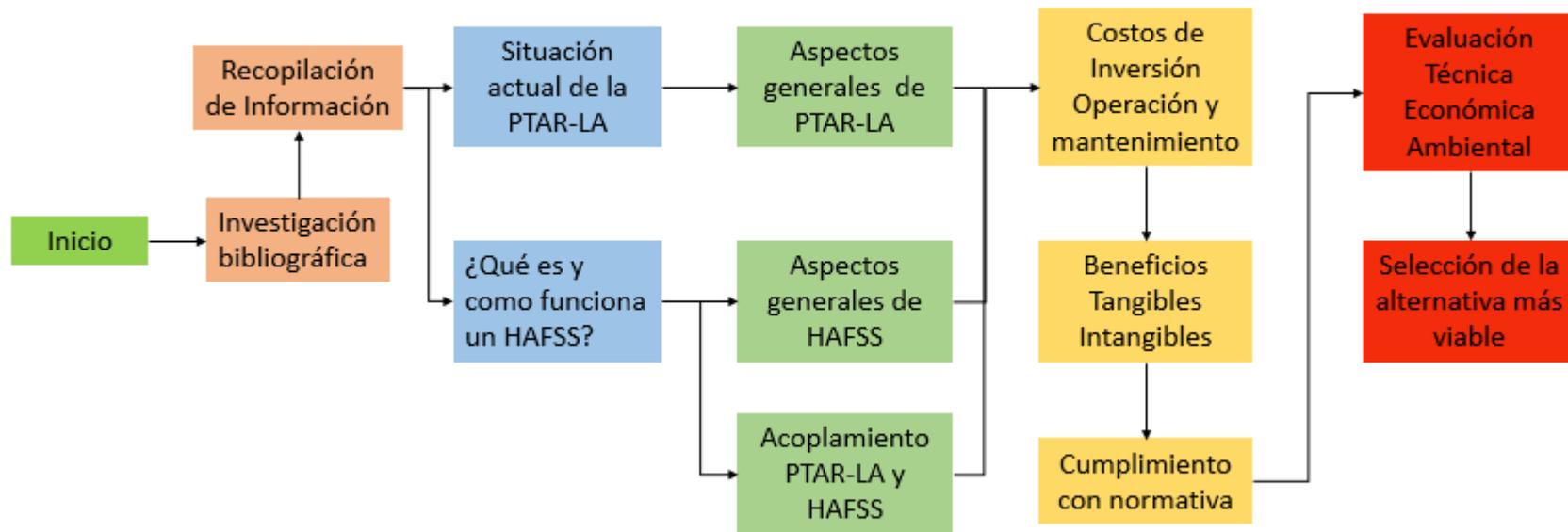


Figura 1. Estrategia de trabajo

2 Marco teórico y antecedentes

2.1 Composición y parámetros de la calidad de agua

La calidad del agua se refiere a las características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Estas características afectan la capacidad del agua para sustentar tanto a las comunidades humanas como la vida vegetal y animal (CONAGUA, 2016a).

Debido a que pueden medirse y construir una forma de clasificar posibles factores que dañen a la salud, los parámetros básicos de la calidad del agua son la temperatura, conductividad, turbiedad, pH y oxígeno disuelto. De la misma forma, la calidad del agua puede medirse mediante el contenido de nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio), sólidos suspendidos, sólidos disueltos, metales pesados, agentes patógenos y compuestos orgánicos, entre algunos otros, permitiendo determinar posibles impactos en la vida acuática y en los seres vivos (CONAGUA, 2016a).

A continuación se describen los parámetros fisicoquímicos y biológicos (Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3) que determinan la calidad de las aguas residuales, las unidades y el significado que se emplean para caracterizar la presencia de cada uno de los contaminantes en las aguas residuales.

Tabla 1. Parámetros físicos del agua residual.

Contaminante	Abreviatura	Unidad	Significado en aguas residuales
Sólidos totales	ST	mg/L	Evaluar el potencial de reutilización de las aguas residuales y determinar el tipo de operaciones y procesos más adecuados para su tratamiento
Sólidos volátiles totales	SVT	mg/L	
Sólidos disueltos totales	SDT	mg/L	
Sólidos suspendidos volátiles	SSV	mg/L	
Sólidos sedimentables	SS	mg/L	
Sólidos sedimentables totales	SST	mg/L	
Tamaño de partícula	TP	mg/L	Evaluar el comportamiento del proceso de desinfección del agua.
Distribución de tamaño de partícula	DTP	mg/L	Evaluar el comportamiento del proceso del tratamiento
Turbidez	NTU	Unidades nefalométricas de turbidez	Se utiliza para evaluar la calidad del agua residual tratada
Color	Gris, negro, transparente	Pt-Co	Evaluar la calidad del agua (residual o potable)
Olor		Índice de Intensidad de olor	Determinar si existiera un problema con la calidad del agua.
Temperatura	T	°C	Es un parámetro importante en el caso del diseño y operación de procesos biológicos
Conductividad	CE	μS/cm ²	Se utiliza para evaluar el efluente tratado para fines agrícolas

Fuente: Metcalf y Eddy, 2014.

Tabla 2. Parámetros químicos orgánicos.

Contaminante	Abreviatura	Unidad	Significado en agua residuales
Demanda bioquímica de oxígeno a 5 días	DBO ₅	mg/L	Mide la cantidad de oxígeno que requiere el agua residual para estabilizarse biológicamente en un periodo de 5 días.
Demanda química de oxígeno	DQO	mg/L	Mide la cantidad de oxígeno que requiere el agua residual para oxidar la materia orgánica.
Carbono orgánico total	COT	mg/L	Frecuentemente se utiliza como sustituto de la prueba de DBO ₅
Compuestos orgánicos específicos			Determina la presencia de compuestos orgánicos específicos.

Fuente: Metcalf y Eddy, 2014.

Tabla 3. Parámetros biológicos.

Contaminante	Unidad	Significado en agua residuales
Coliformes	Número más probable de colonias (NMP)	Evalúa la presencia potencial de organismos patógenos y da pauta para el diseño de los procesos de desinfección.
Microorganismos específicos	Bacterias, protozoarios, helmintos, virus	Evalúa la presencia de organismos específicos en relación con operación de la planta y para su reutilización.
Toxicidad	Unidades tóxicas (UT)	Evalúa la toxicidad aguda y crónica del agua residual.

Fuente: Metcalf y Eddy, 2014.

En la Tabla 4 se describen los contaminantes de interés en el tratamiento del agua residual. Las normas que regulan los tratamientos secundarios están basadas en las tasas de eliminación de la materia orgánica, sólidos suspendidos y patógenos presentes en el agua residual. Gran parte de las normas implantadas recientemente incluyen el control de eliminación de nutrientes y de los contaminantes presentes. Cuando se busca reutilizar el agua residual, las exigencias normativas incluyen también la eliminación de compuestos orgánicos

refractarios, metales pesados y, en algunos casos, sólidos inorgánicos disueltos (CONAGUA, 2015b).

Tabla 4. Contaminantes presentes en el agua.

Contaminantes	Importancia
Sólidos suspendidos	Los sólidos suspendidos pueden llevar al desarrollo de depósitos de lodo y condiciones anaerobias, cuando los residuos no tratados son lanzados al ambiente acuático.
Nutrientes	Cuando son lanzados en el ambiente acuático, pueden llevar al crecimiento de vida acuática indeseable. Cuando son aplicados al suelo en cantidades excesivas, pueden contaminar también el agua subterránea.
Patógenos	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual.
Compuestos tóxicos	Compuestos orgánicos e inorgánicos seleccionados en función de su conocimiento o su sospecha de carcinogenicidad, mutanogenicidad, teratogenicidad o elevada toxicidad. Muchos de esos compuestos se encuentran en las aguas residuales.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiene a resistir los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Ejemplos típicos incluyen detergentes, fenoles y pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados son normalmente adicionados mediante actividades humanas. Tienen una alta persistencia en el ambiente, lo que incrementa su posibilidad de acumulación y toxicidad.
Sólidos inorgánicos disueltos	Componentes inorgánicos, como calcio, sodio y sulfato, deben ser removidos si se va a usar nuevamente el agua residual, por ser potenciales degradadores del suelo.

Fuente: Metcalf y Eddy, 1996.

2.1.1 Contaminación del agua

La contaminación del agua puede ser producida por varias razones: compuestos minerales, orgánicos, nutrientes vegetales, compuestos tóxicos, entre otros (Metcalf y Eddy, 1996).

El agua puede contaminarse debido a las actividades humanas, tales como agricultura e industria, sin embargo puede tratarse y reusarse. Cada una de las actividades involucradas genera un tipo de contaminación los cuales pueden ser clasificados en cuanto a tipo y origen (CONAGUA, 2015b). En la Tabla 5 se clasifica de acuerdo con su tipo:

Tabla 5. Tipos de contaminantes en el agua.

Tipo de contaminante		Fuente
Físico		Fenómenos físicos que aparecen por episodios de contaminación (Aspectos de olor, color, sabor, turbidez, temperatura, etc.).
Químico	Biodegradable	Son degradables con el tiempo.
	Persistentes	Tardan tiempo en degradarse.
	Recalcitrantes	No pueden degradarse.
Biológico		Microorganismos los cuales pueden ser patógenos, ino cuos o de gran utilidad para la depuración de la propia agua.

Fuente: Henry J y Gary W., 1999.

De acuerdo con la CONAGUA (2015b), el agua residual tiene una composición variada y tiene el origen en las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarios, domesticas, etc.

En particular, la descarga de aguas residuales de origen urbano (domésticas) proviene de viviendas, edificios públicos y de la esorrentía urbana que se colecta en el drenaje. Sus principales contaminantes son el nitrógeno y fósforo,

compuestos orgánicos, bacterias coliformes fecales, materia orgánica, entre muchos otros (CONAGUA, 2010).

En la Tabla 6 se muestran los contaminantes presentes en una concentración típica (físicos, químicos y materiales orgánicos) en aguas residuales domésticas.

Tabla 6. Composición típica del agua residual doméstica (mg/L).

Constituyente	Concentración		
	Alta	Media	Baja
Sólidos totales	1200	720	350
Disueltos totales	850	500	250
Fijo	525	300	142
Volátiles	325	200	105
En suspensión	350	220	100
Fijos	75	55	20
Volátiles	275	165	80
Sólidos sedimentables (mg/L)	20	10	5
DBO ₅	400	220	110
COT	290	160	80
DQO	1000	500	250
Nitrógeno total	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoníaco libre	50	15	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo total	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
Cloruros	100	50	30
Alcalinidad	200	100	50
Grasa	150	100	50

Fuente: Metcalf y Eddy, 1996.

2.2 Marco legislativo

La problemática del agua en México es un asunto de seguridad nacional por su escasez, problema que se agrava debido a la mayor demanda en el Valle de México que provoca el constante crecimiento poblacional; que además genera un aumento de los niveles de contaminación en la misma. Por ello, las autoridades de administración del agua enfrentan el reto de compatibilizar el crecimiento de la actividad económica y de la población con la oferta del recurso en el marco de un desarrollo sustentable (CONAGUA, 2010).

El marco legislativo general en el que se encuadra el derecho que regula el uso y aprovechamiento en materia de agua en nuestro país queda representado por los siguientes artículos constitucionales:

El artículo 27 de la Constitución establece que:

“Es propiedad de la Nación las aguas de los mares territoriales en la extensión y términos que fija el Derecho Internacional; lagunas, ríos, arroyos, causes, lechos y riberas de los lagos.”

En tanto, el Artículo 4° de la Constitución hace mención sobre:

“Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines.”

Por otra parte, el Artículo 115° de la Constitución indica que “es responsabilidad municipal el tratamiento del agua”, lo que ocasiona que esto a menudo se cumpla, puesto que hay municipios que no tienen la capacidad económica para hacer frente a este mandato constitucional.

La preocupación por las descargas del agua residual y sus efectos al entorno ha dado lugar a la promulgación de leyes como la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente y la Ley de Aguas Nacionales, cuyo objetivo es prevenir y controlar la contaminación del agua y proteger los recursos hídricos (BID, 2013).

En la Figura 2, se puede observar las diferentes leyes, reglamentos y normas, así como su jerarquía en el marco legislativo de la Nación Mexicana.

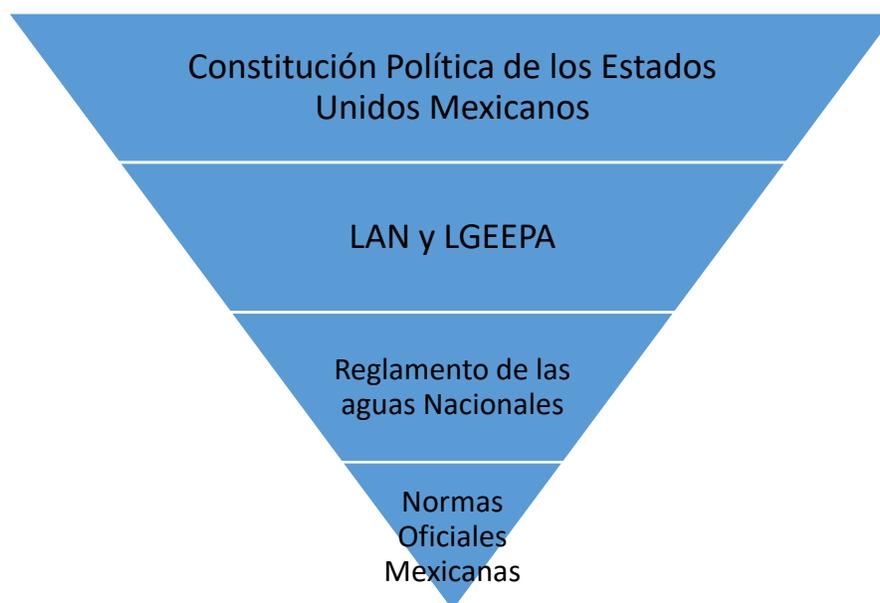


Figura 2. Marco legislativo de la Nación Mexicana.

Fuente: Propia

2.2.1 La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), es la máxima ley de derecho ambiental en México. El fundamento de la Ley es una concepción integral del problema ecológico y la decisión política de hacerle frente, sumando los esfuerzos del Estado y de la Sociedad.

ARTÍCULO 92: *“Con el propósito de asegurar la disponibilidad del agua y abatir los niveles de desperdicio, las autoridades competentes promoverán el ahorro y uso eficiente del agua, el tratamiento de aguas residuales y su reúso”.*

ARTÍCULO 122.- *“Las aguas residuales provenientes de usos públicos urbanos y las de usos industriales o agropecuarios que se descarguen en los sistemas de drenaje y alcantarillado de las poblaciones o en las cuencas ríos, cauces, vasos y demás depósitos o corrientes de agua, así como las que por cualquier medio se infiltren en el subsuelo, y en general, las que se derramen en los suelos, deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir;*

- *Contaminación de los cuerpos receptores;*
- *Interferencias en los procesos de depuración de las aguas”.*

2.2.2 Ley General de Aguas Nacionales (LAN)

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) es reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en materia de aguas nacionales, tiene como objetivo regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable. Le corresponde al Ejecutivo Federal, la autoridad y administración en materia de aguas nacionales y de sus bienes públicos inherentes, quien lo ejercerá a través de la Comisión Nacional del Agua.

Establece que bajo el Artículo 44: *“Corresponde al municipio, al Distrito Federal y, en términos de Ley, al estado, así como a los organismos o empresas que presten el servicio de agua potable y alcantarillado, el tratamiento de las aguas residuales de uso público urbano, previa a su descarga a cuerpos receptores de propiedad nacional, conforme a las Normas Oficiales Mexicanas respectivas o a las condiciones particulares de descarga que les determine la Autoridad del Agua”.*

2.2.3 Normas Oficiales Mexicanas

Los beneficios de contar con agua de calidad son innumerables, por esta razón hay dependencias encargadas de llevar a cabo este trabajo, una de ellas es la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) la cual tiene como propósito fundamental constituir una política de Estado de protección ambiental, que revierta las tendencias del deterioro ecológico y sienta las bases para un desarrollo sustentable en el país. Es la encargada de administrar y preservar las aguas nacionales (SEMARNAT, 2012).

De esta forma, la SEMARNAT ha creado un marco jurídico que se encarga de regular las descargas de agua residual a los cuerpos receptores. Por este medio, expidió las Normas Oficiales Mexicanas donde se establecen los estándares mínimos de calidad y parámetros referentes al reúso y las descargas del agua residual, los cuales son:

Norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. “Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma Oficial Mexicana no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes separados de aguas pluviales.”

Norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002: “Esta Norma Oficial Mexicana establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y la salud humana.”

En la Figura 3, se muestran las diferentes leyes y normas que llevan a cabo el control, protección, prevención y aprovechamiento del agua en la nación.

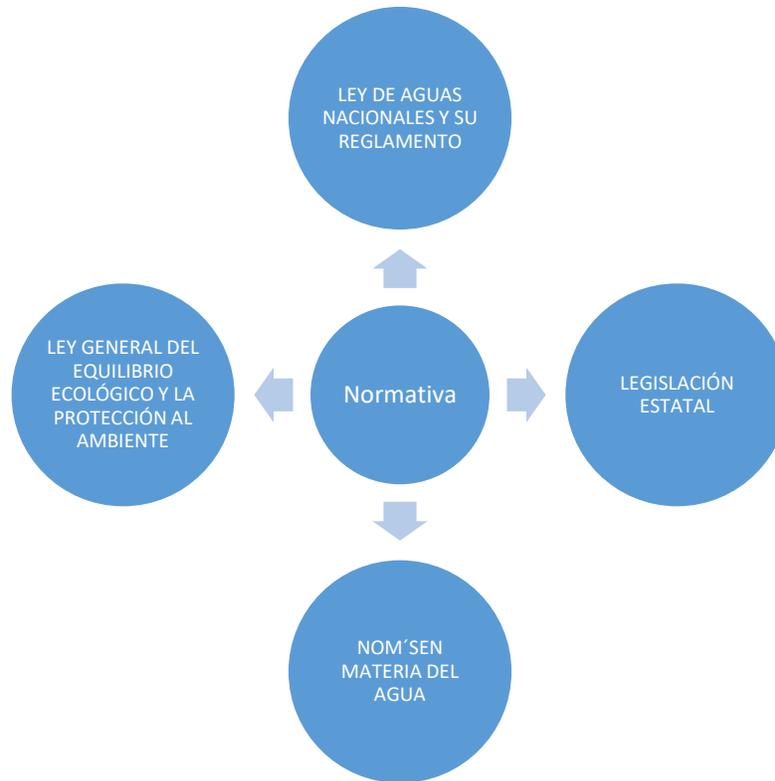


Figura 3. Normativa aplicada al control, protección, prevención y aprovechamiento del agua en México.

Fuente: Propia

Según la Ley Federal de Derechos, el Río Amanalco es un cuerpo receptor de tipo B, en tanto que la presa de Valle de Bravo es un cuerpo receptor tipo C. En la Tabla 7, se pueden observar los límites máximos permisibles de los parámetros en la calidad del agua.

Tabla 7. Tabla de límites máximos permisibles para contaminantes.

Parámetro	Unidad	Ríos(B): Uso Público urbano		Embalses (C): Uso público urbano	
		PM*	PD**	PM*	PD**
Temperatura	°C	40	40	40	40
Grasas y aceites	mg/L	15	25	15	25
Coliformes Fecales	NMP/100	1000	1000	1000	1000
Huevos de Helminto	huevo/L	<=1	<=1	<=5	<=5
SST	mg/L	75	125	40	60
DBO ₅	mg/L	75	150	30	60
Materia Flotante	N/A	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos Sedimentables	mL/L	1	1	1	1
Nitrógeno Total	mg/L	40	60	15	25
Fósforo Total	mg/L	20	30	5	10
Arsénico	mg/L	0.1	0.2	0.1	0.2
Cadmio	mg/L	0.1	0.2	0.1	0.2
Cianuros	mg/L	1	2	1	2
Cobre	mg/L	4	6	4	6
Cromo	mg/L	0.5	1	0.5	1
Mercurio	mg/L	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	mg/L	2	4	2	4
Plomo	mg/L	0.2	0.4	0.2	0.4
Zinc	mg/L	10	20	10	20
pH		5.5-10	5.5-10	5.5-10	5.5-10

Fuente: Diario Oficial de la Federación del Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996.

*promedio mensual

**promedio diario

Para que los biosólidos puedan ser aprovechados, deben cumplir con la especificación; y lo establecido en las tablas de la Norma Oficial Mexicana, NOM-004-SEMARNAT-2002. Los generadores de biosólidos deben controlar la atracción de vectores, demostrando su efectividad (Tabla 8).

Tabla 8. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos.

Contaminante	Excelentes mg/kg (en base seca)	Buenos mg/kg (en base seca)
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	4 300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

Fuente: Diario Oficial de la Federación de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996.

En la Tabla 9, se hace referencia a los límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos, de acuerdo con la Norma oficial mexicana, NOM-004-SEMARNAT-2002.

Tabla 9. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes Fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca	Huevos de helminto/g en base seca
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1 (a)
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

Fuente: Diario Oficial de la Federación de la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002.

Los biosólidos se clasifican en excelente y bueno en función de su contenido de metales pesados; y en clases A, B y C en función de patógenos y parásitos. En la Tabla 10 se muestra el uso y aprovechamiento de los biosólidos.

Tabla 10. Aprovechamiento de biosólidos.

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	Usos urbanos con contacto público durante su aplicación
		Los establecidos para clase B y C
Excelente o bueno	B	Usos urbanos sin contacto público durante su aplicación
		Los establecidos para clase C
Excelente o bueno	C	Usos forestales
		Mejoramiento de suelos
		Usos agrícolas

Fuente: Diario Oficial de la Federación de la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002.

El aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y clase, como se especifica en la tabla anterior y su contenido de humedad hasta el 85%.

Tanto las ciudades y comunidades aledañas se encuentran obligadas a cumplir con la normatividad. Por tanto deben de tratar las aguas generadas para mantener y preservar el medio ambiente.

2.3 Sistemas de tratamiento de agua residual

El tratamiento y el reúso del agua juegan un papel fundamental en la administración y manejo de este recurso en todos los países, especialmente en aquellos que presentan problemas de escasez (Asano, 1991).

Un sistema de tratamiento se encuentra compuesto por una combinación de operaciones y procesos unitarios diseñados para reducir los contaminantes presentes en el agua residual. Se pueden llevar a cabo diversas combinaciones de operaciones y procesos unitarios, pero cada sistema tiene peculiaridades que las definen.

2.3.1 Etapas de los tratamientos de aguas residuales

La complejidad de la depuración, se da en función de la carga contaminante y se clasifica en pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario o avanzado (Asano, 1991).

a) Pretratamiento

Es esencialmente físico, en esta fase se remueven sólidos presentes en las aguas residuales, a través de algunos sistemas como son: cribas (basura o material sólido de gran tamaño) y desarenadores (partículas pesadas como grava, arena y semillas) (Interapas, 2014).

b) Tratamiento primario

Puede ser físico o físico-químico y se realiza en el tanque de sedimentación para remover ciertos contaminantes y retirarlos como lodo en el fondo de los tanques. Este lodo después puede ser procesado y usado como abono (Interapas, 2014).

c) Tratamiento secundario

Es esencialmente biológico, en esta etapa las bacterias benéficas se emplean intencionalmente para consumir otra parte de contaminantes que no fueron removidos en el tratamiento primario. La incorporación de oxígeno o aire al agua contribuye al crecimiento bacteriano (Interapas, 2014).

Los procesos secundarios producen exceso de biomasa, la cual remueve los contaminantes biodegradables mediante catabolismo endógeno. Los lodos secundarios se pueden combinar con los primarios para un tratamiento adicional con un proceso biológico anaerobio.

En la mayoría de los casos, es suficiente el tratamiento secundario de las aguas residuales municipales para que el efluente cumpla con las normas oficiales mexicanas. Sin embargo, en algunos casos puede requerirse tratamiento adicional (Interapas, 2014).

d) Tratamiento avanzado

Después de los tratamientos anteriores, se ha logrado eliminar un 85% a 95% de los contaminantes de las aguas residuales y queda por eliminar los nutrientes que favorecen el crecimiento de la flora acuática (algas y lirios), como son el fósforo y el nitrógeno que proviene del escurrimiento agrícola, de desechos humanos y del uso de detergentes. Estos son eliminados por medio de procesos, tales como la ósmosis inversa o precipitación química, entre otros procesos (Interapas, 2014).

En la Figura 4, se muestra el proceso de sistema de tratamiento de aguas residuales y las normas que se deben de cumplir.

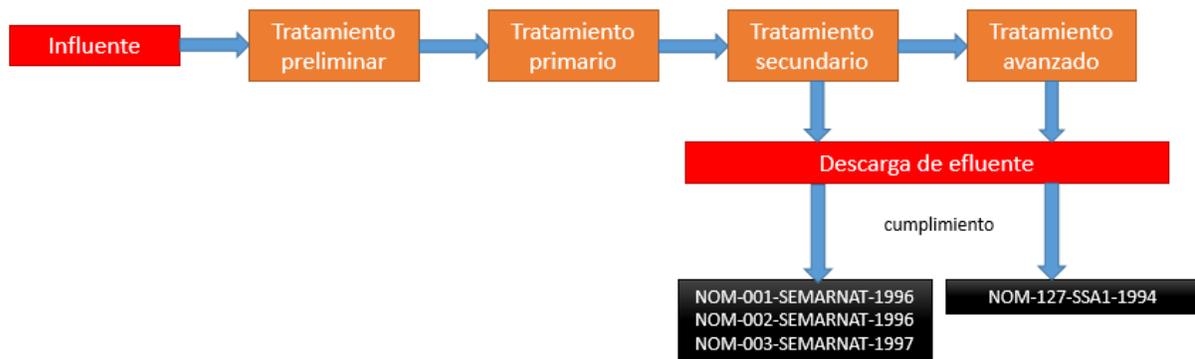


Figura 4. Diagrama de flujo de un proceso de sistema de tratamiento de aguas residuales.

Fuente: Martínez-Macedo, 2017.

En la Tabla 11, se muestran los procesos y operaciones para remover determinados contaminantes.

Tabla 11. Operaciones y procesos unitarios utilizados para eliminar.

Contaminante	Operación unitaria, proceso unitario o sistema de tratamiento
Sólidos en suspensión	Sedimentación
	Desbaste y aireación
	Variaciones de filtración
	Flotación
	Adición de polímeros o reactivos químicos
	Coagulación sedimentación
	Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Materia orgánica biodegradable	Variaciones de lodos activados
	Película fija: filtros percoladores
	Película fija: discos biológicos
	Variaciones de lagunaje
	Filtración intermitente de arena
	Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
	Sistemas fisicoquímicos
Patógenos	Cloración
	Hipocloración
	Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Nutrientes Nitrógeno	Variaciones de sistemas de cultivo suspendido
	Variaciones de sistemas de película fija
	Arrastre de amoníaco (stripping)
	Intercambio de iones
	Cloración en el punto crítico
	Sistemas de tratamiento por evacuación en el terreno
Fósforo	Adición de sales metálicas
	Coagulación y sedimentación con cal
	Eliminación biológica y química de fósforo
Materia orgánica refractaria	Adsorción en carbón
	Ozonación terciaria
Metales pesados	Precipitación química
	Intercambio de iones
Contaminante	Operación o proceso unitario, sistema de tratamiento
Sólidos inorgánicos disueltos	Intercambio de iones
	Ósmosis inversa
	Electrólisis

Fuente: Metcalf y Eddy, 1996.

2.4 Agua residual en México

El recurso hídrico en México, al igual que en el resto del mundo, se encuentran bajo una creciente presión provocada por el aumento demográfico (consumo de agua en hogares, agricultura e industria), la urbanización, la agricultura y la industria, han aumentado significativamente el uso de agua. Este desarrollo desmesurado conduce a la escasez y perjudica gravemente el avance hacia el logro de los Objetivos del Milenio (BID, 2013).

En México, el mayor volumen del recurso hídrico es utilizado en actividades agrícolas, principalmente riego (Figura 5). También cabe destacar que México es uno de los países con mayor infraestructura de riego en el mundo (CONAGUA, 2016b).

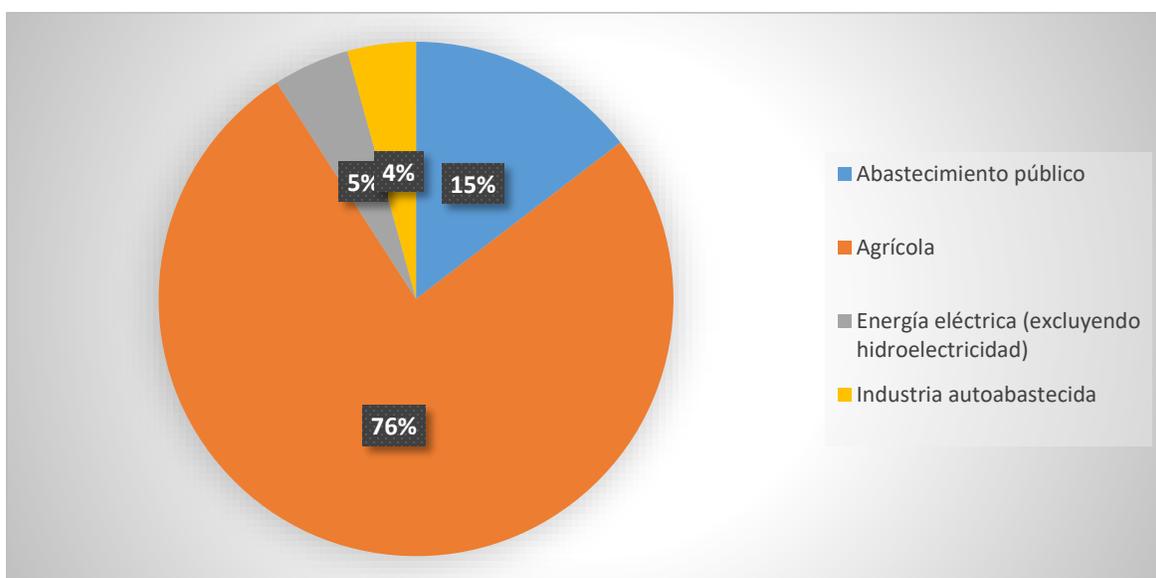


Figura 5. Uso del recurso hídrico en México.

Fuente: Elaborado con base en CONAGUA, 2016b.

A nivel nacional, México experimenta un grado de presión hídrica del 19.2%, lo cual se considera de nivel bajo; sin embargo, en las zonas centro, norte y noroeste del país experimentan un alto grado de presión.

Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas que a su vez se dividen en 13 regiones administrativas (CONAGUA, 2016c).

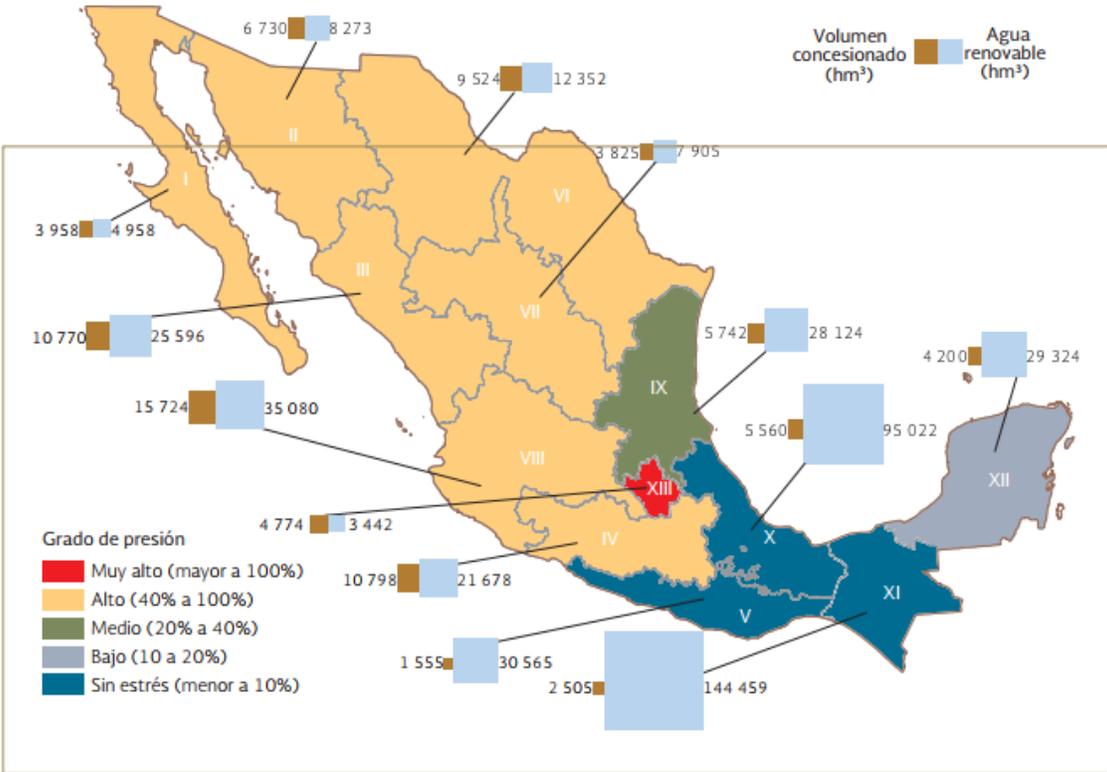


Figura 6. Grado de presión sobre el recurso hídrico por Región Hidrológica Administrativa (RHA).

Fuente: CONAGUA, 2016C.

Se puede observar en la Figura 6 que la región XIII Aguas del Valle de México (zona centro) cuenta con un grado de presión hídrico de 138.7%, lo cual es considerado “Muy alto”.

2.5 Situación actual de agua residual en México

Las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales e industriales. Las municipales corresponden a las que son manejadas en los sistemas de alcantarillado urbano y rural. En tanto, las aguas residuales industriales son las que proceden de cualquier actividad industrial en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice agua, incluyéndose los líquidos residuales, aguas de proceso y aguas de drenaje (CONAGUA, 2014).

Durante el año 2014, las 2 337 plantas en operación a lo largo del país, trataron 111.3 m³/s (Tabla 12), es decir el 52.8% de los 211.0 m³/s recolectados a través de los sistemas de alcantarillado (Figura 7) (CONAGUA, 2015b).

Tabla 12. Descarga de aguas residuales municipales.

Centros urbanos (descargas municipales)		
	Volumen (miles de hm ³ /año)	Flujo (m ³ /s)
Aguas residuales municipales	7.21	228.7
Recolección en alcantarilla	6.65	211
Tratamiento	3.51	111.3

Fuente: CONAGUA, 2015b.

En la Tabla 13 se puede observar la carga de contaminantes presentes en las aguas residuales.

Tabla 13. Carga de contaminantes de las agua residuales.

Carga contaminante	
	DBO ₅ (Millones de toneladas/año)
Generación	7.21
Recolección en alcantarilla	6.65
remoción en los sistemas de tratamiento	3.51

Fuente: CONAGUA, 2015b.

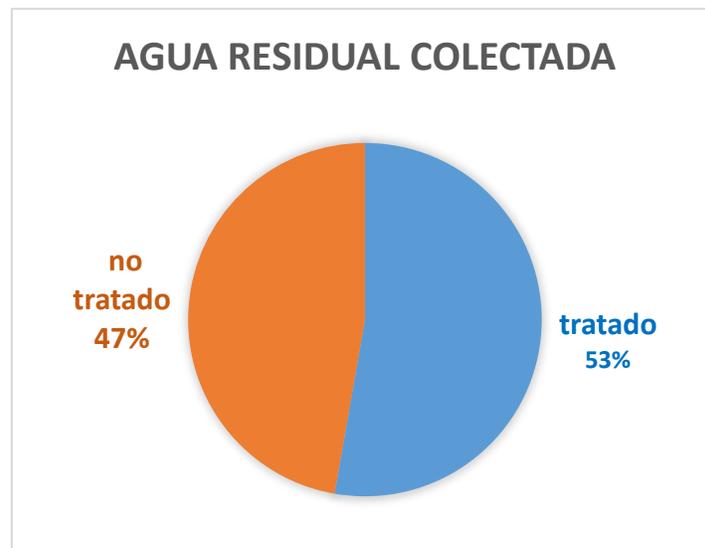


Figura 7. Agua residual colectada en México.

Fuente: CONAGUA, 2015b.

En la Tabla 14 se indican las plantas de tratamiento de aguas residuales en operación por región hidrológico-administrativa (RHA).

Tabla 14. PTAR municipal en operación por RHA.

Número de RHA	Número de plantas en operación	Capacidad instalada (m³/s)	Caudal tratado (m³/s)
I	66	9.86	6.87
II	101	4.94	3.44
III	362	10.26	7.88
IV	199	9.89	7.54
V	94	4.92	4.01
VI	225	34.15	24.04
VII	151	6.8	5.36
VIII	582	39.84	30.52
IX	86	5.53	4.16
X	137	6.8	5.3
XI	114	4.42	2.52
XII	81	2.95	2.03
XIII	139	11.54	7.58
TOTAL	2337	151.9	111.25

Fuente: CONAGUA, 2015b.

La CONAGUA dio a conocer que en el 2014 se reusaron directamente (antes de su descarga) 21.8 m³/s de aguas residuales tratadas. En tanto que se reusaban indirectamente (después de su descarga) 69.4 m³/s de aguas residuales tratadas. El intercambio de aguas residuales tratadas, en el que substituyen agua de primer uso, se estima en 8.9 m³/s. El reúso posee varias ventajas: reducción de costos, reduce las presiones sobre los cuerpos de agua de primer uso y satisface demandas de agua que no exigen calidad potable (CONAGUA, 2015b).

Las entidades regulatorias en cuestiones de cuidado del agua anuncian que una de las principales formas para atender los problemas del déficit del agua, son los programas de ahorro, conservación y uso eficiente del agua. En México se ha optado por optimizar el uso de agua y de la infraestructura correspondiente, con la

participación activa de los usuarios y con alto sentido de equidad social (CONAGUA, 2015c).

2.5.1 Sistemas de tratamiento de agua residual en México

En México se utilizan diferentes tratamientos de agua residual de los cuales, a nivel nacional, cerca del 60% son tratamiento con lodos activados y 12 % con lagunas estabilizadoras (CONAGUA, 2015b).

En la Figura 8 se muestra los diferentes procesos de tratamiento de aguas residuales municipales a nivel nacional.

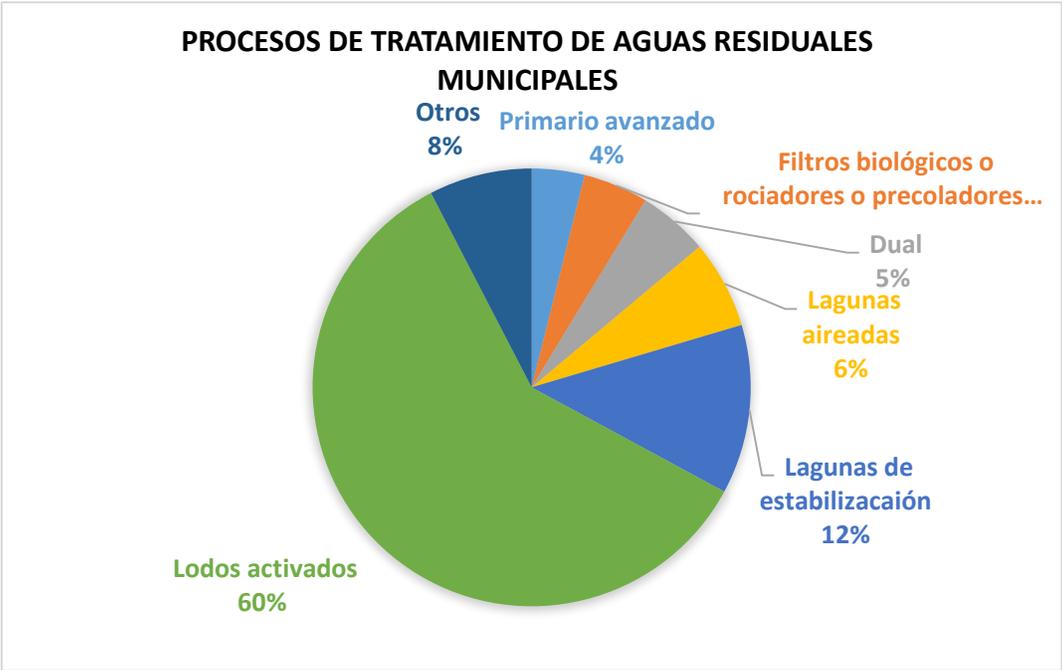


Figura 8. Tipos de tratamiento de aguas residuales municipales.

Fuente: CONAGUA, 2015b.

De acuerdo con la CONAGUA (2015b), en México, la tecnología más usada para realizar el tratamiento de agua son PTAR-LA. Sin embargo, debido a que en la legislación en materia de agua, el nivel municipal quien debe dar tratamiento a

este recurso, un gran número de PTAR-LA en el país se encuentran sin operar, ya que ese nivel de gobierno, cuentan con muy pocos recursos económicos y se priorizan otras acciones antes de tratar las aguas residuales (CONAGUA, 2015b).

Por otra parte, la mayor parte del lodo residual generado en las PTAR's municipales se dispone en el suelo. Aunque México cuenta con una legislación para la aplicación del lodo al suelo, NOM-004-SEMARNAT, 2002, no se lleva un control o una vigilancia estricta en su aplicación (CONAGUA, 2016c).

En cuanto al sistema de tratamiento mediante el uso de humedales artificiales, en el año 2014 el Inventario Nacional de PTAR tiene como registrado 71, en su mayoría ubicadas en Oaxaca, Michoacán y Tabasco (Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014).

2.6 Lodos activados

El proceso de lodos activados, es probablemente el sistema más empleado para el tratamiento biológico de aguas municipales e industriales. Los componentes esenciales para el funcionamiento adecuado de una planta de lodos activados son: Tanque de aireación, clarificador (en el cual los sólidos biológicos, se pueden separar del efluente) y bomba para llevar a cabo la recirculación de los sólidos concentrados al tanque de aireación. De la misma forma, se cuentan con tiempos de retención largos dependiendo de la carga orgánica que se maneje (Metcalf y Eddy, 1996).

El producto del tratamiento biológico aerobio genera lodos de exceso con un alto porcentaje de inestabilidad que se deben extraer con alguna frecuencia para deshidratarlos y disponerlos adecuadamente (Metcalf y Eddy, 1996).

La principal desventaja de los procesos biológicos es el incremento de la cantidad de biomasa como consecuencia de la biodegradación, la cual es inestable y por lo tanto requiere un manejo y disposición adecuada. Por otra parte, es necesario considerar la formación de moléculas relativamente complejas o compuestos químicos tóxicos. Otra desventaja de esta tecnología está asociada a las altas

cantidades de energía debido al suministro de oxígeno, del cual su demanda está determinada por la cantidad de materia a remover y la masa de lodos activados en el reactor (Ramalho, 1996; Metcalf y Eddy, 1996).

En la Figura 9, se muestra el proceso convencional del tratamiento de lodos activados.

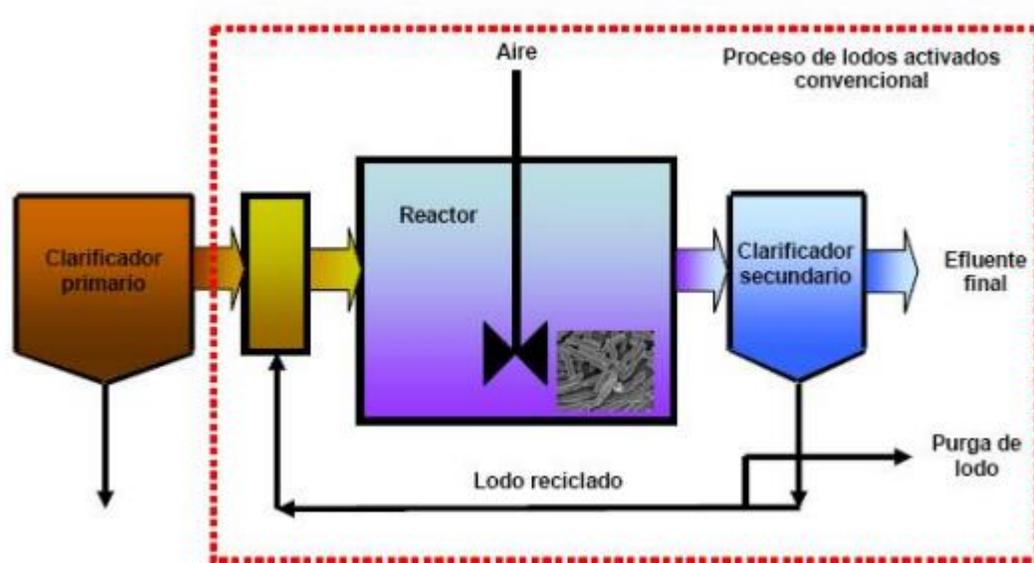


Figura 9. Proceso convencional de tratamiento de lodos activados.

Fuente: MASTA, 2006.

Además, un proceso secundario de lodos activados convencional, tiene bajas remociones de nitrógeno y fósforo en aguas residuales, por lo que no es posible prevenir el fenómeno de eutrofización de los cuerpos de agua receptores de las aguas tratadas (Martínez-Macedo, 2017).

2.7 Humedales artificiales

Dentro de las tecnologías amigables con el ambiente que se utilizan en el tratamiento de las aguas residuales se encuentran los humedales artificiales (HA), siendo estos una ecotecnología que mediante procesos de biotransformación y

mineralización permite reducir las concentraciones de carbono, nitrógeno y fósforo, debajo de lo establecido por la normatividad vigente. Los principales componentes de un HA son: a) el vegetal, que se refiere a las plantas vasculares terrestres y/o acuáticas, b) el material de empaque o medio de soporte constituido por agregados pétreos y c) los microorganismos que se encuentran en el HA (Figura 10).

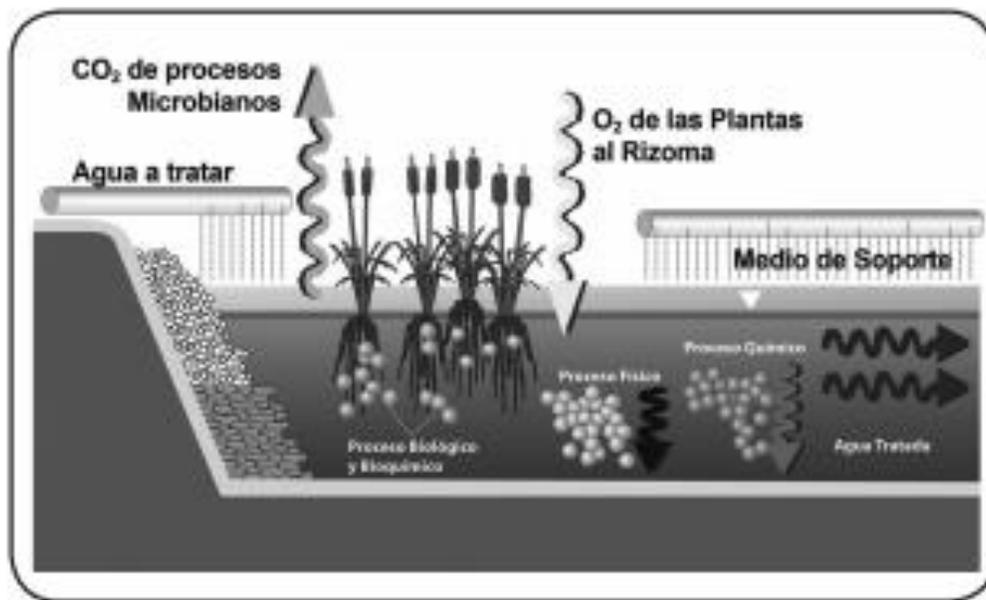


Figura 10. Componentes y procesos depuradores de un Humedal Artificial.

Fuente: Adaptación de Kadlec y Scott, 2009; Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014.

Los HA sustentan su funcionamiento en la actividad bioquímica de los microorganismos; el aporte de oxígeno proveniente del componente vegetal en interacción con el material de empaque, brindando soporte tanto para los microorganismos como para el componente vegetal, además de actuar como material filtrante (Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014), lo que provoca una biodegradación de materia y elimina materiales disueltos y suspendidos en el agua residual.

Su diseño permite mantener e incrementar la estética del paisaje y proporcionan condiciones para el desarrollo y la preservación de vida silvestre, ya que proveen de un hábitat para diversos tipos de organismos.

2.7.1 Clasificación de los Humedales Artificiales

Los sistemas de HA de acuerdo con Kadleck y Wallace (2009) “pueden dividirse en Flujo Subsuperficial (HAFSS) y Flujo Superficial (HAFS)”.

De acuerdo con Luna-Pabello y Aburto-Castañeda (2014) si se considera la concentración de contaminantes orgánicos o carga orgánica del afluente y el tipo de vegetación susceptible de ser incorporada a cada tipo de HA es posible obtener las opciones que se muestran en la Figura 11. En el presente trabajo se ha optado por el uso del HAFSS por su eficiencia en la remoción de contaminantes en comparación con un HAFS.

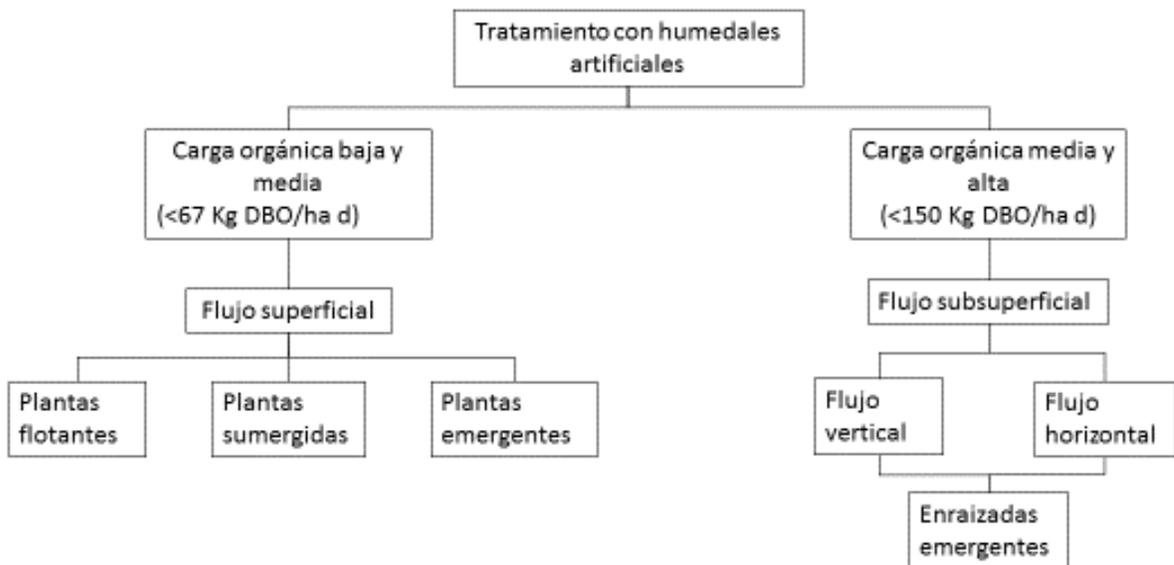


Figura 11. Tratamiento con humedales artificiales.

Fuente: Adaptación de Kadlec y Scott, 2009; Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014.

1) Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial

Un sistema de tipo HAFSS está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado y el

nivel del agua, por diseño, debe estar por debajo de la superficie del medio (EPA, 2000).

El flujo de agua discurre de forma subterránea, favoreciendo que el agua a tratar no quede expuesta al ambiente y permiten la depuración de cargas elevadas de contaminantes orgánicos, mientras que los HAFS son sistemas inundados con espejo de agua expuesto al ambiente y son acompañados de una extensa vegetación hidrófila (Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014).

Los HAFSS pueden ser de dos tipos en función de la forma de aplicación de agua al sistema: horizontal y vertical (Delgadillo *et al.*, 2010).

1.1) Humedales subsuperficiales de flujo horizontal

El agua ingresa en forma permanente. Es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte inferior opuesta. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso (flujo pistón) con un lecho que varía de 0.45 a 1 metro (Figura 12) (Delgadillo *et al.*, 2010).

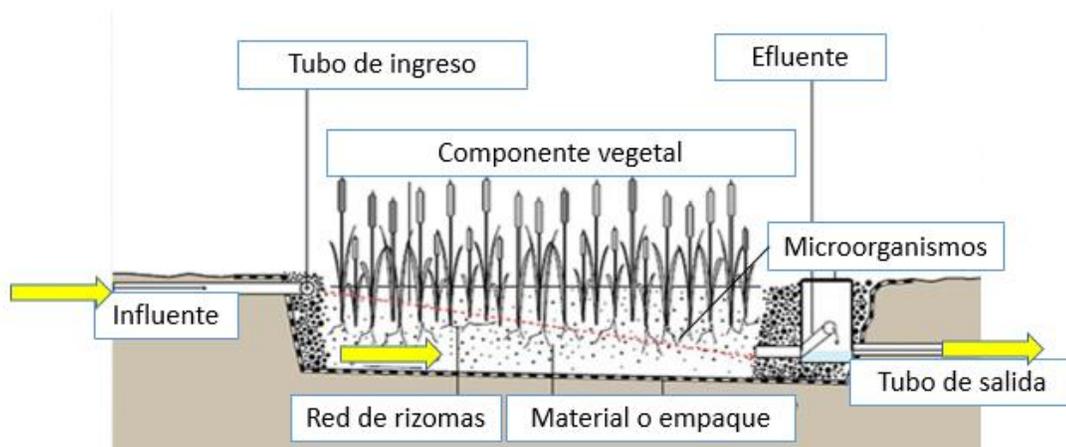


Figura 12. Esquema general de un HAFSS.

Fuente: Adaptación de Reed, 1993.

La importancia de los HA se fundamenta en que son una alternativa viable y sustentable para la depuración de aguas residuales de tipo industrial,

agropecuaria y doméstica. Su implementación tiene un menor costo en comparación con los sistemas de tratamiento convencional, son amigables con el entorno paisajístico, no generan subproductos nocivos y se adaptan a las condiciones tanto climáticas como urbanas de México (Kivaisi, 2001, Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014).

Para realizar el diseño adecuado de un HA, es crucial conocer, la problemática asociada, es decir: origen, calidad y volumen del agua a tratar, destino, volumen y calidad de agua que se desea producir; espacio disponible; características del terreno susceptibles de ser empleado (topografía, mecánica de suelos, tipo de suelo, etc.) (Reed, 1992, Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014).

2.7.2 Vegetación

El papel de la vegetación en los HA está determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados. Las plantas son organismos fotoautótrofos, es decir, que utilizan la energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico. Tienen la habilidad de transferir oxígeno a la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde es utilizado por los microorganismos para la degradación de materia orgánica y nitrificación (Arias, 2004, Delgadillo *et al.*, 2010).

Como mencionan Delgadillo *et al.* (2010), las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y escorrentía de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades del agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toman el carbono, nutrientes y elementos traza para incorporarlos a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.

- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.

En la Figura 13 y en la Tabla 15 se muestran algunos ejemplos de las especies vegetales que son usadas normalmente y su función en los humedales.

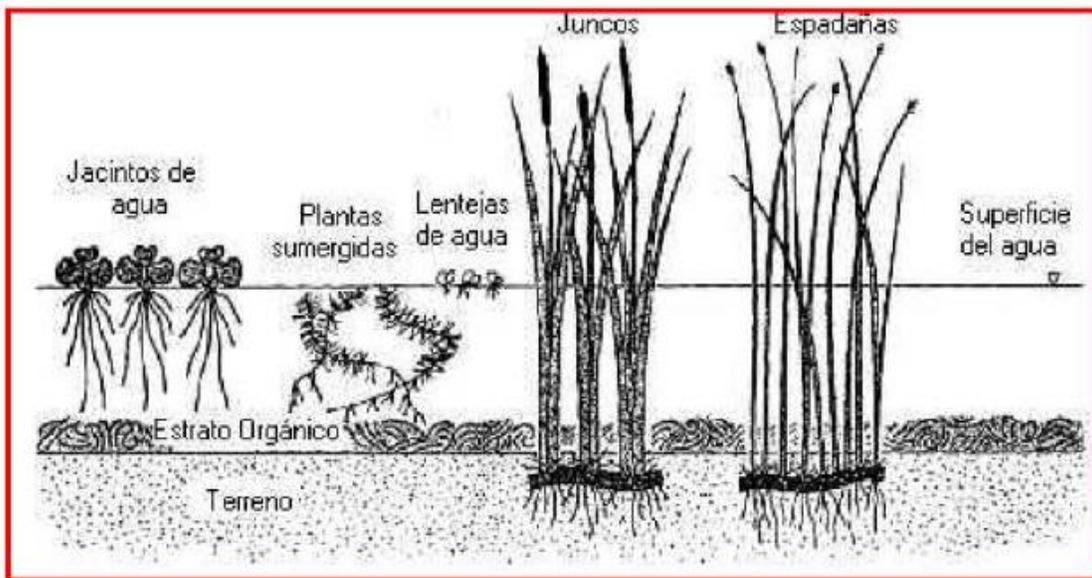


Figura 13. Plantas acuáticas comunes utilizadas en humedales.

Fuente: Lara, 1999.

Tabla 15. Listado de especies que comprenden el componente vegetal.

En los humedales de flujo subsuperficial		
<i>Nombre científico</i>	Nombre común	Función
Phragmites australis	Carrizo	Depuradora
Equiseum hyemale	Cola de caballo, arricillo y cañuela	Ornato
Cyperus papyrus	Papiro	Depuradora
En el humedal de flujo superficial		
Hidrófitas enrizadas emergentes		
Nombre científico	Nombre común	Función
Schoenoplectus californicus	Junco triangular o totora	Depuradora
Juncus effusus	Tulillo o junco	Depuradora
Nuncus acutus	Junco espinoso	Depuradora
Hidrófitas enraizadas de hojas flotantes		
Nombre científico	Nombre común	Función
Nymphae mexicana	Atlacuetzon, ninfa	Ornato
Hydrocotyle ranunculoides	Malacate	Depuradora
Polygonum amphibium	Achilillo macho	Depuradora
Sagittaria demersa	Papa de agua, bayoneta, cola de pato	Depuradora
Patomogeton pusillus	Pasto de agua, lila de agua	Depuradora
Ceratophyllum demersum	Colas de zorro, bejuquillo	Depuradora
Hidrófitas libre flotadoras		
Nombre científico	Nombre común	Función
Wolffa columbiana	Chichicastle, lentejilla	Depuradora
Lemna gibba	Chichiscaste, lentejilla	Depuradora

Fuente: Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014

2.7.3 Microorganismos

Los microorganismos son considerados como la clave en el proceso de transformación y remoción de contaminantes dentro de los humedales artificiales. Cualquier factor que pueda afectar su composición, concentración o eficiencia para la degradación tiene un impacto en el desempeño del humedal artificial (Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014).

Los microorganismos se encargan de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las

plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. En el resto del lecho granular predominarán los microorganismos anaerobios. Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza y la desinfección (Arias, C. A. y Brix, H. 2011, Delgadillo *et al*, 2010).

2.8 Ejemplos de aplicaciones de HA

Los HA construidos han sido ampliamente usados en el tratamiento de diferentes tipos de aguas, como alcantarillados, aguas pluviales, aguas residuales industriales, esorrentía agrícola, drenaje ácido de minas y lixiviados de rellenos sanitarios. Como sistemas naturales de tratamiento han mostrado tener una capacidad significativa tanto para el tratamiento de aguas residuales como para la recuperación de recursos (Young, T.C., A.G. Collins, T.L. Theis. 2000).

1) PTAR de Silkrode (Alemania)

La PTAR de Silkrode en Alemania fue construida entre 2006 y 2007 (Figura 14). Se diseñó para 500 habitantes que equivale a un caudal máximo de 94 m³/día. La PTAR está compuesta por un pretratamiento que cuenta con un tanque de sedimentación (30 m²) y un lecho para el almacenamiento de lodos (25 m³). También cuenta con un sistema de distribución de las aguas a tratar que consta de un tanque de almacenamiento (20 m³), para posteriormente distribuir el agua mediante bombas conectadas a tubos de polietileno con agujeros elevados (Wasser- und Abwasserzweckverband, 2007).



Figura 14. Humedal artificial en Silkerode, Alemania.
Fuente: Wasser- und Abwasserzweckverband, 2007.

El HA está compuesto por dos celdas hidráulicamente independientes con carga intermitente y ocupan un área total de 2160 m². Hasta el momento los datos de rendimiento de este HA se pueden ver en la Tabla 16 (Wasser-und Abwasserzweckverband, 2007).

Tabla 16. Rendimiento del HAFSS de Silkrode, Alemania.

	Afluente	Efluente
DQO (mg/L)	654	31
DBO ₅ (mg/L)	355	7
PT(mg/L)	11	0.2
NT (mg/L)	77	3

Fuente: Wasser-und Abwasserzweckverband, 2007.

2) Humedales de Michoacán (México)

En el año 2005 se llevó a cabo por parte del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) la construcción de dos HA, de tipo subsuperficial. Uno se colocó en

el municipio de Tzintzun en la comunidad de Cucuchucho (Figura 15; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y otro en el municipio de Quiroga en la comunidad de Santa Fe de la Laguna (IMTA, 2007).



Figura 15: Humedal Artificial de Cucuchucho.

Fuente: IMTA, 2007

Los HA del lago de Pátzcuaro fueron contruidos para el tratar el agua de una población de 1,080 habitantes y cuenta con una capacidad instalada de 1 L/s para el municipio de Cucuchucho y de 3 L/s en Santa Fe de la Laguna (IMTA, 2007). En la Tabla 17 se muestran los rendimientos de los dos HA.

Tabla 17. Rendimiento de los HA del lago de Pátzcuaro, Mich.

Parámetros	Cucuchucho		Santa Fe de la Laguna	
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
DBO ₅ (mg/L)	450	30	414	30
NT (mg/L)	79	10	71	15
PT (mg/L)	17	6	13.4	5

Fuente: IMTA, 2007

Como resultado de la construcción de los HA se obtuvieron; una menor concentración de contaminantes del efluente descargado hacia el lago; protección de la de la vida acuática; empleos antes, durante y después de la instalación del sistema; entre otros beneficios, tanto para las comunidades, como las personas que pueden visitar ese lugar (IMTA, 2007).

2.9 Ventajas y desventajas de HAFSS

Con el entendimiento de los tipos de Humedales Artificiales, a continuación se presentan las ventajas y limitaciones que se deben tener en cuenta antes de decidir implementar un HAFSS, los cuales pueden ser observados en la Tabla 18.

Tabla 18. Ventajas y desventajas del tratamiento de agua residual de un HAFSS.

Ventajas	Desventajas
Los HAFSS aportan un tratamiento efectivo en forma pasiva y disminuyen la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo.	Un HAFSS requiere un área extensa en comparación con los sistemas mecánicos convencionales de tratamiento.
Los HAFSS son bajos precios de operación y mantenimiento, en comparación con otros tipos de tratamiento.	Es necesario incluir tratamientos previos al humedal que separen los sólidos de los líquidos.
El sistema de tipo HAFSS es muy efectivo en la remoción de la DBO ₅ , la DQO, los SST, los metales y algunos compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas.	En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO ₅ , NH ₃ y NO ₃ . Un aumento en el tiempo de retención puede compensar por la disminución de las tasas pero el incremento en el tamaño de los humedales en climas extremadamente fríos puede no ser factible desde el punto de vista económico o técnico.
El sistema de tipo HAFSS produce bajas cantidades de biosólidos y lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.	Se requiere un tiempo de retención alto, para poder llevar a cabo una remoción eficiente.
Tiene altas remociones de nitrógeno y fósforo. El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.	

Fuente: Arias, 2004; Delgadillo et al, 2010; Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014; Cano, 2013, Martínez-Macedo, 2017.

2.9.1 Humedales artificiales en comparación con tratamiento de lodos activados.

En la actualidad, existen muchas tecnologías para llevar a cabo la remoción de diferentes contaminantes presentes en el agua y el tratamiento más usado es LA, sin embargo, en comparación de los HAFSS se tienen diferentes ventajas y desventajas, como se pueden observar en la Tabla 19.

Tabla 19. Comparativa de funcionamiento de HA con LA.

Ventajas	Desventajas
Los HA tienen un menor costo de instalación, mantenimiento y funcionamiento, al no necesitar energía eléctrica.	Los HA tienen un mayor tiempo de retención.
Los HA soportan bien las variaciones del caudal, a diferencia de los lodos activados.	Debido a que los Humedales Artificiales no pueden tratar aguas con desechos sólidos, no pueden ser utilizados como sistema de tratamiento primario.
Su implementación tiene un menor impacto económico y ecológico, además de causar menores inconvenientes a la población cercana a estos.	Los tratamientos de LA son capaces de tratar una cantidad de agua mayor. En tanto el HA necesita una mayor área disponible para llevar la remoción de contaminantes, provocando una elevación en los costos de instalación.
No producen ruidos ni malos olores.	

Fuente: Arias, 2004; Delgadillo et al, 2010; Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014; Cano, 2013, Martínez- Macedo, 2017.

2.9.2 Costos de diferentes tratamientos de agua

Los costos generados por el diseño y la construcción de los humedales artificiales van desde los \$7,500.00 hasta los \$72,350.00 dependiendo del tipo de material que se utilice, así como la extensión de las construcciones. Estos costos, no

toman en cuenta la operación del sistema, ya que puede llevarse a cabo por los usuarios del HA (Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2010).

Los HA tienen un tiempo de vida útil de hasta 20 años, lo que permite recuperar el costo de la inversión inicial y tomando en cuenta los costos de operación y mantenimiento, el precio por metro cúbico de agua tratada oscila entre \$1.04 y \$1.84, para HA dependiendo el tipo de material que se utilice para su construcción (Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2010). En la Tabla 20 se hace una comparación de los diferentes costos que tienen algunos de los procesos utilizados para el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 20. Comparación de costos por m³ de agua tratada por proceso de tratamiento.

Proceso	Costos (\$/m ³)			
	Inversión	Operación y mantenimiento	Indirectos	Total
Tratamiento avanzado, remoción de nitrógeno y fósforo	5.26	5.29	0.90	8.75
Aereación extendida	2.85	1.90	.58	5.53
Lodos Activados	2.74	1.50	0.57	4.81
Filtros Biológicos	2.83	1.15	0.57	4.81
Primario con adición de cal	2.11	1.90	0.43	4.44
Primario con adición de sulfato de aluminio	2.34	1.36	0.49	4.19
Zanjas de oxidación	1.87	1.18	0.39	3.44
Tratamiento primario	1.41	0.91	0.30	2.62
Tratamiento anaerobio	1.41	0.75	0.28	2.44
Humedales Artificiales	1.18	0.40	0.13	1.71
Lagunas Facultativas con impermeabilización	1.23	0.30	0.12	1.65

Fuente: Metcalf y Eddy, 2014.

En algunos casos, estos se encuentran acoplados con otras tecnologías, tal es el caso del tratamiento con LA y Lagunas Aireadas. Obteniendo así bajos costos en mantenimiento y operación, además de brindar la calidad de agua requerida y la obtención de volumen pertinente por las autoridades competentes (CONOAGUA, 2016d).

2.10 Evaluación de un proyecto

La evaluación de proyectos es el estudio por el cual, a través de la simulación anticipada de los componentes que generan y afectan los ingresos y egresos para un proyecto determina la conveniencia o no de ejecutar el mismo (García y Jardel, 2001, Rebollar y Jaramillo, 2012).

Esta evaluación brinda las herramientas teóricas y prácticas para el diseño, preparación y valoración de proyectos, tanto privados como sociales; considerando las necesidades que buscan satisfacer los agentes económicos o los problemas que la sociedad necesita solucionar. El análisis de un proyecto se encuentra integrado por un conjunto de elementos que permiten determinar los ingresos, los costos y la inversión de un proyecto y todos aquellos factores que lo generan o alteran (García y Jardel, 2001, Rodríguez *et al.*, 2008).

En este sentido, se comparan los costos con los beneficios económicos que éstos generan, con objeto de poder tener los elementos necesarios para tomar la decisión, dependiendo de la medida en que el gasto derivado de su ejecución y operación sea compensado por la producción de los bienes y servicios que éste generará (Maza, 2001). La evaluación de un proyecto permite definir de antemano cómo se comportará económicamente la realización. A través de este análisis se puede llegar básicamente a cuatro tipos de conclusiones posibles (García y Jardel, 2001, Rebollar y Jaramillo, 2012).

1. Determinar que el proyecto no es viable y de hecho, ésta es su condición real. Si se llega a ejecutar, el proyecto no funcionará adecuadamente, tal como el análisis

del proyecto había anticipado; por lo que es mejor realizar el gasto de los honorarios del diseño en un proyecto y rechazarlo, que invertir un porcentaje superior en su ejecución y perder la inversión.

2. Determinar que el proyecto es viable, y que en realidad, lo sea. La evaluación habrá sido correcta y, por lo tanto, el proyecto puede ejecutarse.

3. Determinar que parezca viable y que en la realidad sea no viable. Esta es una conclusión errónea que puede generar graves consecuencias; por lo que no se debe forzar o ayudar proyectos para que parezcan viables.

4. Determinar que no parezca viable y en la realidad lo sea. Este caso se puede llegar a dar generalmente en los proyectos con enfoque social y es también una conclusión errónea que impida la ejecución de proyectos que pueden ser muy útiles para la sociedad.

La evaluación de proyectos incluye una evaluación financiera y una evaluación económica (Montalvo, 2001, Baca, 2010).

- La evaluación financiera contempla todos los flujos financieros del proyecto, distinguiendo entre capital propio y prestado. Esta evaluación es utilizada para determinar la capacidad financiera del proyecto y la rentabilidad del capital invertido en él.
- La evaluación económica supone que todo el capital es propio, independientemente de las fuentes de financiamiento y es utilizada para comparar los costos y beneficios económicos con objeto de emitir un juicio sobre la conveniencia de ejecutar un proyecto.

Básicamente, la diferencia entre una evaluación financiera y económica, radica en la definición de los costos y beneficios. Es decir, los costos y beneficios económicos no siempre están claramente establecidos, ya que no necesariamente constituyen erogaciones, como ocurre con los costos financieros (Montalvo, 2001, Rebollar y Jaramillo, 2012).

2.11 Evaluación Económica de Proyectos

2.11.1 Economía Ambiental

La calidad ambiental es un bien público para el cual no existe mercado. Desde el punto de vista conceptual, se reconoce que la sociedad obtiene utilidad de la calidad ambiental a través de dos fuentes de valor: valor de uso y valor de existencia. El valor de uso, directo o indirecto, se refiere a la utilidad o beneficios recibidos por el uso físico o el acceso al bien o servicio ambiental. El valor de existencia es la utilidad o beneficio recibido de un bien ambiental a través de la preservación de este bien o servicio. Ambos componentes proporcionan el valor total que la sociedad asignaría a un bien ambiental. No obstante, la ausencia de precios y el problema de que los consumidores no pueden revelar sus preferencias claramente son obstáculos para poder conocer cómo la sociedad valora un medio ambiente saludable. En el caso de que se pudiese inferir la demanda de la sociedad por la calidad ambiental, se podrían medir los beneficios asociados con cualquier política encaminada a lograr esto (Hart, 1997).

Se debe tener presente que el hecho de que un proyecto o actividad altere, significativamente el ambiente, no significa que no sea viable, ya que la viabilidad no se mide por la generación de impactos positivos o negativos sino por la capacidad del ambiente de recuperarse ya sea por medios naturales o artificiales y de los promotores de los proyectos de hacer un manejo adecuado de los impactos; de tal forma, que se pueda garantizar un nuevo equilibrio proyecto y ambiente que refleje en términos absolutos una igual o mejor calidad en las condiciones del ambiente afectado (Hart, 1997).

Saber cómo la sociedad valora un bien es difícil cuando no existen precios de mercado para este bien. Aun y cuando si el dilema de la no revelación de preferencias pudiera evitarse, los valores de bienes tales como aire limpio son difíciles de cuantificar porque tienen muchos intangibles. Aunque los economistas reconocen que algunos de estos intangibles no pueden ser medidos con exactitud, de cualquier forma éstos requieren alguna forma de conocer cómo los beneficios

de la calidad ambiental pueden ser percibidos por la sociedad. Reconocer las fuentes de valoración de la sociedad de un recurso ambiental es importante para identificar los beneficios sociales de un proyecto, por lo que la percepción de considerar a los recursos naturales como bienes libre y de oferta ilimitada ha comenzado a desaparecer y los recursos se están comenzando a ver como bienes escasos, cuyo ritmo actual de aprovechamiento podría afectar su disponibilidad y, por consiguiente, la productividad sostenida de la economía (Hart, 1997).

2.11.2 Análisis Costo-Beneficio

En términos generales, se entiende por costos y beneficios de un proyecto como todos los efectos positivos y negativos para la economía, cuando se trata de una evaluación social o para un empresario, cuando se refiere a una evaluación privada, originados por la implementación de un proyecto (Montalvo, 2001).

El costo beneficio ha sido utilizado en diferentes áreas, Cervone (2010) mencionó que el costo beneficio se relaciona con los procesos de planificación y presupuestario gubernamental. Con el tiempo ha sido aplicado para contribuir en el sector privado. En la actualidad el análisis costo beneficio se aplica para proporcionar justificación de una manera detallada los beneficios económicos de un proyecto en donde estos superen a los costos.

Un aspecto fundamental en el cálculo de costos y los beneficios de un proyecto, tanto en el enfoque social como en el privado, es que éstos deben ser marginales; es decir, únicamente se deben considerar los incrementos en los beneficios y costos que produce la alternativa considerada. De igual forma, un análisis económico se basa en los beneficios percibidos y los costos de la participación como beneficios y costos reales (Montalvo, 2001).

Se consideran sólo los incrementos, es decir, se calculan los beneficios y costos con la ejecución del proyecto (y de sus alternativas) y los beneficios y costos sin la ejecución del proyecto, utilizándose en la evaluación económica y financiera la diferencia entre ambos escenarios. Sin embargo, es importante aclarar que, en

ocasiones, dichos costos y beneficios marginales son difíciles o imposibles de calcular en términos monetarios; pero deben considerarse (Montalvo, 2001, Baca, 2010).

El análisis de factibilidad económica de la propuesta se lleva a cabo mediante un análisis económico breve y sencillo, el cual consiste en la obtención del Valor Presente Neto (VPN) y de la Tasa Interna de Retorno (TIR).

2.11.3 El valor Presente Neto

Este método consiste en determinar la suma de los valores actuales de los futuros ingresos netos y la de los desembolsos netos anuales previstos. Si la primera es mayor que la suma de los valores actuales de los desembolsos, la alternativa será atractiva y el valor presente neto correspondiente será positivo. La alternativa será tanto más deseable cuanto mayor sea su valor presente neto (Ross S. A., Westerfield R.W., Jaffe J. F. 2009).

Para aplicar este método, se atribuye signo negativo a las salidas netas de baja, y signo positivo a las entradas netas de caja; se multiplican los movimientos netos de la caja de cada año por los factores de actualización correspondientes y los productos obtenidos se suman algebraicamente (Ross S. A *et al.*, 2009).

Los factores de actualización dependen del tipo de interés, el VPN de un proyecto depende también del tipo de interés. No existe un valor presente único, es posible definir un tipo de interés o de descuento apropiado para aplicar el método; ese tipo de descuento está relacionado con:

- a) El costo de oportunidad del capital en ausencia de riesgos, es decir, la máxima tasa de interés bancaria a largo plazo.
- b) La TREMA, que es la tasa de rendimiento mínima esperada por los inversionistas una vez considerado el riesgo del proyecto.
- c) La tasa de oportunidad de la empresa, que es la tasa de rendimiento que obtienen los inversionistas en proyectos parecidos.

d) La tasa que equivale al costo del capital, la cual es la tasa pactada para el financiamiento a mediano o largo plazo. Esa tasa sirve para comprobar la rentabilidad del proyecto.

El que este método puede generar clasificaciones distintas de algunas alternativas, para diferentes tipos de interés, significa que en ciertas situaciones pueden extraerse conclusiones erróneas (Ross S. A *et al.*, 2009).

El VPN representa la cantidad máxima que una empresa estaría dispuesta a pagar a cambio de realizar un proyecto en ausencia de riesgos; también representa la cantidad mínima por la que una empresa cedería a terceros sus derechos sobre un proyecto.

$$VPN = \frac{Fne}{(1 + I)^n} - I_0$$

Donde:

- VPN denota el Valor Presente Neto del proyecto en unidades monetarias.
- Fne representa el flujo neto de efectivo en un determinado tiempo
- I representa la tasa de rendimiento esperada.
- N representa la vida útil del proyecto.
- I₀ representa el monto de la inversión total inicial.

Cuando el VPN >0; significa que la inversión produce ganancias por encima de la rentabilidad exigida.

Cuando el VPN <0; significa que la inversión no produce ganancias por encima de la rentabilidad exigida.

Cuando el VPN=0

Ventajas: El VPN indica de manera clara la realización de un proyecto; permite seleccionar proyectos con mayores beneficios que otros.

Desventajas: Presenta dificultad para determinar adecuadamente la tasa a utilizar.

2.11.4 La Tasa Interna de Rendimiento

Es una herramienta muy útil, ya que genera un valor cuantitativo a través del cual es posible saber si un proyecto es viable o no, considerando otras alternativas de inversión que podrían ser más cómodas y seguras (Mokate, 2004).

La TIR transforma la rentabilidad de la empresa en un porcentaje o tasa de rentabilidad, el cual es comparable a las tasas de rentabilidad de una inversión de bajo riesgo, y de esta forma permite saber cuál de las alternativas es más rentable. Si la rentabilidad del proyecto es menor, no es conveniente invertir (Mokate, 2004).

Para realizar el análisis de viabilidad de la empresa, la tasa de rendimiento interno debe ser comparada con una “tasa mínima de corte”, que representa el costo de oportunidad de la inversión. Se trata de dos porcentajes que pueden ser comparados de forma directa, y el que sea mayor, representará entonces una mayor rentabilidad (Van Horne y Wachowicz Jr, 2010).

De esta forma, se puede realizar una comparación simple entre ambos porcentajes y de acuerdo a esta comparación se determina si el proyecto se debe o no se debe llevar a cabo. El análisis de la TIR es el siguiente, donde r es el costo de oportunidad:

Si $TIR > r$ entonces se rechazará el proyecto. La razón es que el proyecto da una rentabilidad mayor que la rentabilidad mínima requerida (el costo de oportunidad)

Si $TIR < r$ entonces se aprobará el proyecto. La razón es que el proyecto da una rentabilidad menor que la rentabilidad mínima requerida.

La ecuación con la que se calcula es la siguiente:

$$TIR = \frac{Fne}{(1 + I)^n} = 0$$

Dónde:

VPN= Valor Presente Neto

F_{ne}= Flujo neto de efectivo

TIR= Tasa Interna de Retorno

N= año

Es importante tener en cuenta que la TIR se basa en estimaciones de rendimiento futuro, las cuales pueden variar en el tiempo. Un proyecto depende de muchos factores, como el precio de los insumos, disrupciones tecnológicas, la gestión interna y muchos otros (Mokate, 2004).

Otro problema es que en el caso de empresas que tengan flujos de caja que varíen entre números negativos y números positivos entre un periodo y otro, la fórmula de la TIR pierde su precisión. En estos casos se puede recurrir a una fórmula ajustada de la TIR (Mokate, 2004).

2.11.5 Valoración económica de costos y beneficios

En términos generales, se entiende por costos y beneficios de un proyecto como todos los efectos positivos y negativos para la economía, cuando se trata de una evaluación social o, para un empresario, cuando se refiere a una evaluación privada, originados por la implementación de un proyecto. Un aspecto fundamental en el cálculo de costos y los beneficios de un proyecto, tanto en el enfoque social como en el privado, es que éstos deben ser marginales; es decir, únicamente se deben considerar los incrementos en los beneficios y costos que produce la alternativa considerada (Montalvo, 2001).

Se consideran sólo los incrementos, es decir, se calculan los beneficios y costos con la ejecución del proyecto (y de sus alternativas) y los beneficios y costos sin la

ejecución del proyecto, utilizándose en la evaluación económica y financiera la diferencia entre ambos escenarios Sin embargo, es importante aclarar que, en ocasiones, dichos costos y beneficios marginales son difíciles o imposibles de calcular en términos monetarios; pero aun así deben considerarse (Montalvo, 2001).

En el sentido estricto del punto de vista financiero, el costo es el valor real que se distribuye por el uso o adquisición de un bien o servicio y el beneficio es el ingreso total menos los costos que pueden atribuirse a los bienes o servicios vendidos (Montalvo, 2001). Sin embargo; cuando no es posible medir un costo o un beneficio financieramente, puede hacerse desde el punto de vista económico o social, es decir (Montalvo, 2001):

- Los costos y beneficios financieros son aquellos que sus valores corresponden a egresos o ingresos efectivos.
- Los costos económicos se refieren a los valores que se dejan de obtener al optar por una u otra alternativa, es decir, el costo de oportunidad.
- Los beneficios económicos se refieren a la diferencia entre los ingresos derivados de las ventas y el costo total de oportunidad de los recursos utilizados para producir los bienes y servicios
- Los costos y beneficios sociales son aquellos que consideran las externalidades negativas o positivas que produce un proyecto y cuyos precios de mercado han sido corregidos.

1) Clasificación de costos y beneficios

A su vez, los costos y beneficios de un proyecto pueden ser tangibles e intangibles y éstos, a su vez, pueden ser directos o indirectos (Montalvo, 2001).

a) Clasificación de los costos

Los costos pueden dividirse, a su vez, en directos, asociados, indirectos e intangibles, tal y como se describe a continuación:

Costos directos. Los costos directos son todos aquellos bienes y servicios que deben utilizarse para constituir y operar el proyecto. Éstos se agrupan en costos de inversión, que se dan generalmente al inicio del proyecto y costos de operación y mantenimiento, que se dan generalmente en forma periódica y que incluyen los costos de reposición, debido a que éstos se dan en determinados momentos de la vida útil del proyecto (Maza,2001).

Costos asociados. Los costos asociados son aquellos en los que deben incurrir los beneficiarios directos de un proyecto para lograr el valor pleno de los beneficios (por ejemplo, conexiones del drenaje en proyecto de alcantarillado) (Maza, 2001).

Costos indirectos. Los costos indirectos son aquéllos involucrados en la generación de beneficios indirectos y generalmente, éstos se tratan de externalidades (Maza, 2001).

Costos intangibles. Los costos intangibles son aquéllos que no pueden ser valorados adecuadamente en términos monetarios (Maza, 2001).

b) Clasificación de los beneficios

Por su parte, los beneficios se clasifican en directos e intangibles, tal y como se describe a continuación:

Beneficios directos. Los beneficios directos son la cantidad total de bienes y servicios que estarán a disposición de los consumidores debido a la ejecución de un proyecto (Maza, 2001).

Beneficios indirectos. Los beneficios indirectos son aquellos que provienen indirectamente o son inducidos por el proyecto. A pesar que este tipo de beneficios no provienen de las actividades específicas del proyecto, deben ser atribuidos al mismo con base en el criterio general de identificación de beneficios. Es decir, este criterio recomienda incluir todos los aspectos que se producirán debido a la ejecución y operación del proyecto y que no se producirían si éste no se emprende (Maza, 2001).

Beneficios intangibles. Los beneficios intangibles son aquellos que no son susceptibles de una valoración económica adecuada, ya sea por la naturaleza de los bienes o servicios producidos o por la dificultad para cuantificar su valor (Maza, 2001). A continuación se presenta en la Tabla 21 la clasificación de los costos y beneficios.

Tabla 21. Clasificación de Costos y Beneficios.

Costos y Beneficios	
Costos y Beneficios Tangibles	
Los beneficios y costos tangibles son aquellos que pueden ser cuantificados económica y financieramente.	
Directos	Indirectos
Los costos tangibles directos representan los recursos expresados en términos monetarios necesarios para la obtención del flujo de costos del proyecto o generados directamente por el proyecto. Estos costos tangibles directos pueden ser clasificados como inversiones (conjunto de bienes y servicios que se adquieren); y gastos (erogaciones necesarias para el funcionamiento y mantenimiento de un proyecto).	Los costos tangibles indirectos están constituidos por las repercusiones negativas que puede generar el proyecto. Por lo general la cuantificación de estos costos es difícil, por lo que la evaluación económica se restringe a la estimación de costos tangibles directos. Cuando sea posible cuantificarlo, es importante su inclusión en la evaluación.
Los beneficios tangibles directos se definen como los beneficios inmediatos del proyecto, es decir los ingresos que se tendrán por la ejecución del proyecto.	Los beneficios tangibles indirectos representan las repercusiones positivas que puede generar el proyecto. Por lo general, la cuantificación de estos beneficios es difícil y evaluación económica se restringe a la estimación de beneficios tangibles directos. Cuando sea posible cuantificarlos, es importante su inclusión en la evaluación.

Fuente: Maza, 2001.

Continuación tabla 21. Clasificación de Costos y Beneficios.

Costos y Beneficios Intangibles
Los beneficios y costos intangibles son aquellos a los que no se les puede dar valor económico como por ejemplo, biodiversidad en determinado ecosistema. Aunque no pueden ser cuantificables, de existir, deberán ser mencionados cualitativamente en la evaluación.

Fuente: Maza, 2001.

2.11.6 Tipos de valor de recursos ambientales

El valor económico y el valor intrínseco de un recurso natural representan el valor económico total (VET), el cual abarca los valores que son monetarizables y los que no lo son; es decir, comprende los valores de uso y los valores de no uso (Leal, 2000). En este sentido el VET permite incluir, tanto los bienes y servicios tangibles, como las funciones del medio ambiente y los valores asociados al uso del recurso mismo (Barzev, Herlant y Pérez, 2000). En la Figura 16 se puede observar la composición del VET.

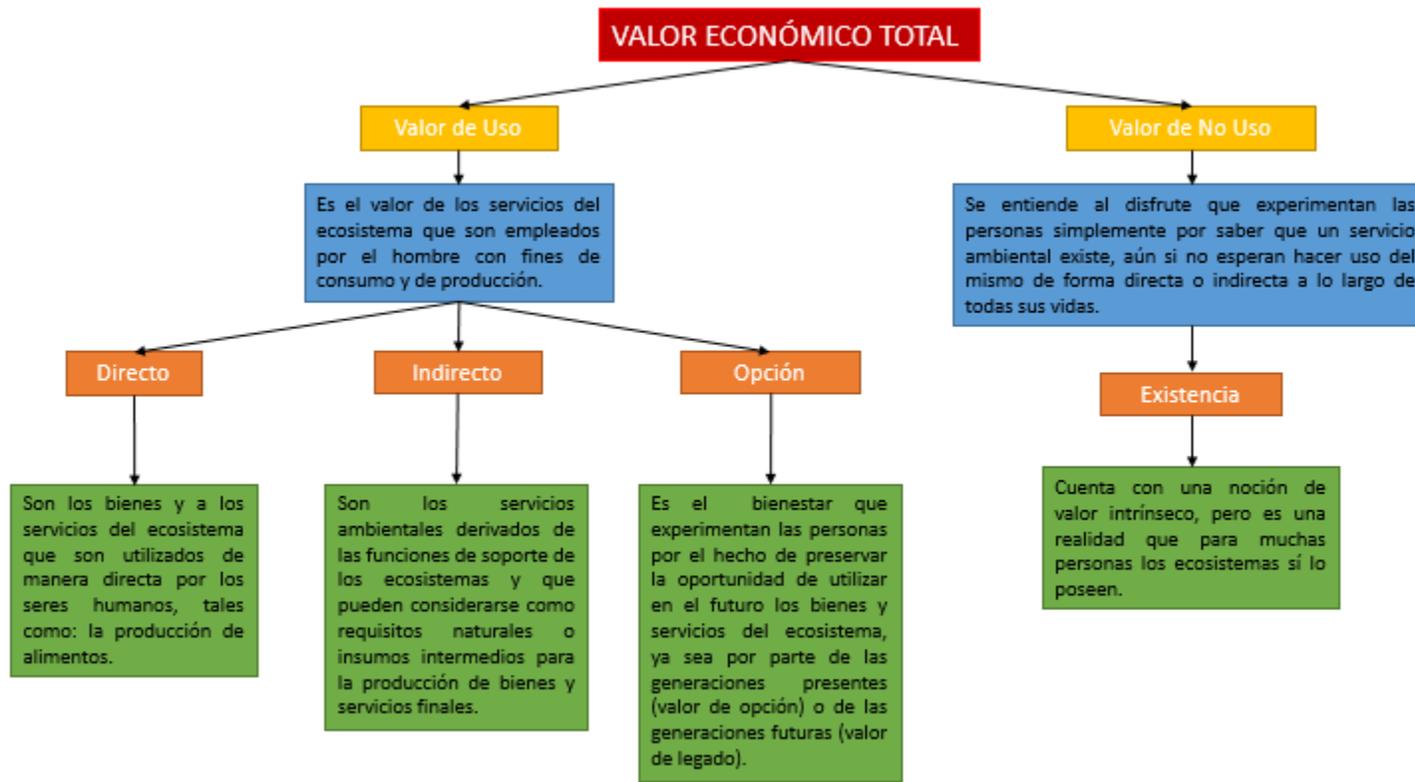


Figura 16. Composición del VET.
Elaborado con base en Cristeche y Penna, 2008.

2.12 Descripción de la zona de estudio

El área de estudio se localiza en la Región hidrológica 18 Balsas, así como en la región hidrológica administrativa XIII (RHA XIII), dentro de la cuenca Río Cutzamala, en la subcuenca Tilostoc en la microcuenca Amanalco-Valle de Bravo, como se muestra en la Figura 17 (CONAGUA, 2016c).



Figura 17. Área de estudio.
Fuente: Martínez-Macedo, 2017.

2.13 Clima

Predomina el clima templado subhúmedo, la temperatura media anual es de 13.4°C, con una máxima de 29.7°C y una mínima de 0.5°C. Según la estación de Amanalco la temporada más helada se registra de Noviembre a Abril. La precipitación pluvial promedio es de 1,155.9 milímetros; en invierno se originan heladas muy intensas y en época de lluvias fuertes granizadas y vientos que soplan de occidente a oriente, en febrero y marzo los del sur; en invierno se registran algunas nevadas (Municipio de Amanalco, 2017).

2.14 Hidrografía

Hidrológicamente, el territorio de Amanalco se ubica dentro de la parte alta y media de la cuenca del Valle de Bravo y se considera como zona de recarga hídrica, ya que en el municipio existen 445 manantiales, con un gasto total de 2096 L/s y se generan anualmente un volumen de 66,101.032 L de agua según la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales; destacando por su capacidad de producción (CONAGUA, 2015b).

- Corral de Piedra (ejido de Amanalco) con 81 L/s
- Ojo de Agua (ejido de San Pedro) con 800 L/s
- El Acón (ejido de San Jerónimo) con 51.93 L/s
- El Manzano (San Lucas) con 48.51 L/s
- Agua Zarca (San Mateo) con 70 L/s
- Gachupines (San Sebastián Chico) con 34.37 L/s

La hidrografía del municipio se complementa con la presa Corral, la laguna Capilla Vieja, y dos ríos: el río Amanalco y el río Molino.

2.14.1 Precipitación

La cuenca de Valle de Bravo-Amanalco tiene una precipitación anual de 1, 155.9 milímetros. De esta cantidad el 48% se pierde por evapotranspiración, 35% se incorpora a la recarga de los mantos acuíferos subterráneos y el 17% se escurre superficialmente (Municipio de Amanalco, 2017).

2.14.2 Ríos

En la Tabla 22 y Figura 18 se describen y muestran los ríos que conforman a la cuenca Valle de Bravo-Amanalco.

Tabla 22. Ríos y características que conforman la cuenca del Vale de Bravo-Amanalco.

Río	Características
Santa Mónica	Nace en las faldas de los cerros San Agustín y Sacametate, inicialmente su dirección es hacia el este, posteriormente hacia el noroeste hasta llegar a la presa. Tiene una microcuenca de 13.22 km ² .
San Diego	Se origina en el cerro La escalerilla a 2550 msnm, con un rumbo noroeste llega a la presa. La microcuenca del río es de 40.19 km ² .
Ladera oriente de Cualtenco	La microcuenca está formada por escurrimientos de poca longitud que vierten su agua directamente a la presa. Tiene una extensión de 3.4 km ² .
Calderones o El Cerillo	Su microcuenca es de sol 2.3 km ² , en la ladera suroeste de la presa. Son escurrimientos que hacen a 2300 msnm, en las elevaciones vecinas a la presa.
Carrizal	Los escurrimientos que forman a esta microcuenca de 30.38 km ² transitan por la ladera norte del cerro de los colorines a 23000 msnm. La corriente, con rumbo norte, es pequeña y vierte sus aguas a la presa.
Los hoyos o El molino	Los escurrimientos que forman este río provienen del Cerro San Antonio a 3300 msnm. La corriente tiene una dirección suroeste, cruza el poblado llamado El naranjo, más adelante confluye con el río El temporal que nace en el cerro El Coporito. Más adelante se une con el río Alameda que desciende del cerro Piedra herrada y a lo largo de su trayectoria se unen a él, las aguas del río Ojo se origina en el cerro Trompollos. El río Chiquito se une más adelante para llegar a la presa de Valle de Bravo. La subcuenca tiene un área de 155.92 km ² . A estas subcuencas también los ríos La alameda, El fresno y Arroyo chiquito.
Amanalco	Nace en la ladera sur del cerro San Antonio, en su curso alto se le conoce como río Alto. La corriente fluye en dirección oeste, pasa por el poblado de San Bartolo y Santa María Pipiotelpec hasta llegar a la presa Valle de Bravo. La subcuenca tiene una superficie de 227.9 km ² . Las subcuencas de los ríos el Salto, Agua Bendita y la Candelaria, forman parte de esta subcuenca.
San Gaspar	La Subcuenca comprende la vertiente sur del cerro de San Gaspar y tiene una superficie de 9.71 km ² . Los escurrimientos, cortos, llegan por la ladera norte del cerro.
La Cascada	En la parte sur de la Cabera Municipal del Valle de Bravo, está constituido por escurrimientos pequeños que inician en las cimas de Monte alto. Desemboca directamente a la presa.
Las Flores	La subcuenca de este río, al noroeste de la presa de Valle de Bravo, tiene 21.62 km ² . Inicia en la ladera suroeste del cerro Los reyes (2900 msnm). Cruza el poblado de Rincón de Estrada y el Temporal. La subcuenca presenta varios escurrimientos directos a la presa, y debido a los desechos urbanos, genera mayor contaminación.

Fuente: IMTA, 2012.

Continuación. Tabla 22. Ríos y características que conforman la cuenca del Vale de Bravo-Amanalco

Río	Característica
Tiloxtoc	Se origina a 37.5 km al noroeste de Zitácuaro, aun elevación aproximada de 2700 msnm. En esta ubicación se le conoce como El ramal, que vierte a la presa Villa Victoria, a partir de este punto toma el nombre de Malacatepec.
Los Quelites	Parte de la subcuenca Temascaltepec, el río nace en Mesa de palomas, en la ladera oeste del nevado de Toluca a 3000 msnm. El río desciende con dirección suroeste, hasta la confluencia con el Arroyo colorado, a partir de la cual se llama Temascaltepec. La extensión de la subcuenca es de 12.25 km ² .
El campanario	Forma parte de la subcuenca del río Temascaltepec. Inicia a 2600 msnm en el cerro del Capulín. La subcuenca tiene extensión de 12.25 km ² .
Pinar de Osorio	Los escurrimientos que forman el río nacen en los cerros El astillero y el Pinar, 2450 msnm, y son captados por la presa Pinar Osorio. La extensión de la subcuenca de 6.33 km ² .
Los confites	Inicia en las inmediaciones de los cerros Sacametate y EL pedregal. La subcuenca tiene 9.43 km ² , en la parte sur de la zona de estudio.

Fuente: IMTA, 2012.

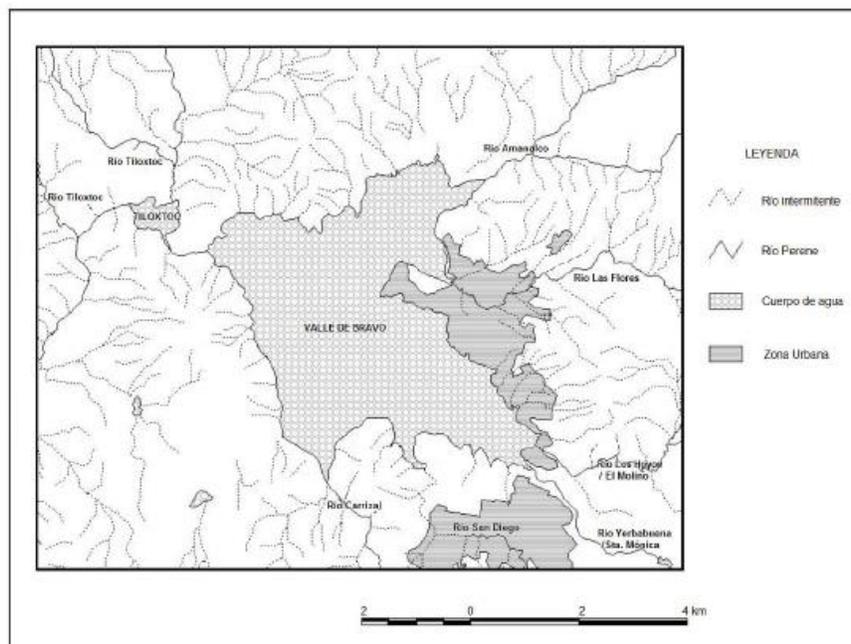


Figura 18. Ríos de la cuenca de Valle de Bravo.

Fuente: IMTA, 2012

2.14.3 Uso del suelo

El municipio de Amanalco territorialmente tiene una extensión de 219.49 km², de los cuales 120 km² es forestal (bosques y matorrales) y 90 km² en tierra agrícola, la cual el 40% es de riego y el 60% de temporada, en tanto 9.5 km² es de pastizales y uso habitacional (Municipio de Amanalco, 2017).

En tanto la agricultura toda la cuenca es llevada al cabo en las pendientes más bajas, en las llanuras, hasta en pendiente de 50%, en este último caso produciendo enormes cantidades de azolves.

Las masas forestales se encuentran dispersas en toda la cuenca, pero son dominantes en el sur y oriente de la cuenca (Municipio de Amanalco, 2017).

2.15 Marco Socioeconómico

En la cuenca del Valle de Bravo-Amanalco se cuenta conformado por ocho municipios. Donde se encuentra un 48% en el municipio de Valle de Bravo y en un 35 % en Amanalco de Becerra, en el Estado de México (Bonfil y Madrid, 2006), el resto se ubica en los municipios de Donato Guerra, Villa de Allende, Villa Victoria, Temascaltepec, Almoloya de Juárez y Zinacatepec.

El municipio de Amanalco tiene una población de 22,868 habitantes. No obstante, menciona la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, 2010), Amanalco es un municipio no urbano, ya que posee localidades con marginación alta, teniendo a la cabecera municipal con la única localidad de grado de marginación medio. En comparación con el municipio de Valle de Bravo que tiene un grado de marginación bajo.

2.15.1 Actividades económicas

EL ingreso más frecuente en la población ocupada de la cuenca es de 1 a 2 salarios mínimos y corresponde al 34.63% de la población, seguida del 26.5% de

la población que obtienen ingresos de 2 a 5 salarios mínimos. Sin embargo, el 33.8% de la población no recibe remuneración formal por su trabajo o bien, éste es menor a un salario mínimo (INEGI, 2017). En la Tabla 23 se puede observar los ingresos en la población de Valle de Bravo-Amanalco.

Tabla 23. Ingresos en la población de Valle de Bravo-Amanalco.

Municipio	Sin ingreso	1 s.m.	de 1 a 2 s.m.	de 2 a 5 s.m.	de 6 a 10	más de 10
Valle de Bravo	6.05	16.11	38.05	32.37	5.02	2.38
Amanalco	33.01	22.26	26.82	16.13	1.47	0.27
Villa de Allende	24.88	21.81	29.59	22.4	0.82	0.47
Donato Guerra	23.2	21.6	36.32	17.6	0.94	0.32
Villa Victoria	66.23	11.89	13.18	8.68	0	0

Fuente: INEGI, 2017

En Amanalco cerca del 30% de la población económicamente activa se dedica a la actividad primaria que son la agricultura y la ganadería. El principal cultivo es el maíz, seguido del frijol. En algunas localidades estos cultivos se realizan bajo riego. La ganadería es una actividad poco significativa en cuanto a volumen, debido a que hay escasas posibilidades de desarrollo de ésta; en general la producción es para auto consumo o consumo interno del municipio. En algunos casos se da el intercambio con otros municipios. También existe la actividad de explotación forestal debido a que se encuentra en una zona de bosque de especies tales como pino, cedro acahui, oyamel, entre otros. Existen otras actividades como pesca y caza (INEGI, 2017).

El sector secundario está conformado por un 26% de la población. De acuerdo con el INEGI (2017), la industria en la cuenca del Valle de Bravo, destacan las ramas de productos alimenticios, bebidas y tabaco, además de empresas dedicadas al área de cerámica y fabricación de muebles. A la construcción se dedica el 17% de la población.

El último 42 % de la población está dedicado al sector terciario. En los últimos años la actividad turística ha tomado gran fuerza y para la cuenca es un factor

económico de suma importancia, por lo cual ha clasificada como una zona de turismo de alto nivel. Trayendo consigo diferentes actividades que se pueden realizar en la cuenca, tales como deportes acuáticos, montañismo y deportes extremos, entre otras. Añadiendo a ello, algunas personas se sienten atraídas por el santuario de la mariposa monarca que se encuentra en algunas partes de la cuenca. En tanto que el sector comercial también tiene gran peso ya que en los años pasados se ha tenido un fuerte crecimiento de esta rama, a lo largo de la cuenca (INEGI, 2017).

Por otro lado, el municipio del Valle de Bravo está ocupado con 12% en el sector primario, 28% en el sector secundario y el 60% en actividades de sector terciario (INEGI, 2017).

2.16 Situación Actual en la cuenca Valle de Bravo

La cuenca Valle de Bravo, es una de las generadoras de agua más importantes de las seis cuencas que conforman el Sistema Cutzamala, el cual abastece el 40% del agua potable consumida en el área metropolitana de la Ciudad de México y Toluca. La cuenca del río Cutzamala está conformada por 7 subcuencas, cada una de ellas con una presa que recolecta el agua de la región y la transfiere al sistema (Banco Mundial, 2015).

La Cuenca presenta signos evidentes de deterioro ambiental debido al crecimiento urbano desmedido y asentamientos que no cuentan con servicios básicos.

El río Amanalco es el principal aporte a la presa Valle de Bravo, la cual es parte del Sistema Cutzamala, que provee aproximadamente el 30 % del agua a las zonas metropolitanas de la Ciudad de México y Toluca, la cual abastece a una población aproximada de 5 millones de personas. Además de la importancia en el abastecimiento de agua la cuenca presta una serie de servicios ambientales, tales como belleza escénica, hábitat de la biodiversidad (incluyendo hábitat para la mariposa monarca), captura de carbono, provisión de recursos forestales

maderables y no maderables, entre otros servicios ambientales (Banco Mundial, 2015).

Por lo que es importante atender los problemas de contaminación que el río presenta, ya que en los últimos años la presa presenta problemas de hiper-eutrofización y algunos estudios señalan que para disminuir estos problemas es necesario disminuir la contaminación de sus principales aportes (Banco Mundial, 2015).

Esta cuenca forma parte del Sistema Cutzamala, el cual es un complejo hídrico de producción, almacenamiento, conducción, potabilización y distribución de agua dulce para la población y la industria de la Ciudad de México y del Estado de México. Está integrado por siete presas derivadores y de almacenamiento, seis estaciones de bombeo y una planta potabilizadora (Banco Mundial, 2015).

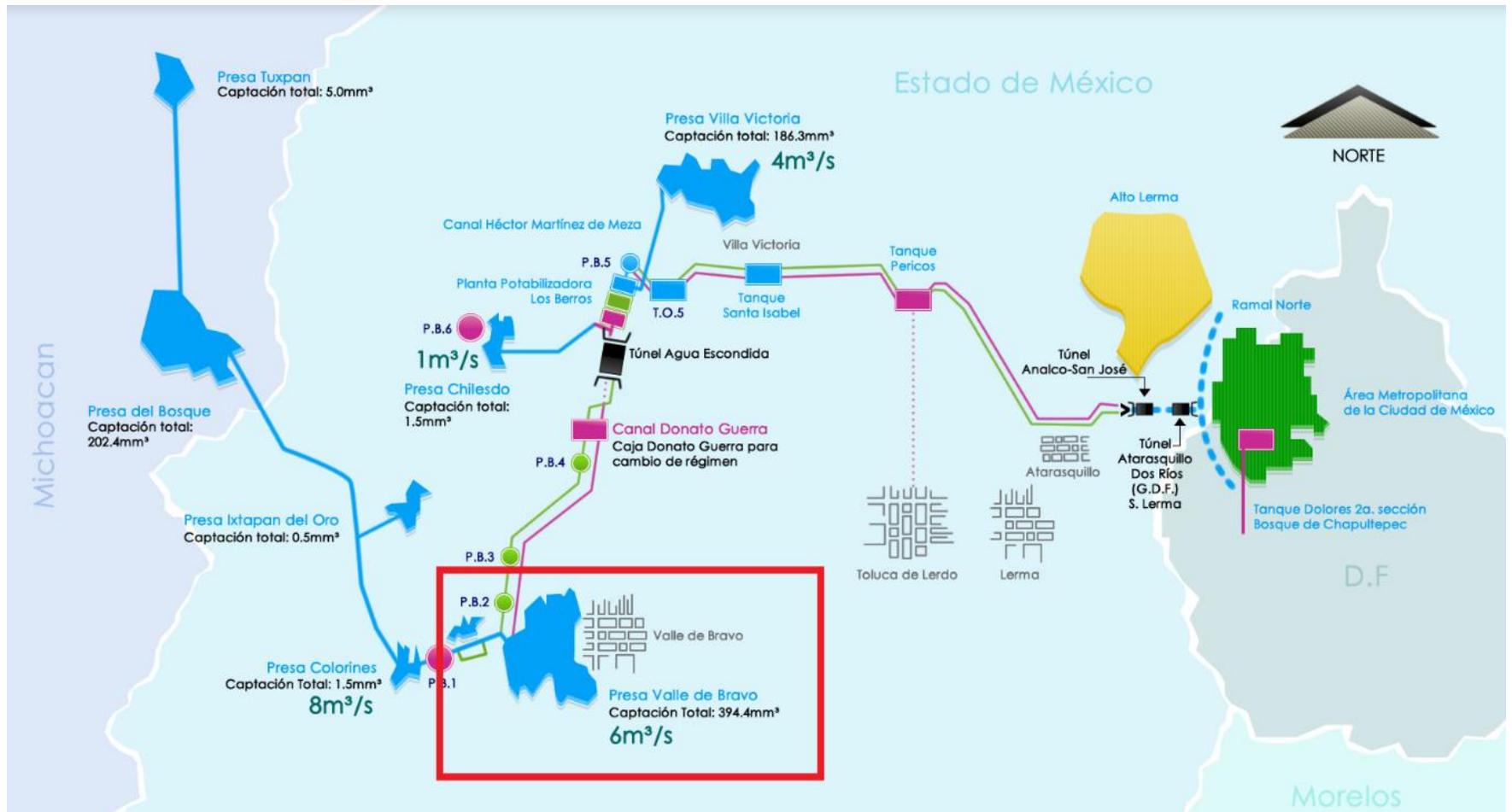


Figura 19. Esquema de sistema Cutzamala.

Fuente: CONAGUA, 2015C

2.17 Situación actual de la PTAR-LA

Con una investigación sobre la situación actual de la PTAR en Amanalco, se lograron obtener las situaciones e impactos ambientales que ésta provoca a lo largo del río. En la Figura 20 se puede apreciar la situación que se presenta, desde las descargas al río Amanalco y el mal funcionamiento que tiene la PTAR-LA. En tanto que este río, daña a las principales actividades de la comunidad que son la agricultura y la piscicultura, además de dar afectaciones a la flora y fauna que se encuentran en el sitio (Martínez-Macedo, 2017).

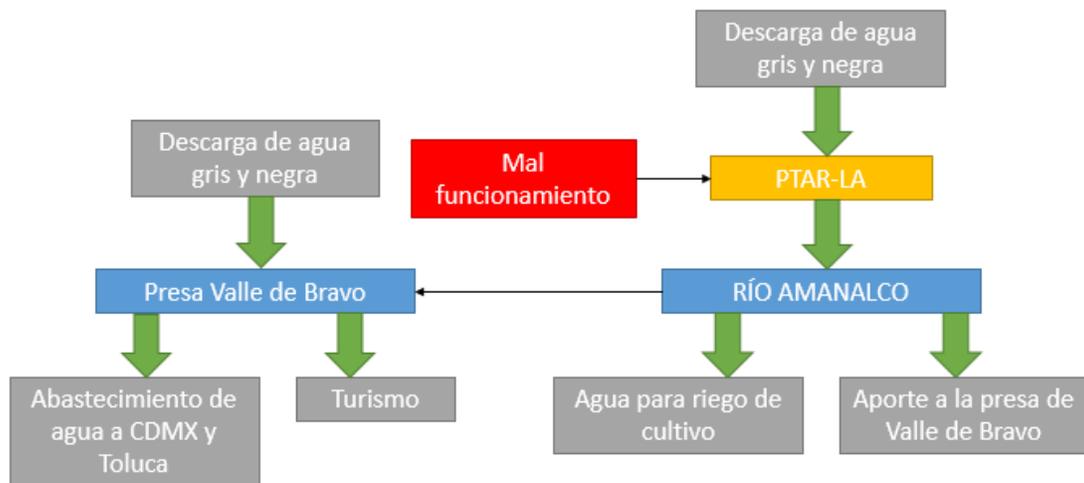


Figura 20. Situación ambiental del sitio de estudio, río Amanalco.

Fuente: Martínez-Macedo, 2017.

La PTAR-LA fue diseñada para tratar el agua residual proveniente de la cabecera municipal de Amanalco de Becerra y de la localidad de San Juan 1° sección, sin embargo, no se realizó la conexión del colector proveniente de la cabecera municipal por factores topográficos del terreno. Los colectores actualmente provocan la inundación en época de lluvias de la zona conocida como el Valle o la laguna, zona aledaña a la PTAR-LA (Martínez-Macedo, 2017).

Por otro lado, otra PTAR-LA que también vierte su efluente al río Amanalco es El arco, la cual tiene una capacidad de diseño de 150 L/s, teniendo una operación del 70% con respecto a su capacidad. Ésta trata el agua proveniente de la cabecera municipal de Valle de Bravo, junto con la PTAR-LA Amanalco abarcan el 87% de la capacidad de tratamiento instalada en la cuenca (Figura 21) (Martínez-Macedo, 2017).

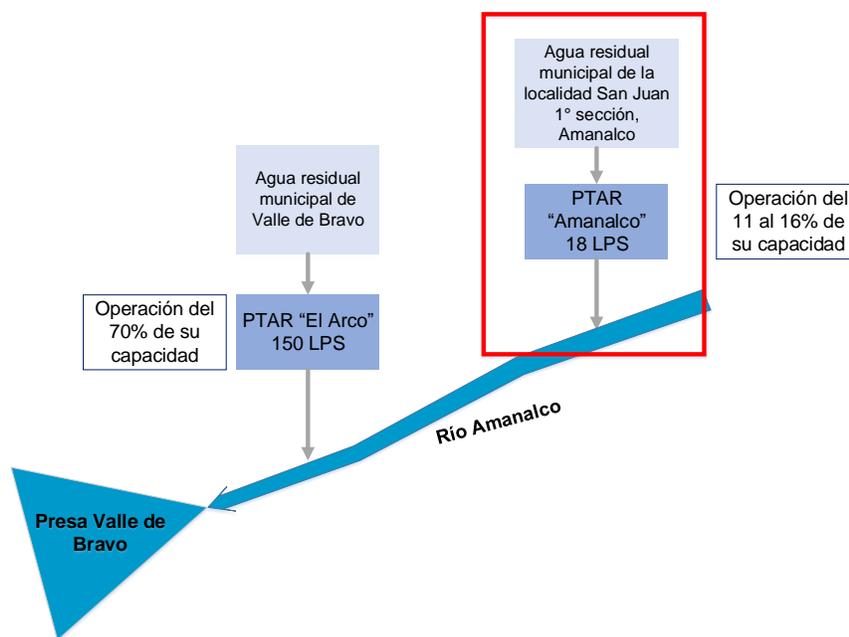


Figura 21. Esquema de flujo de agua Río Amanalco-presas Valle de Bravo.

Fuente: Martínez-Macedo, 2017.

La calidad ambiental de la cuenca se ha degradado por diversos factores, como la acelerada urbanización y nula planeación del territorio, incremento de la demanda de agua, carreteras y espacios recreativos, vedas repentinas para el aprovechamiento forestal y debilitamiento de las empresas forestales comunitarias, sustitución de técnicas agrícolas tradicionales por otras de mayor impacto ambiental y social (uso excesivo de agroquímicos, remoción de barreras vivas, uso de tractores), así como el debilitamiento de las instituciones locales a cargo del uso, acceso y manejo de los recursos naturales (Madrid, 2011).



Figura 22. Planta de tratamiento de aguas residuales de lodos activados ubicada en la cabecera municipal de Amanalco, Estado de México.

Fuente: Propia con base en Google Earth, 2017.

La PTAR de interés para la presente investigación se llama Amanalco o también se le denomina simplemente cabecera municipal, tiene una capacidad de tratamiento de 18 L/s, la tecnología que utiliza para la degradación de contaminantes es Lodos Activados (LA), inició operaciones en 2006, no se tiene certeza de cómo operó desde este año hasta su rehabilitación en 2014. La última rehabilitación general se realizó en 2016 (SAIMEX, 2017). Actualmente se opera intermitentemente, sin bitácoras de operación, por lo que resulta difícil mantener un monitoreo preciso de dicho proceso (Figura 22) (Martínez-Macedo, 2017).

Dicha PTAR-LA es operada por la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM), porque el municipio de Amanalco no tiene los recursos suficientes para operarla con regularidad.

3 Metodología

3.1 Evaluación técnica de la PTAR-LA

Para llevar a cabo el desarrollo del proyecto primero se ha dispuesto a realizar una investigación de la situación actual de la PTAR-LA. Posteriormente el realizar una evaluación técnica con respecto a su funcionamiento, con base en lo anteriormente investigado, obteniendo parámetros para la verificación cumpliendo con los criterios de calidad permisibles establecida por la NOM-001-SEMARNAT-1996 de un cuerpo receptor tipo B.

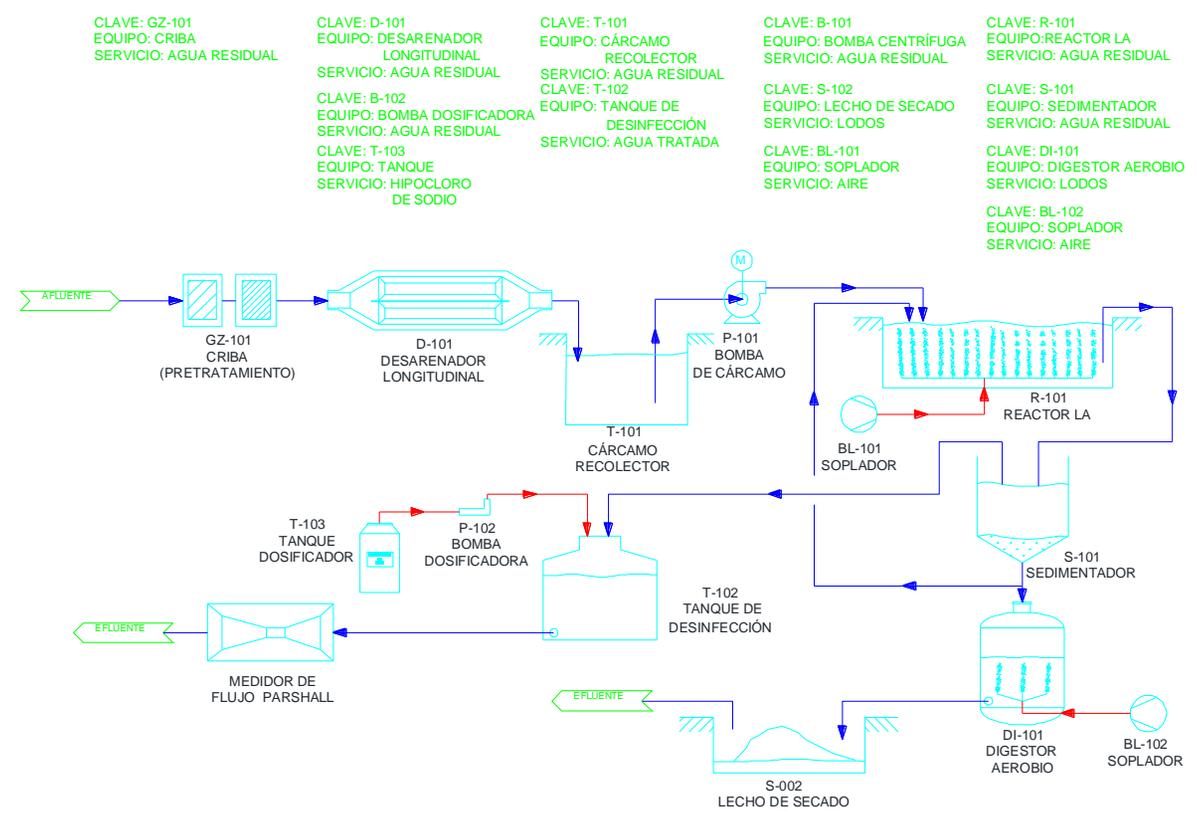
El tren de tratamiento inicia con el ingreso del agua cruda a un canal desarenador con rejillas gruesas y finas para llegar a un cárcamo de bombeo, el agua es enviada a cuatro reactores biológico de lodos activados en paralelo, seguidos de tres sedimentadores secundarios en paralelo, el agua es enviada a un tanque de desinfección con hipoclorito de sodio, el efluente se envía al río Amanalco, como se muestra en la Figura 23 (CONAGUA, 2015c).

Una parte de los lodos del sedimentador son recirculados al reactor biológico, el resto es enviado para su tratamiento a un digestor aerobio y posteriormente a un lecho de secado, el lodo seco es reutilizado en composteo.

Actualmente, la PTAR-LA de Amanalco tiene un diseño de 18 L/s, sin embargo, el agua que trata es de 2 L/s. Debido al mal funcionamiento y elevados costos para llevar a cabo el tratamiento ha provocado que las bombas encargadas de la aireación para el tanque de lodos activados no se encuentran en funcionamiento, provocando una deficiencia en la remoción de DBO_5 en el agua residual y en algunas ocasiones se encuentra sin operar la planta (CONAGUA, 2015c).

Debido a que no se cuentan con valores de concentración del influente y efluente de la PTAR-LA. Además, no se cuenta con los parámetros de remociones con los que se encuentra operando la PTAR-LA, se realizará la modelación del funcionamiento de la PTAR-LA ideal (con su capacidad de tratamiento de 18 L/s) usando los parámetros que se encuentran en la literatura.

Para llevar a cabo el proceso de diseño por etapas de la PTAR-LA, es necesario el comprender el funcionamiento y la tecnología que se emplea, por ello hay que realizar un balance de materia y verificar el cumplimiento de los parámetros de descarga según la NOM-001-SEMARNAT-1996 de la PTAR.



CLAVE: GZ-101
EQUIPO: CRIBA
SERVICIO: AGUA RESIDUAL

CLAVE: D-101
EQUIPO: DESARENADOR
LONGITUDINAL
SERVICIO: AGUA RESIDUAL

CLAVE: T-101
EQUIPO: CÁRCAMO
RECOLECTOR
SERVICIO: AGUA RESIDUAL

CLAVE: B-101
EQUIPO: BOMBA CENTRÍFUGA
SERVICIO: AGUA RESIDUAL

CLAVE: R-101
EQUIPO: REACTOR LA
SERVICIO: AGUA RESIDUAL

CLAVE: B-102
EQUIPO: BOMBA DOSIFICADORA
SERVICIO: AGUA RESIDUAL

CLAVE: T-102
EQUIPO: TANQUE DE
DESINFECCIÓN
SERVICIO: AGUA TRATADA

CLAVE: T-103
EQUIPO: TANQUE
HIPOCLORO
DE SODIO

CLAVE: S-102
EQUIPO: LECHO DE SECADO
SERVICIO: LODOS

CLAVE: S-101
EQUIPO: SEDIMENTADOR
SERVICIO: AGUA RESIDUAL

CLAVE: BL-101
EQUIPO: SOPLADOR
SERVICIO: AIRE

CLAVE: DI-101
EQUIPO: DIGESTOR AEROBIO
SERVICIO: LODOS

CLAVE: BL-102
EQUIPO: SOPLADOR
SERVICIO: AIRE

UNIVERSIDAD
NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

No.	Fecha	Revisión	Por	Vo.Bo.
A	2006/2018	Para Revisión		

Amanalco. Diagrama de flujo de proceso de la PTAR-LA

■	LAMA
■	FSGM
■	FSGM
■	VMLP
■	20/08/2018

101	MAN-OP-018	A
-----	------------	---

Figura 23. Diagrama de Flujo de Proceso de la PTAR-LA en Amalcalco.

Fuente: Propia



Figura 24. Diferentes etapas de la PTAR-LA en Amanalco.

Fuente: CONAGUA, 2015c.

Para obtener resultados del funcionamiento de la PTAR-LA se hizo una investigación de los diferentes parámetros de remoción de contaminantes que se tienen para un proceso de tratamiento de lodos activados. En la Figura 25 se muestran los diferentes parámetros que se toman para el diseño de un tratamiento de lodos activados.

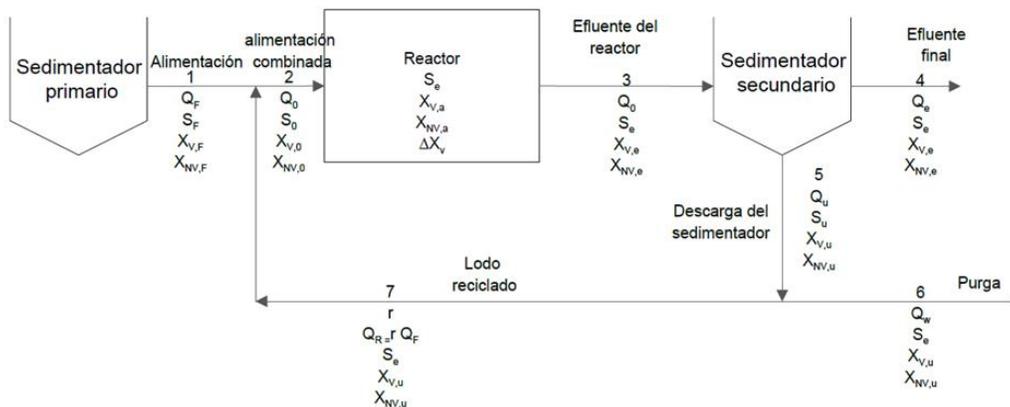


Figura 25. Diseño y funcionamiento de una planta de lodos activados.

Fuente: R. Ramalho, 2005.

Con la investigación se han obtenido los datos básicos requeridos y de criterios fundamentales para llevar a cabo la simulación por lo cual se hicieron las siguientes consideraciones tomadas de la literatura (Tabla 24):

a) Datos de alimentación inicial

Tabla 24. Datos de alimentación inicial.

Datos de alimentación inicial	
Q	18 L/s
DBO ₅	220 mg/L
SST	220 mg/L
T	17.21 °C

Fuente: Metcalf y Eddy, 1996.

Los datos utilizados para llevar a cabo el funcionamiento de la PTAR fueron tomados de Metcalf y Eddy (1996) en aguas residuales de media concentración.

b) Datos sobre la calidad del efluente

Tabla 25. Datos de calidad del efluente.

Datos de calidad del efluente	
DBO ₅	44 mg/L
SSV	0.5 mg/L
SSNV	0 mg/L

Fuente: Metcalf y Eddy, 1996.

Consultando la literatura, se han encontrado datos correspondientes a la remoción de DBO₅ por parte del tratamiento de lodos activados de 80-90%. En la Tabla 25 se observan los datos de calidad a la que se espera tener el efluente.

c) Información de funcionamiento del reactor.

Los siguientes datos fueron tomados de R. Ramalho (2005). En la Tabla 26 se tienen los parámetros de diseño y la Tabla 27 parámetros biocinéticos típicos de las aguas residuales urbanas.

Tabla 26. Parámetros de diseño de un reactor de LA y salida del sedimentador

Diseño del reactor	
SSV del reactor	200-500 mg/L
SSV del sedimentador	2500-10000 mg/L
Fracción de sólidos en el reactor (Fv)	0.8 (80%)

Fuente: R. Ramalho, 2005.

Tabla 27. Parámetros biocinéticos de aguas residuales urbanas.

Parámetros biocinéticos típicos de aguas residuales urbanas	
K	0.017-0.03 d ⁻¹ xL/mg
Y	0.73 Kg MLVSS/Kg DBO ₅
K _d	0.075 d ⁻¹

Fuente: R. Ramalho, 2005

3.2 Propuesta conceptual del acoplamiento PTAR-LA y HAFSS

Debido al mal funcionamiento que tiene la PTAR-LA, además de tener costos de operación y mantenimiento elevados, se propone llevar a cabo la incorporación de un HAFSS.

Utilizando datos que se tienen en la literatura de los diferentes parámetros de remoción de contaminantes (Tabla 28) utilizados para el diseño del humedal, como fue mencionando, por esta razón el HAFSS se encuentra en una fase conceptual.

Tabla 28. Porcentaje de remoción de diversos parámetros en HAFSS

Parámetro	Porcentaje de remoción
DBO ₅	80-90
Sólidos suspendidos totales	80-95
Nitrógeno total	15-40
Fósforo total	30-45

Fuente: Metcalf y Eddy, 1996.

Debido al mal funcionamiento de la PTAR-LA se proponen 2 alternativas conceptuales sobre el sistema de HAFSS acoplado a la PTAR de Amanalco. Las cuales son las siguientes:

Escenario 1: Utilizando la infraestructura que se encuentra en la PTAR-LA se pretende hacer uso del pretratamiento con el que se cuenta y posteriormente mandar a un sedimentador primario. Después de esto pasará a un tratamiento secundario, donde se acoplará el HAFSS (S+HAFSS). Para finalmente descargar directamente al río Amanalco buscando el cumplimiento de la normativa para un cuerpo receptor tipo B.

Escenario 2: Utilizar la infraestructura completa con la que cuenta la PTAR-LA acoplada al HAFSS (PTAR-LA+HAFSS). Posteriormente, poder descargar al río Amanalco buscando cumplir con la normativa para un cuerpo receptor tipo B.

Tras varios estudios realizados anteriormente se decidió la colocación del humedal para llevar a cabo el acoplamiento con la PTAR-LA, en la localización mostrada en la Figura 26, donde se puede observar la zona que llegará a ocupar el humedal artificial y a un lado la planta de lodos activados. Esto puede ser posible, ya que

son parte de la zona Federal. Así mismo, se presentan los posibles escenarios que se tienen para llevar a cabo el proyecto.

De acuerdo a la investigación que se realizó, se tiene por consideración poner el humedal en el sitio 1, debido a que se considera más fácil de negociar con las personas, al percibirse que son de un único dueño. Por otra parte, el sitio 2, existen múltiples comuneros que utilizan el área como agricultura de autoconsumo.

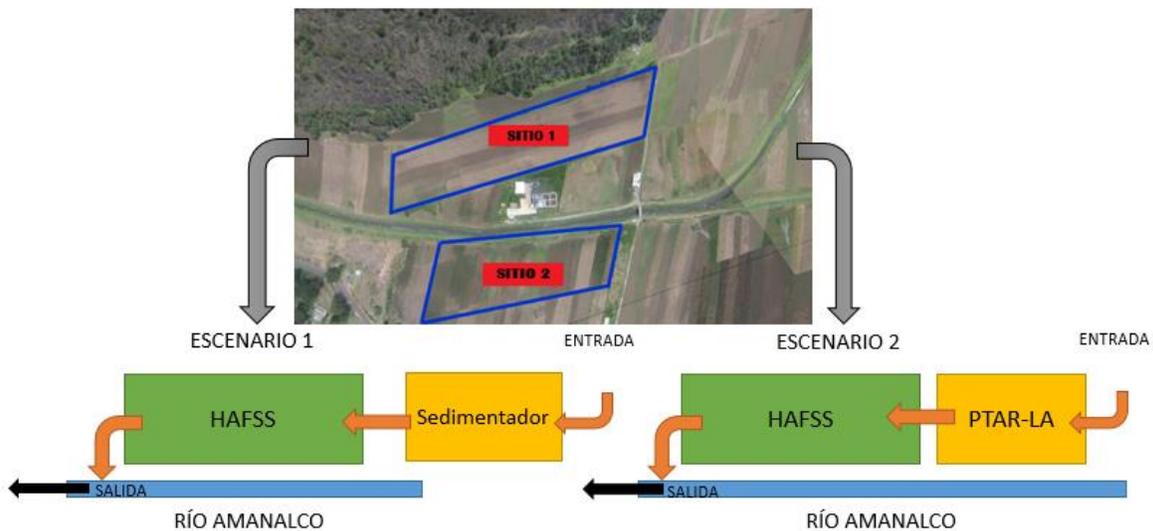


Figura 26. Sitio de la colocación y posibles escenarios del tratamiento de HAFSS en acoplamiento con la PTAR-LA.

Fuente: Elaboración propia.

Los aspectos más importantes a tener en cuenta para la construcción del HA son básicamente, la excavación, la impermeabilización de la capa superficial del terreno, la selección, el establecimiento de la vegetación, y por último las estructuras de entrada y salida (Silva, Zamora y Darío, 2005).

El diseño de un HA debe permitir que todos los procesos implicados en la depuración y el logro del rendimiento esperado, ocurran de forma adecuada en toda la masa de agua, esto es, que el escurrimiento de ésta sea lo más uniforme posible, durante el tiempo necesario y que el tiempo de recorrido de las partículas sea similar para todas ellas (Chiva, 2004).

La forma del humedal artificial debe favorecer el escurrimiento de flujo pistón. Así mismo, la distribución del agua en la entrada del sistema debe ser lo más uniforme posible (Chiva, 2004).

El escurrimiento del agua en el humedal debe ser capaz de llevarse a cabo por gravedad, aprovechando el potencial de energía natural o gradiente hidráulico disponible entre la entrada y la salida del sistema (Chiva, 2004).

3.3 Método de Evaluación económica

De acuerdo a la literatura el análisis costo beneficio de un proyecto específico, será rentable siempre y cuando la relación costo beneficio sea mayor que la unidad.

A través de la experiencia e información recopilada por el Centro de Estudios para la Preparación y Evaluación Socioeconómica de Proyectos (CEPEP, 2010) en los diversos proyectos de PTAR revisados y evaluados se lleva a cabo un análisis de costo-beneficio de la siguiente forma:

1) Situación actual

Descripción de las condiciones actuales de la zona que se desea analizar. Para realizarlo se desarrollarán la oferta y la demanda actuales, con las que se podrá determinar cuál es la problemática a resolver o si existe alguna oportunidad de negocio por aprovechar (interacción entre la oferta y la demanda).

2) Oferta actual

La manera en que se presentará la oferta actual es mediante la descripción de la infraestructura existente para tratar las aguas residuales.

3) Demanda actual

La demanda de una PTAR estará determinada por la cantidad de agua que se consume de aguas residuales tratadas.

4) Interacción oferta-demanda actual (diagnóstico de la situación actual)

Se enfoca en determinar si existe alguna de las problemáticas más comunes en este tipo de proyectos, como por ejemplo: falta de capacidad para el tratamiento total de las aguas residuales producidas, incumplimiento de la norma respecto a la calidad del agua vertida en los cuerpos receptores, bajo excedente económico respecto al potencialmente alcanzable, etc.

5) Situación con proyecto

Se presenta la o las posibles alternativas para que pueden resolver la problemática presentada anteriormente.

a) Construcción de HAFSS

b) Acoplamiento PTAR-LA con HAFSS

6) Oferta con proyecto

7) Demanda con proyecto

8) Interacción oferta-demanda con proyecto

9) Evaluación del proyecto

a. Identificación, cuantificación y valoración de los costos del proyecto

i. Costos de inversión del proyecto

ii. Mantenimiento y operación de la planta

b. Identificación, cuantificación y valoración de los beneficios del proyecto

i. Tangibles

ii. Díficil cuantificación (Intangibles)

10) Indicadores

Utilizando el VPN y TIR para poder realizar el análisis costo- beneficio para la toma de decisión del proyecto.

4 Resultados

4.1 Funcionamiento de PTAR-LA

De acuerdo a la información recopilada del Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de aguas residuales que se encuentran en operación y la evaluación de las condiciones físicas y de operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, se logró averiguar la circunstancia real en la que se encontraba la PTAR-LA. La cual, actualmente es operada por la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM), debido a que el municipio de Amanalco no cuenta con los recursos suficientes para mantener operando la planta.

Además, la PTAR-LA sólo recibe el agua residual del municipio de San Juan debido a que no se tiene la conexión con la descarga de aguas residuales del municipio de Amanalco. Por otra parte, no se tienen registros de la calidad de entrada y descarga del agua que entra en la PTAR-LA. Por tal motivo se ha decidido realizar el funcionamiento ideal de la PTAR-LA, con un flujo de 18 L/s, tal como se muestra en la Figura 27.

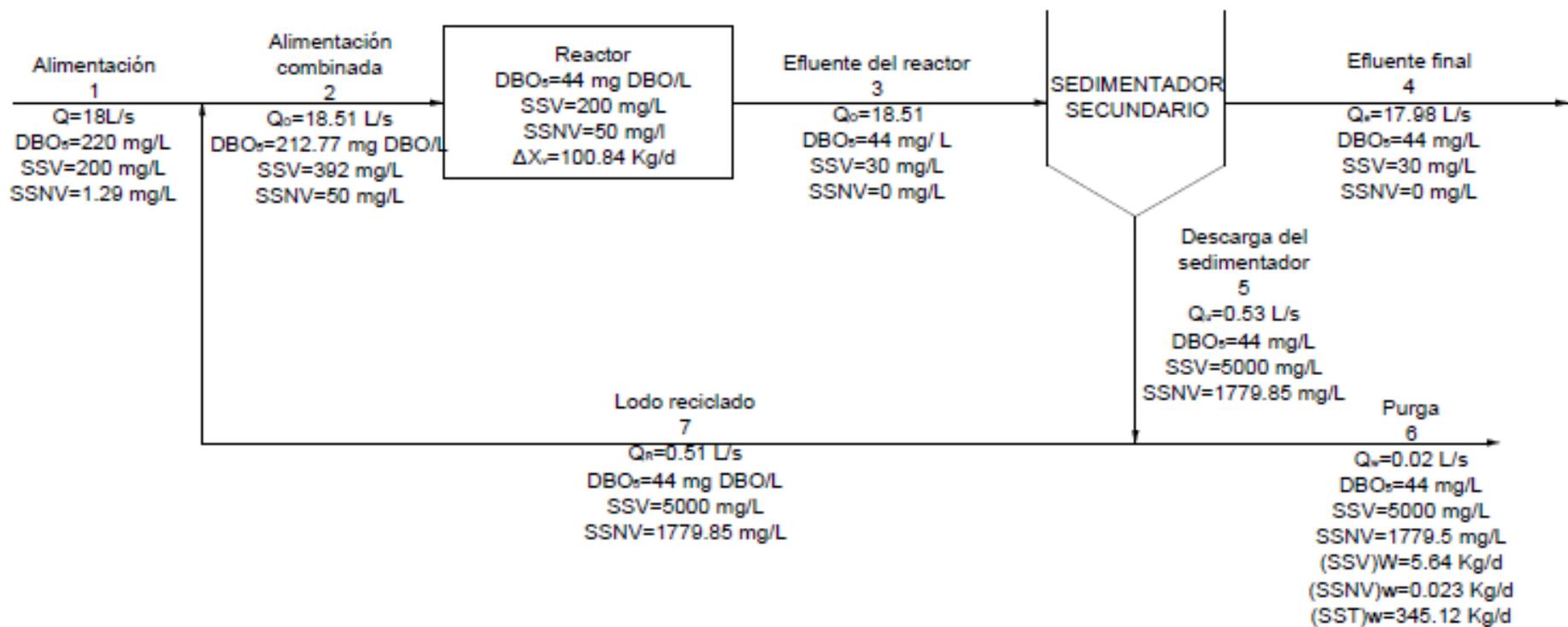


Figura 27. Diseño y funcionamiento ideal de la PTAR-LA del Municipio de Amanalco.

Con los resultados (Tabla 29) obtenidos en el balance de materia que se generó anteriormente, se hace la obtención de los parámetros del funcionamiento ideal de la PTAR-LA del Municipio de Amanalco. En la misma tabla, se muestran los valores de referencia que se deben de cumplir según la normatividad vigente.

Tabla 29. Parámetros obtenidos del funcionamiento ideal de PTAR-LA

Concepto	Valores de referencia NOM-001-SEMARNAT- 1996	Valores obtenidos de la PTAR-LA	
		AFLUENTE	EFLUENTE
DBO ₅ (mg/L)	75	220	44
SST (mg/L)	75	220	16.5
PT	20	8	7.2
NT	40	40	36
pH		7.15	7.00
T (°C)		17.2	17.0

4.2 Acoplamiento del HAFSS con la PTAR-LA

La PTAR-LA que se encuentra instalada en Amanalco cuenta con una capacidad de tratamiento de 18 L/s. En la presente propuesta se busca la incorporación de un HAFSS, la cual se encuentra compuesta de 40 módulos con capacidad de tratamiento de 5.5 L/s.

A continuación se observa la remoción de contaminantes y el funcionamiento de las dos alternativas: escenario 1 (S+HAFSS) y escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS).

4.2.1 Funcionamiento del escenario 1 (S+HAFSS)

Para la obtención de los valores, se tomaron rangos de porcentaje de remoción de los diferentes parámetros utilizados anteriormente, para poder obtener los siguientes resultados (Tabla 30):

Tabla 30. Parámetros obtenidos del escenario 1 (S+HAFSS).

Concepto	Valores de referencia NOM-001-SEMARNAT- 1996	Valores obtenidos en el funcionamiento del escenario 1 (S+HAFSS)	
		AFLUENTE	EFLUENTE
DBO ₅ (mg/L)	75	220	39.6
SST (mg/L)	75	220	17.6
PT	40	8	4
NT	20	40	12
pH	-	7.15	7.00
T (°C)	-	17.2	17.0

4.2.2 Funcionamiento del escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS)

Llevando a cabo investigación de humedales artificiales existentes que se encuentran funcionando en México y el mundo, se tomaron rangos de porcentaje de remoción de los diferentes parámetros (DBO₅, SST, PT, NT, pH, T), para poder obtener un posible funcionamiento. Posteriormente se realizó un acoplamiento con la PTAR-LA, con lo cual se obtuvieron los siguientes valores (Tabla 31):

Tabla 31. Parámetros obtenidos del escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS).

Concepto	Valores de referencia NOM-001-SEMARNAT- 1996	Valores obtenidos del funcionamiento del escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS)	
		AFLUENTE	EFLUENTE
DBO ₅ (mg/L)	75	220	8.8
SST (mg/L)	75	220	5.3
PT	20	8	3
NT	40	40	10.8
pH	-	7.15	7.00
T (°C)	-	17.2	17.0

En la Figura 28 se puede observar la remoción de los diferentes parámetros ((DBO₅, SST, PT, NT, pH, T) y comparando la PTAR-LA con los escenarios posibles para el acoplamiento del HAFSS (S+HAFSS y PTAR-LA+HAFSS).

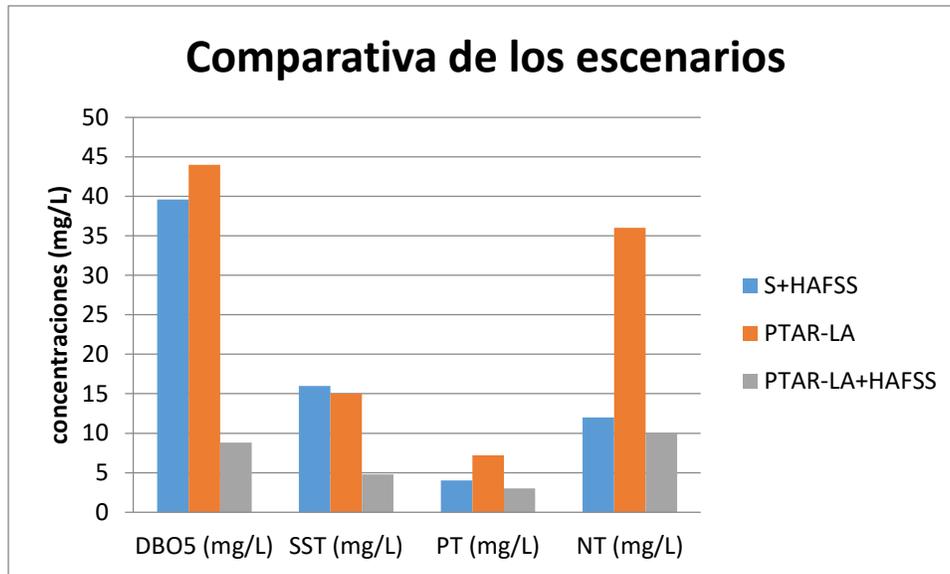
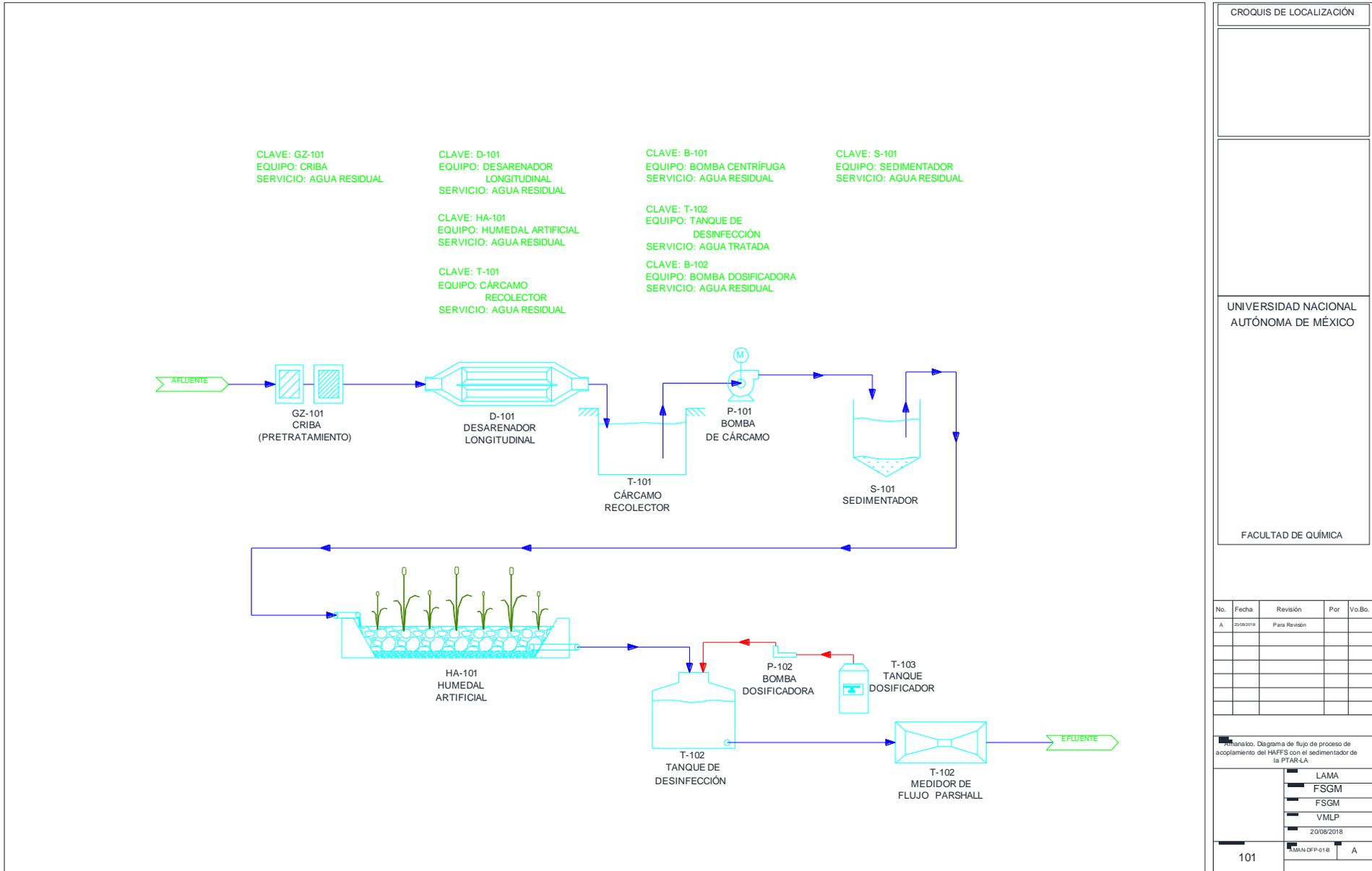


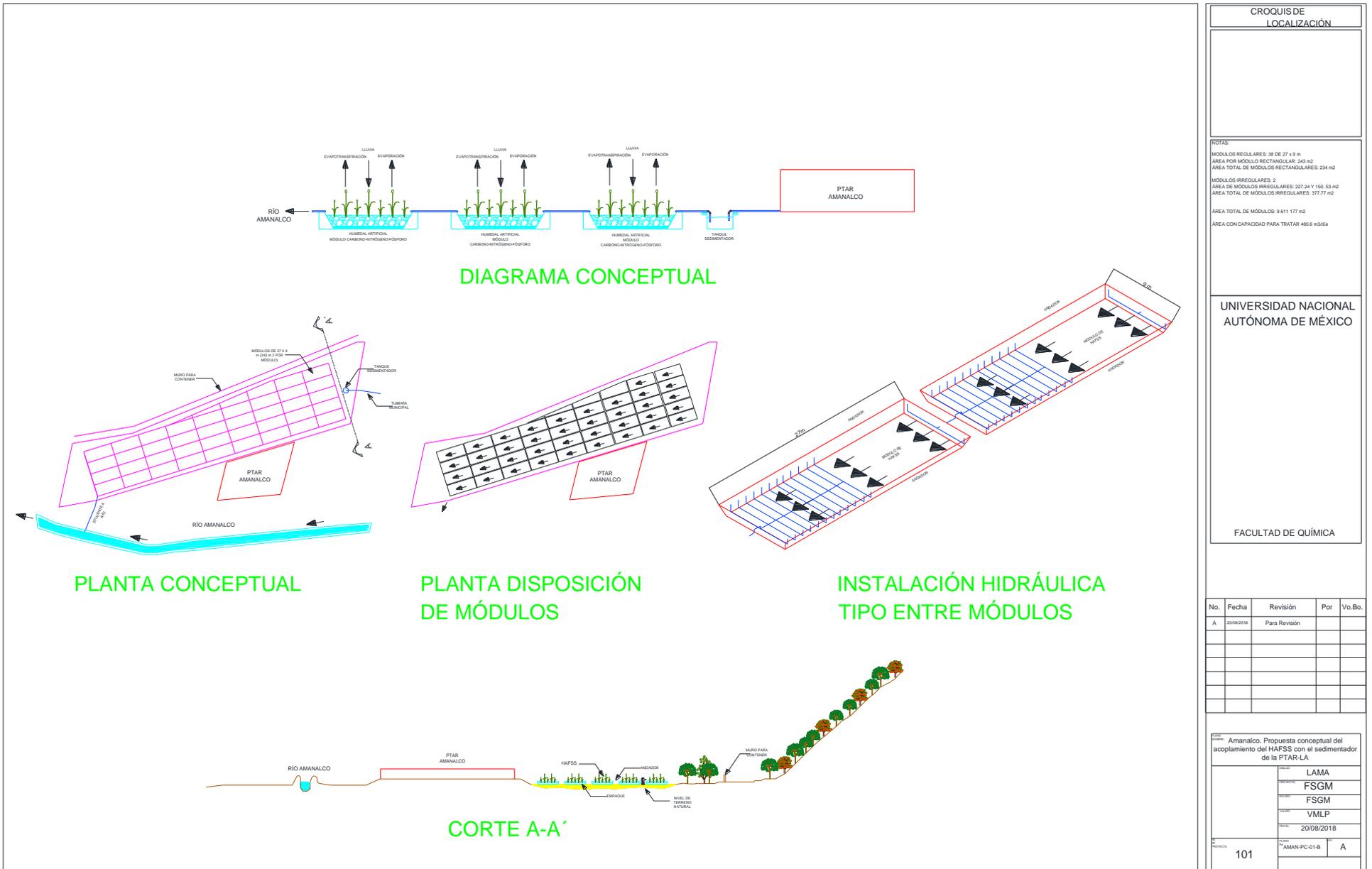
Figura 28. Comparativa de remoción de contaminantes en los diferentes escenarios

En los siguientes diagramas se puede apreciar las dos alternativas. La Figura 29 presenta el diagrama de flujo de proceso para el escenario 1 (S+HAFSS), tanto la Figura 30 es un diagrama conceptual del escenario 1. Por otra parte, la Figura 31 y la Figura 32 son el diagrama de flujo del proceso y un diagrama conceptual respectivamente del escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS).



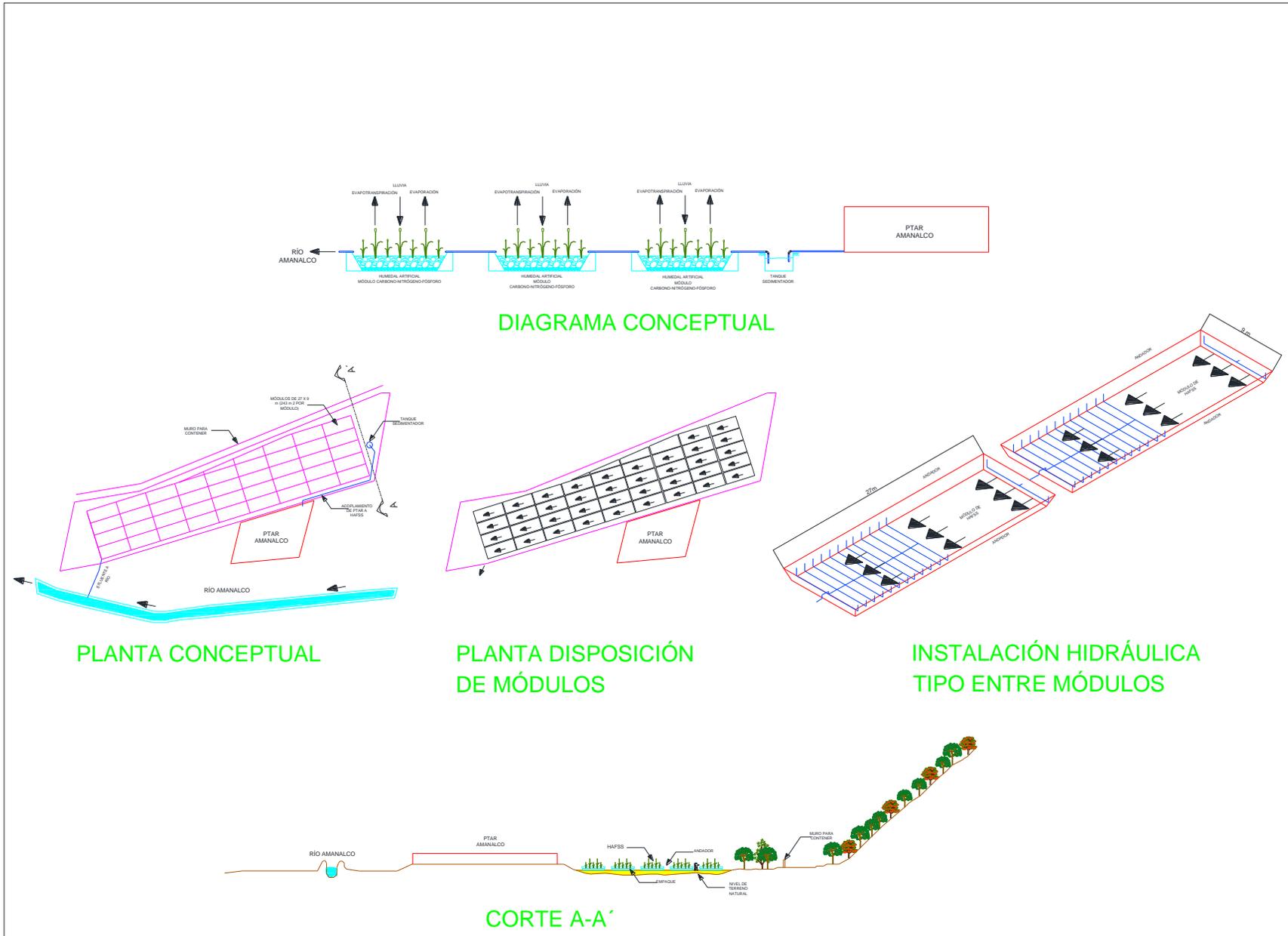
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN				
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO				
FACULTAD DE QUÍMICA				
No.	Fecha	Revisión	Por	Vo.Bo.
A	20/08/2018	Para Revisión		
<p>Manejo. Diagrama de flujo de proceso de acoplamiento del HAFSS con el sedimentador de la PTAR-LA</p> <p> <input type="checkbox"/> LAMA <input checked="" type="checkbox"/> FSGM <input type="checkbox"/> FSGM <input type="checkbox"/> VMLP 20/08/2018 </p>				
101		MANDFP-018	A	

Figura 29. Escenario 1. Diagrama de Flujo de Proceso de la propuesta conceptual del S+HAFSS.



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN				
NOTAS: MÓDULOS REGULARES: 38 DE 27 x 9 m ÁREA POR MÓDULO RECTANGULAR: 243 m ² ÁREA TOTAL DE MÓDULOS RECTANGULARES: 234 m ² MÓDULOS IRREGULARES: 2 ÁREA DE MÓDULOS IRREGULARES: 227.24 Y 150.53 m ² ÁREA TOTAL DE MÓDULOS IRREGULARES: 377.77 m ² ÁREA TOTAL DE MÓDULOS: 9 611.177 m ² ÁREA CON CAPACIDAD PARA TRATAR 480.6 m ³ /día				
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO				
FACULTAD DE QUÍMICA				
No.	Fecha	Revisión	Por	Vo.Bo.
A	20/08/2018	Para Revisión		
Aprobado: Amanalco. Propuesta conceptual del acoplamiento del HAFSS con el sedimentador de la PTAR-LA				
		LAMA		
		FSGM		
		FSGM		
		VMLP		
		20/08/2018		
		AMAN-PC-01-B	A	
101				

Figura 30. Diagrama conceptual de la propuesta del S+HAFSS.



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN					
NOTAS:					
MÓDULOS REGULARES: 38 DE 27 X 9 m					
ÁREA POR MÓDULO RECTANGULAR: 243 m ²					
ÁREA TOTAL DE MÓDULOS RECTANGULARES: 234 m ²					
MÓDULOS IRREGULARES: 2					
ÁREA DE MÓDULOS IRREGULARES: 227.24 x 1.55: 53 m ²					
ÁREA TOTAL DE MÓDULOS IRREGULARES: 377.77 m ²					
ÁREA TOTAL DE MÓDULOS: 9 611 177 m ²					
ÁREA CON CAPACIDAD PARA TRATAR 480.6 m ³ /día					
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO					
FACULTAD DE QUÍMICA					
No.	Fecha	Revisión	Por	Vo.Bo.	
A	20/08/2018	Para Revisión			
<small>PROYECTO</small> Amanalco. Propuesta conceptual del acoplamiento del HAFSS con la PTAR-LA					
<small>DISEÑO</small>	LAMA				
<small>PROYECTO</small>	FSGM				
<small>REVISOR</small>	FSGM				
<small>VALIDADOR</small>	VMMLP				
<small>FECHA</small>	20/08/2018				
<small>NO. PROYECTO</small>	101	<small>PLAN</small>	AMAN-PC-01-B	<small>BY</small>	A

Figura 32. Diagrama conceptual de la propuesta de la PTAR-LA+HAFSS.

4.3 Análisis Económico

La PTAR-LA de Amanalco tiene un diseño de 18 L/s, sin embargo, el agua que trata es de 2 L/s. Se encuentra operada por la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM). El ayuntamiento de Amanalco no tiene los suficientes recursos para mantenerla operando, debido a los altos costos que esta presenta.

Por tanto, se lleva a cabo la identificación, cuantificación y valoración de los costos actuales y de las dos alternativas presentadas en este trabajo.

4.3.1 Identificación, cuantificación y valoración de los costos actuales:

Costos de Inversión actual (PTAR-LA)

Debido a que no se logró tener acceso a la información del costo de inversión de una PTAR-LA, Mantilla-Morales *et al.* (2004) realizó un estimado con base en información recopilada sobre los costos de inversión, operación y mantenimiento de las PTAR's municipales que fueron construidas entre los años 1991 y 2002 en México. Esto dio como resultado la siguiente ecuación, para la obtención del costo de inversión de PTAR-LA para el año 2002. Esta ecuación toma como referencia el caudal, el cual debe ser lo que trata la PTAR, para este caso son 18 L/s.

$$\text{Costo de Inversión} = 1032.4 \times Q_0^{0.7633}.$$

Para llevar a cabo la actualización se tomó el Índice de Precios al Productor (INPP) del sector de construcción, debido al tipo de proyecto que se está realizando.

La obtención de resultados que se van a presentar se hace a través de la siguiente ecuación, debido a que los datos para la extrapolación se tienen años anteriores.

$$\text{Costo}_{actual} = \frac{\text{Costo}_{año} \times \text{INPP}_{2018}}{\text{ÍNPP}_{año}}$$

Donde:

INPP: Índice Nacional de Precio al Producto

Tabla 32. INPP de diferentes años requeridos para la actualización de costos.

Año	Valor INPP
2001	51.39
2004	59.32
2007	75.8
2010	87.65
2013	99.16
2016	108.08
2017	119.97
2018	128.73

Fuente: INEGI, 2018

Se colocará el costo de inversión del año en el que se hizo la construcción de la PTAR-LA y en el año 2018 (Tabla 33).

Tabla 33. Costo de Inversión de una PTAR-LA

Año	Inversión de PTAR-LA
2001 (cálculo)	\$9,375,566.08
2004 (actualización)	\$10,822,311.34
2018 (actualización)	\$23,485,437.27

Costos de operación y mantenimiento actual

Para el caso de lodos activados se tienen datos de la operación de algunas PTAR-LA en México, como se puede observar en la siguiente tabla Debido a que estos datos son del año 2013, se hace su ajuste para tenerlos en el presente año.

Para el caso de PTAR-LA se realizó una investigación del costo que se tiene en la operación y mantenimiento como se puede observar en la Tabla 34. Considerando tanto en electricidad, personal en planta, así como el destino de los lodos después de ser tratados y vertidos en su depósito correspondiente para ser llevados a su disposición final.

Tabla 34. Costos de Operación mantenimiento de una PTAR-LA

Costos de Mantenimiento y Operación	
Concepto	Subtotal anual
Eléctrico	\$19,035.32
Personal	\$ 660,000.00
Disp. De Lodos	\$37,500.00
Capacitación	\$80,000.00
Equipos	\$40,000.00
Total	\$ 836,535.32

4.3.2 Identificación, cuantificación y valoración de los costos del proyecto escenario 1 (S+HAFSS):

Costos de inversión con proyecto escenario 1 (S+HAFSS)

Para la alternativa del escenario 1 (S+HAFSS) se tienen datos obtenidos por parte de la CONAGUA, para el costo de inversión del año 2015, por lo que se realizará la actualización de su costo (Tabla 35).

Tabla 35. Costos de Inversión del escenario 1 (S+HAFSS)

Concepto	Costo 2015 (MXN)	Costo 2018 (MXN)
Acondicionamiento de terreno	\$ 21,060,432.09	\$ 26,038,315.62
Obra para afluente y efluente	\$ 820,536.32	\$ 1,014,479.83
Humedal	\$ 32,821,452.60	\$ 40,579,193.17
Total	\$ 54,702,421.00	\$ 67,631,988.62

Costos de operación mantenimiento escenario 1 (S+HAFSS)

En la alternativa del humedal se tiene la operación y mantenimiento del escenario 1, para lo cual se requieren de actividades, como el control hidráulico y de profundidad del agua, la limpieza de las estructuras de entrada y descarga, el

corte de la hierba en bermas, la inspección de la integridad de las mismas, el manejo de la vegetación del humedal, el control de mosquitos y vectores de enfermedades (de ser necesario), y el monitoreo rutinario. En la Tabla 36, se puede observar el costo que se tiene en la operación y mantenimiento del S+HAFFS.

Tabla 36. Costo de operación y mantenimiento del escenario 1 (S+HAFSS).

Costos de Mantenimiento y Operación	
Concepto	Subtotal anual
Electricidad	\$1,153.66
Personal	\$64,000.00
Equipos	\$25,000.00
Total	\$90,153.66

4.3.3 Identificación, cuantificación y valoración de los costos del proyecto escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS):

Costos de inversión con proyecto escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS)

Para el siguiente escenario se debe de llevar a cabo la inversión del HAFSS y la obra de acoplamiento con la PTAR-LA. Tal como se muestra en la Tabla 37.

Tabla 37. Costos de Inversión del escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS).

Concepto	Costo 2018 (MXN)
Obra para Humedal	\$67,631,988.62
Obra para acoplamiento	\$2,028,959.66
Total	\$69,660,948.28

Costos de operación mantenimiento escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS).

En la Tabla 38 se muestra el costo de operación y mantenimiento del escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS).

Tabla 38. Costo de operación y mantenimiento del escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS).

Costos de Mantenimiento y Operación	
Concepto	Subtotal
Eléctrico	\$ 19,035.32
Personal	\$ 156,000.00
Lodos	\$ 13,000.00
Equipos	\$ 55,000.00
Total	\$ 243,035.32

En la Figura 33 se compara el costo de tratamiento del agua residual a lo largo del tiempo de los diferentes escenarios presentados en el trabajo.

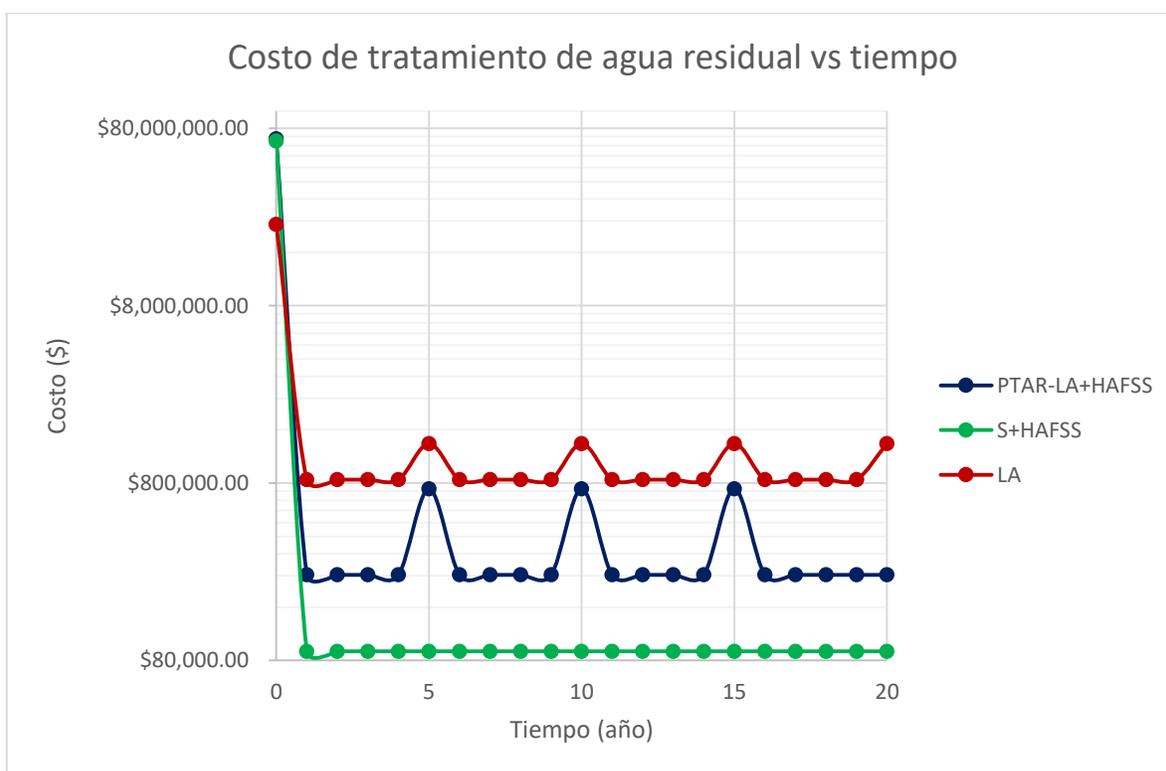


Figura 33. Costo de tratamiento de agua residual de los diferentes escenarios.

Identificación, cuantificación y valoración de los beneficios del proyecto:

Beneficios tangibles

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos en Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales “Los municipios e industrias que no cumplan con los límites máximos permisibles bajo la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 serán sancionados de forma económica”. Dando un beneficio tangible, ya que al llevar el proyecto, se tiene el cumplimiento de la norma, dando al Municipio de Amanalco la liberación de recursos.

Para determinar la cantidad de dinero a pagar por la sanción, es por medio de la medición de los parámetros de SST y DQO. Considerando el caudal que el HAFSS puede tratar (5.5 L/s) y la concentración de contaminantes presentes en el agua sin ser tratada (DQO=500 mg/L y SST=220 mg/L). Posteriormente se hace la relación para obtener la descarga anual de contaminante que se vierte en el río Amanalco de forma anual. Seguidamente se multiplica por el factor por el incumplimiento para un cuerpo receptor tipo B. Obteniendo de esa forma la cantidad a pagar de forma anual (Tabla 39).

Tabla 39. Beneficios por tratar el agua residual de Amanalco

Parámetro	Multa de contaminante trimestral (\$/kg)	Multa de contaminante anual (\$/kg)	Descarga de agua anual (m ³ /año)	Multa de descarga anual
DQO	\$ 0.0013	\$ 0.0053	86,724,000	\$ 61,371.68
SST	\$ 0.0033	\$ 0.0132	38,158,560	\$ 503,998.26
Total				\$ 965,369.94

Beneficios intangibles

Para llevar a cabo la siguiente determinación de los benéficos intangibles se decidió sepáralos en diferentes secciones de acuerdo al servicio ambiental

(Normativa, Salud, Turismo, Pesca, Reúso, entre otras) que posiblemente se puede obtener al llevar a cabo la implementación de HAFSS en cualquiera de las dos alternativas. Observado las manifestaciones de impacto que se tienen en la actualidad y como afecta de forma económica tanto al municipio como a la población de sus alrededores (Tabla 40).

Tabla 40. Resultados de los Beneficios Intangibles para la alternativa del HAFSS.

Servicio Ambiental	Manifestación de impacto	Impactos económicos	Beneficios
Normativa	Incumplimiento con normativa de cuerpo receptor tipo B.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de los costos de tratamiento para mantener o mejorar la calidad del agua. • El Municipio es incapaz de cubrir ese costo para la PTAR. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cumplimiento de la normatividad NOM-001-SEMARNAT-1996 vigente para un cuerpo receptor tipo B. • Liberación de los recursos por una buena operación en el Municipio.
Salud	<p>Daños o enfermedades:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Por contacto • Por ingestión de productos contaminados <ul style="list-style-type: none"> • Por beberla • Por Proliferación de especies vector(mosquitos: malaria, dengue, fiebre amarilla) 	<ul style="list-style-type: none"> • Gastos en médicos, medicinas y hospitales. • Días perdidos de trabajo por enfermedad. • Costo de defunción prematura y potencial productivo de personas muertas. • Gastos para el control de plagas nocivas o vector. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ahorro en costos por consumo de medicamentos. • Recuperación de días laborados, tanto por enfermedades como por muertes evitadas. • Liberación de recursos médicos, enfermeras y hospitales. • Eliminación de costos de defunción atribuibles al agua.
Turismo	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de la materia orgánica • Proliferación de especies vector <ul style="list-style-type: none"> • Mal olor • Acumulación de basura 	<ul style="list-style-type: none"> • Deterioro del paisaje con efectos en el potencial para la recreación. • Disminución del valor de los terrenos aledaños al río. 	<ul style="list-style-type: none"> • Crecimiento de explotación de la región para fines turísticos. • Aumento del valor de los terrenos.
Pesca	<p>Bioacumulación de tóxicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Morbilidad de peces y otras especies • Mortalidad de peces y otras especies • Modificación del patrón del comportamiento de los animales • Efectos en la reproducción, crecimiento y talla. <ul style="list-style-type: none"> • Efectos en hábitats de la población 	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de la calidad y la cantidad de productos alimenticios comerciales y no comerciales • Costos adicionales para mantener la producción en las granjas piscícolas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diferencia del valor de la producción en el mercado. • Enriquecimiento de la dieta familiar, con productos no comerciales. • Eliminación de costos incurridos para mantener la producción.

Continuación Tabla 40. Resultados de los Beneficios Intangibles para la alternativa del HAFSS.

Servicio Ambiental	Manifestación de impacto	Impactos económicos	Beneficios
Reúso	Contacto humano	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de los costos de tratamiento para mantener o mejorar la calidad del agua. • Requerimientos de fuentes alternas, para sustituir la fuente contaminada. <ul style="list-style-type: none"> • Uso de agua para riego 	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución en los costos de tratamiento para mantener y mejorar la calidad del agua presente en el río. • Ahorros derivados de la eliminación de fuentes alternas. • Liberación de recursos por reúso en: <ol style="list-style-type: none"> 1. Riego municipal 2. Riego agrícola
	<ul style="list-style-type: none"> • Para consumo animal <ul style="list-style-type: none"> • Morbilidad • Mortalidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Gastos en veterinarios y medicinas. • Disminución de la producción. • Pérdidas de capital pecuario • Extinción de especies salvajes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ahorro en medicinas y veterinarios. • Se evitan pérdidas de producción y conserva el capital pecuario.
En la flora de los cuerpos de agua Agotamiento o degradación	<ul style="list-style-type: none"> • Eutrofización • Proliferación de algas • Proliferación de malezas • Efectos sobre el plancton • Extinción de especies biológicas endémicas • Aumento de la evapotranspiración 	<ul style="list-style-type: none"> • Gastos incurridos para eliminar las malezas. • Pérdida de reservas de agua debido a la evapotranspiración. • Deterioro de la calidad de la presa Valle de Bravo. • Pérdida de las especies vegetales con potencial económico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ahorros de gastos para la eliminación de malezas. • Aumento en la producción de flora en la zona • Conservación de flora con potencial para su futura explotación.

Continuación Tabla 40. Resultados de los Beneficios Intangibles para la alternativa del HAFSS.

Servicio Ambiental	Manifestación de impacto	Impactos económicos	Beneficios
Agricultura Riego agrícola	<ul style="list-style-type: none"> • Efecto en la calidad del producto • Reducción de producción agrícola • Afecta a salud de los agricultores • Afecta a salud de los consumidores <ul style="list-style-type: none"> • Compactación de suelos • Pérdida de tierras fértiles 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja calidad de los productos. • Deterioro de suelos y como consecuencia la disminución de la productividad de la tierra. • Costos de reacondicionamiento del suelo. <ul style="list-style-type: none"> • Costos de salud. 	<ul style="list-style-type: none"> • Posibilidad de incorporar cultivos de riego que sean más rentables o aporten una ganancia a la comunidad. • Mejoramiento de salud a los campesinos y los consumidores (gastos médicos, medicinas y días laborales). • Se elimina o se posterga el costo de reacondicionamiento del suelo agrícola.
Efectos hacia otros cuerpos receptores y su entorno	<ul style="list-style-type: none"> • Suelos. Contaminación con sedimentos tóxicos y otros, a suelos agrícolas y de cuerpos receptores. <ul style="list-style-type: none"> • Acuíferos, contaminación y agotamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de capital natural (recursos naturales), alteración de la capacidad de sostenibilidad del medio ambiente regional. • Disminución del potencial de desarrollo regional. <p>Incremento de costos para descontaminar la presa Valle de Bravo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de los costos de la rehabilitación del río Amanalco y presa Valle de Bravo. • Crecimiento de explotación en la región para fines turísticos. • Sostenibilidad económica en la zona.

4.4 Evaluación Económica

4.4.1 Indicadores

La Tasa Social de Descuento (TSD) la cual es usada para análisis del costo-beneficio de implementar obras públicas y de protección ambiental que favorezcan a la sociedad a partir de la inversión pública. De acuerdo con la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), se tomará una tasa del 10% para llevar a cabo este proyecto. En la Tabla 41 se muestran los resultados obtenidos de la evaluación económica para los escenarios presentados en este trabajo.

Tabla 41. Resumen de resultados del Evaluación Económica.

	ESCENARIO	VAN	TIR
1	S+HAFSS	-\$60,180,782.32	-10%
2	PTAR-LA+HAFSS	-\$64,134,234.55	-12%
3	LA	-\$ 23,011,523.85	-18%

Tabla 42. Matriz de Evaluación comparativa de los diferentes escenarios

	ESCENARIOS					
	PTAR-LA (ideal)		S+HAFFS (1)		PTAR-LA+HAFSS (2)	
Flujo (L/S)	18		5.5		5.5	
COSTOS						
Inversión	\$ 23,485,437.27	A	\$ 67,631,988.62	A	\$ 69,660,948.28	A
		M		M		M
		B		B		B
Mantenimiento y Operación anual	\$ 836,535.32	A	\$ 90,153.66	A	\$ 243,035.32	A
		M		M		M
		B		B		B
Costo por metro cúbico de agua (\$/m ³)	\$ 1.70	A	\$ 0.52	A	\$ 1.40	A
		M		M		M
		B		B		B
INDICADORES	Observaciones		Observaciones		Observaciones	
Normativa	Cumple con la calidad requerida.	A	Cumple con la calidad requerida.	A	Cumple con la calidad requerida. Genera mayor remoción de los diferentes parámetros (DBO, SST, N, P).	A
		M		M		M
		B		B		B
Salud	Enfermedades presentes por plagas vector.	A	Disminución de enfermedades por contacto o proliferación de especies vector. Ahorro en: costos de medicamentos, días laborales por enfermedades y control de plagas vector.	A	Disminución de enfermedades por contacto o proliferación de especies vector. Ahorro en: costos de medicamentos, días laborales por enfermedades y control de plagas vector.	A
		M		M		M
		B		B		B
Economía (turismo, agricultura y pesca)	Baja demanda en actividades acuáticas. Disminución de la calidad y la cantidad de productos alimenticios. Costos adicionales para mantener la producción.	A	Crecimiento de explotación de la región para fines turísticos. Posibilidad de incorporación cultivos más rentables. Abundancia de peces y otras especies	A	Crecimiento de explotación de la región para fines turísticos. Posibilidad de incorporación cultivos más rentables. Abundancia de peces y otras especies.	A
		M		M		M
		B		B		B
Efectos hacia la flora, otros cuerpos receptores y entorno	Eutrofización en el Valle de Bravo. Posibilidad de extinción de especies biológicas endémicas. Suelos, contaminación con sedimentos tóxicos. Acuíferos, contaminación y agotamiento.	A	Disminución de la eutrofización. Aumento en la producción de flora en la zona. Disminución de los costos de la rehabilitación del río Amanalco y presa Valle de Bravo.	A	Disminución de la eutrofización. Aumento en la producción de flora en la zona. Disminución de los costos de rehabilitación del río Amanalco y presa Valle de Bravo.	A
		M		M		M
		B		B		B

5 Análisis y discusión de resultados

5.1 Análisis de resultados técnicos

De acuerdo al análisis técnico realizado, el escenario 1 (S+HAFSS) resulta ser la alternativa más viable debido a que se tienen los costos de operación y mantenimiento más bajos en comparación con el escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS) y la PTAR-LA. Obteniendo como resultado que el escenario 1 (S+HAFSS) cuenta con una inversión de \$67, 631,988.62, en tanto el escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS) se tiene una inversión de \$69, 660,948.28, 3% mayor que el escenario 1 (S+HAFSS) en cuanto a la inversión. En ambos casos se tiene una esperanza de vida del HAFSS de 20 años para las alternativas que se proponen.

En tanto, las dos alternativas presentadas en el trabajo ofrecen un bajo costo de mantenimiento y de operación. Mientras que el uso del escenario 1 (S+HAFSS) se tiene el menor costo de mantenimiento con \$ 90,153.66 anual, por lo que el costo por tratar un metro cúbico es de \$0.52/m³. El escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS) tiene un mantenimiento de \$ 243, 035.32 anual y su costo por tratar un metro cúbico de agua es de \$1.40/m³. En comparación de la PTAR-LA con un costo de \$ 836,535.32 anual y su costo por tratar un metro cúbico de agua es de \$1.47/m³, \$0.7 más elevado que el escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS) y \$0.95 más para el escenario 1 (S+HAFSS), lo que provoca que el municipio sea incapaz de mantener operando la planta.

Siendo así el escenario 1 el más barato, sin embargo, el escenario 2 presenta una mayor remoción de contaminantes en el agua, brindando mayores beneficios al municipio de Amanalco y disminuyendo la eutrofización presente en la presa Valle de Bravo, como se observará más adelante en el análisis ambiental.

Con los resultados obtenidos observamos que un HAFSS es amigable con el medio ambiente en comparación con otras tecnologías. Además, este tipo de tecnología brinda bajos costos de mantenimiento y operación de la planta y con tiempos de vida largos para el proyecto. No obstante, HAFSS llega a ocupar

grandes extensiones de terrenos que podrían ser usadas en otras actividades como agricultura.

5.2 Análisis de resultados económicos

De acuerdo a los resultados obtenidos en la evaluación económica realizada, la PTAR-LA tiene una pérdida económica de \$ 23, 011, 523.85 a valor actual y un rendimiento negativo de 18%, es decir, 28 puntos por debajo de la tasa de descuento social establecida por la SHCP, es decir, el rendimiento mínimo que la sociedad espera tener y que es del 10% sobre la inversión, por lo que el proyecto no alcanza la rentabilidad mínima que se pide para la inversión.

En tanto, el escenario 1 (S+HAFSS) los resultados que se obtienen al llevar a cabo la evaluación económica es un pérdida de efectivo de -\$60, 180, 782.32 a valor actual, además de presentar un rendimiento negativo de 10%, lo que implica que se encuentra 20 puntos debajo de la tasa de descuento social. En comparación con la PTAR-LA se encuentra por encima de esta por 8 puntos por arriba.

Mientras que el escenario 2 (PTAR-LA + HAFSS) se tiene una pérdida de -\$63, 511, 306.22 y un rendimiento real negativo de 12%. 2 puntos menos en comparación con el escenario 1 (S+HAFSS) y tiene 6 puntos por arriba de la PTAR-LA. Por otra parte, se tiene una pérdida de \$3, 953, 452.23 en comparación con el escenario 1.

Sin embargo, la evaluación económica no contempla todos los beneficios, es decir, no se tienen en cuenta todos los servicios ambientales que benefician a la comunidad de Amanalco, al río Amanalco, abasteciendo a la presa Valle de Bravo y este a su vez alimenta al sistema Cutzamala, siendo este el principal distribuidor y potabilizador de agua de la población e industria de la Ciudad de México y Toluca.

De este modo, con la correcta operación y mantenimiento del HAFSS (para los dos escenarios propuestos), tendrá un impacto positivo para la zona ya que el

efluente vertido al río Amanalco se cumplirá con la normativa vigente NOM-001-SEMARNAT-1996 lo que provoca una liberación de recursos del municipio en cuanto a multa anual de \$965,369.94 y operación y mantenimiento en comparación de la PTAR-LA. Además, el efluente tiene bajas concentraciones de DBO₅ y SST previniendo a las comunidades de la zona de enfermedades por entrar en contacto con el agua o el crecimiento de especies vector (mosquitos: malaria, dengue, fiebre amarilla). También se tienen bajas concentraciones de NT y PT, por esta razón, se previene el enriquecimiento de nutrientes (es decir, la eutrofización) en el río Amanalco y la presa Valle de Bravo, lo que evitaría la proliferación de microalgas las cuales pueden dañar a la flora y fauna local.

Beneficiado esta zona con el paisajismo y estética, brindando la oportunidad al crecimiento del turismo y las actividades recreativas, así como la pesca en pequeña escala no solo tiene que ver con los alimentos y los ingresos, sino también con el modo de vida de la población local.

Del mismo modo, se genera conciencia sobre las medidas para proteger los recursos ambientales: elevar la comprensión y el significado del recurso hídrico, sobre la importancia de la biodiversidad para el bienestar social, así como el rescate de la diversidad biológica y cultural.

5.3 Análisis de resultados ambientales

Con el análisis realizado en cuanto al enfoque ambiental se sabe que la PTAR-LA actualmente no se encuentra en operación debido a los altos costos que se tiene para este tratamiento, sin embargo, se hizo un estudio del caso ideal en la que la PTAR-LA funciona de forma adecuada por lo que cumple con los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 para descarga a un cuerpo receptor tipo B. Sin embargo, la remoción de contaminantes en el efluente es menor en comparación con las alternativas que se proponen con el HAFSS.

Como se ha mencionado anteriormente, las dos alternativas son viables en cuanto al cumplimiento con los límites Máximos Permisibles que establece la NOM-001-

SEMARNAT-1996. Siendo el escenario 2 (HAFSS+PTAR-LA) con el que se obtienen mayores remociones de contaminantes, en comparación del escenario 1 (HAFSS+S) y con la PTAR-LA sí tratará el agua de manera ideal.

De acuerdo a los resultados obtenidos, podemos observar que el escenario 2 (HAFSS+PTAR-LA) tiene un porcentaje de remoción elevado de DBO_5 , un efluente con 8.8 mg/L, en comparación de la PTAR-LA que tiene efluente de 44 mg/L, 5 veces mayor la carga de DBO_5 que es descargada al río Amanalco. En tanto los SST presentes en el efluente son de 4.8 mg/L, una tercera parte de lo que descarga la PTAR-LA al río (SST del efluente de 15 mg/L), lo que reduciría un posible impacto a la vida marina de la zona.

Los parámetros que se vuelven de suma importancia para la disminución de la eutrofización son: el nitrógeno y fósforo totales presentes en el agua. Para estos datos se obtuvieron 10.8 mg/L de nitrógeno total y 3.6 mg/L de fósforo presente en el efluente, en comparación de la PTAR-LA que descarga 36 mg/L de nitrógeno total, más del triple de lo que descarga PTAR-LA+HAFSS. En tanto la PTAR-LA descarga 7.2 mg/L de fósforo, que es el doble de lo que descarga la alternita antes mencionada (PTAR-LA+HAFSS). Con una alta remoción de estos parámetros ayudan a la disminución de la eutrofización que hay presente en la presa Valle de Bravo y por tanto, a reducir el deterioro del ecosistema.

Por otra parte, los resultados obtenidos del escenario 1 (HAFSS+S) se obtuvo una DBO_5 de 39.6 mg/L, cuatro veces más que el escenario 2 (HAFSS+PTAR-LA) que fue de 8.8 mg/L. En tanto, se obtuvieron 16 mg/L de SST en el efluente teniendo una remoción menor en comparación con el escenario 2 (4.8 mg/L), sin embargo, su remoción es mayor en comparación con la PTAR-LA (15 mg/L).

El nitrógeno y fósforo presente en el efluente es mayor que en el escenario 2. Se obtuvieron 12 mg/L de nitrógeno total y 4 mg/L de fósforo en el efluente 20% mayor de descargado de nitrógeno al río Amanalco y 11% mayor de fósforo, por lo que al igual que el escenario anterior, ayuda a la disminución de la eutrofización en la presa Valle de Bravo, en menor grado que el escenario 2.

6 Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

A partir de la evaluación técnica, económica y ambiental de las dos alternativas mencionadas, se concluye que es adecuado llevar a cabo la construcción del HAFSS en el municipio Amanalco acoplado con la PTAR-LA de acuerdo a las dos alternativas que se propusieron en el trabajo. El escenario 1 (S+HASFSS) tiene un costo de operación y mantenimiento bajo ($\$0.52/m^3$), lo que es viable para que el municipio pueda operarla cumpliendo con el artículo 115. En tanto, el escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS) resulta ser viable debido a las altas remociones de contaminantes presentes en el efluente (DBO₅, SST, nitrógeno y fósforo) previendo el deterioro y disminución en mayor grado de la eutrofización en la presa Valle de Bravo en comparación al escenario 1 (S+HAFSS). De igual forma, ambas alternativas cumplen con la normativa NOM-001-SEMARNAT-1996 para un cuerpo receptor que es catalogado tipo B.

Del mismo modo, se obtienen de forma indirecta beneficios de suma importancia para la población del municipio de Amanalco y sus alrededores, tales como salud, agricultura, ganadería y turismo, ya que se encuentran en contacto con el río Amanalco. Además, el agua descargada al río desemboca a la presa Valle de Bravo y aportar agua al Sistema Cutzamala, el cual suministra agua para abastecer de agua potable a la Ciudad de México y de Toluca.

A partir de la revisión documental proporcionada por la CONAGUA: Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de aguas residuales que se encuentran en operación y la evaluación de las condiciones físicas y de operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, se logró averiguar las circunstancias en las que se encontraba la PTAR-LA existente en el Municipio de Amanalco, la cual funciona de manera irregular, por lo que durante largos periodos al año se encuentra sin operar y

cuando opera la PTAR-LA sólo tiene la capacidad de tratamiento de 2 L/s. es decir, no se usa adecuadamente la infraestructura con la que cuenta la PTAR-LA.

Por otra parte, se elaboró una propuesta conceptual del acoplamiento PTAR-LA existente, con un HAFSS susceptible de ser instalado en sus inmediaciones con una capacidad de 5.5 L/s y conformado por 40 módulos, para poder descargar al río conforme la normatividad nacional aplicable. Se propusieron dos alternativas: a) HAFSS+S y b) HAFSS+PTAR-LA, en la que el escenario 1 brinda un costo de mantenimiento y operación menor ($\$0.52/m^3$) en comparación al escenario 2 ($\$1.40/m^3$). En tanto que, el escenario 2, brinda una mayor remoción de contaminantes en el efluente que descarga en río Amanalco. No obstante, ambas alternativas cumplen con la normativa NOM-001-SEMARNAT-1996 para un cuerpo receptor tipo B.

Del mismo modo, a partir de la modelación técnica-económica realizada se obtuvo que es viable realizar el acoplamiento de la PTAR-LA del municipio de Amanalco con un HAFSS, de esa manera reducir los costos de operación y mantenimiento que los que se tendrían al estar sólo operando la PTAR-LA y de esa forma poder cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-1996 para un cuerpo receptor tipo B.

Desde el aspecto económico, los indicadores que se usaron para medir la viabilidad de las dos alternativas demuestran que ninguno cumple con el criterio. Sin embargo, tomando en cuenta los servicios ambientales que brinda el llevar a cabo el acoplamiento de la PTAR-LA y el HAFSS (escenario 2) es el más adecuado, ya que beneficia tanto a la comunidad de Amanalco, brindando un punto de apoyo al crecimiento turístico en la zona, además de prevenciones de enfermedades y disminución de nutrientes promotores de eutrofización de la presa Valle de Bravo, lo que evitará la proliferación de microalgas, las cuales encarecen el tratamiento del agua de abastecimiento del Sistema Cutzamala, el cual a su vez, potabiliza y distribuye agua para la población e industria de la Ciudad de México y de Toluca.

6.2 Recomendaciones

Considerando las dos alternativas presentadas para el acoplamiento del HAFSS con la PTAR-LA, se recomienda que en el escenario 2 (PTAR-LA+HAFSS) se disminuya parcialmente la calidad de remoción de contaminantes presentes y de esa forma aumentar el volumen de agua que se puede tratar. Para ello, una opción sería disminuir el tiempo de retención hidráulico del HAFSS y el tiempo de aireación de la PTAR-LA, lo cual disminuiría el costo de operación.

Por otra parte, el esfuerzo requerido para mejorar la calidad del agua en la cuenca, debe ir orientado a potenciar las fortalezas de los actores e instituciones que intervienen en los diferentes niveles. Por ello, se recomienda el fortalecimiento de espacios de participación y coordinación entre actores como es la CAEM, CONAGUA, vecinos y organizaciones de la comunidad de Amanalco y el fortalecimiento de los lazos de confianza y mecanismos para garantizar el cumplimiento de las reglas.

De igual forma, se recomienda el uso de estas tecnologías para beneficiar a la zona por medio de ecoturismo y promuevan el uso de mejores prácticas de manejo de los recursos naturales y sensibilizar a las personas sobre este recurso valioso para la vida, además de potenciar los esfuerzos colectivos por realizar una mejor gestión del recurso hídrico. La participación permanente de los grupos de interés puede proporcionar beneficios mutuos para explorar opciones que beneficien a la comunidad y a la zona, tales como ecoturismo, talleres o etc. De esta forma promover a la sociedad sobre el manejo e importancia del recurso hídrico. Por último, para llevar a cabo la evaluación de un proyecto en el tema de tratamiento de agua, es necesario llevar a cabo una evaluación más completa, considerando los aspectos tanto costos de inversión de los proyectos a realizar, además de ello, llevar a cabo un análisis económico, en este caso los beneficios de difícil cuantificación para tener un mejor criterio de decisión para escoger el proyecto.

7 Bibliografía

Arias, C. A. y Brix, H. (2011). *Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales*. Bogotá. Colombia.

Arias, O. (2004). *Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujos subsuperficial*. Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Tesina, Barcelona.

Asano, T. (1991). *Planning and Implementation of Water Reuse Projects*. *Water Science And Technology*. 24 (9), 1-10.

Badillo Guevara L., Carvajal Arias C., Plata P.D., Fernández C. D. (2016). *Construcción y evaluación de la eficiencia de dos prototipos de humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales domésticas provenientes de la Universidad El Bosque*. Recuperado el 16 de Septiembre del 2017. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6232803.pdf>.

Banco Interamericano de Desarrollo, 2013. *Tratamiento del agua residual en México*. Recuperado el 16 de Julio del 2017. Disponible en: <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/5931/Tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20en%20M%C3%A9xico.pdf?sequence=4>.

Banco Mundial, 2015. *Diagnóstico para el manejo integral de las subcuencas Tuxpan, El Bosque, Ixtapan del Ordo, Valle de Bravo, Colorines-Chilesdo y Villa Victoria pertenecientes al Sistema Cutzamala*. Recuperado el 20 de Julio del 2017. Disponible en: <http://documentos.bancomundial.org/curated/es/309801468189248037/pdf/99219-P150092-SPANISH-WP-PUBLIC-Box393194B.pdf>.

Barzev, Radoslav, Herlant P. y Pérez C. (2000). *Pago por Servicios Ambientales: conceptos y principios. Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central (PASOLAC)*. Nicaragua.

Baca, D.G. (2010). *Evaluación de proyectos*. Sexta Edición. Ed. Mc Graw Hill. México

Bonfil H. y Madrid L. (2006). El pago por servicios ambientales en la Cuenca de Amanalco-Valle de Bravo. *Gaceta Ecológica*, núm 80. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

CCMSS. (2016). *Historia de la subcuenca del río Amanalco*. CCMSS.

CCMSS (2017a). *Diagnóstico socio-productivo de cuatro localidades del municipio de Amanalco de Becerra, Estado de México*. Amanalco, Estado de México. CCMSS.

CCMS (2017b). *En prensa-a. Caracterización de la subcuenca del río Amanalco*. México. CCMSS.

Centro de Estudios para la Preparación y Evaluación Socioeconómica de Proyectos. Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos, S.N.C. (2010). *Metodología para la evaluación socioeconómica de proyectos de construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)*. México.

Cervone, H. (2010). *Using cost benefit analysis to justify digital library projects*. OCLC Systems y Services. International digital library perspectives (pp. 76-79) Purdue University Calumet, Hammond, Indiana, USA. Emerald Group.

Chiva, J. (2004). Hidráulica y fenómenos de transporte en humedales construidos. En: García, J, Morató, J. y Bayona, J. (Eds) *Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos* (pp. 63-69).

CONAGUA. (2010). *El agua en México: cauces y encauces*. Recuperado el 23 de Agosto del 2017. Disponible en:

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/elaguaenmexico-caucesyencauces.pdf>.

CONAGUA. (2014). *Estadísticas del agua en México*. México. CDMX.: Comisión Nacional del Agua. Recuperado el 17 de Septiembre del 2017. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf>.

CONAGUA. (2015a). *Atlas del agua en México 2015*. Recuperado el 19 de Julio del 2017. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf>.

CONAGUA. (2015b). *Estadística del agua en México*. México. CDMX: Comisión Nacional del Agua. Recuperado el 18 de Septiembre del 2017. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2015.pdf>.

CONAGUA. (2015c). *Manual de operación y procedimientos 2015*. México. CDMX: Comisión Nacional del Agua. Recuperado el 18 de Septiembre del 2017. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110780/Manual_de_Operaci_n_y_Procedimiento_del_Programa_para_Marzo_20.pdf.

CONAGUA. (2016a). *Estadística del agua en México*. México. CDMX: Comisión Nacional del Agua. Recuperado el 19 de Septiembre del 2017. Disponible en: http://201.116.60.25/publicaciones/eam_2016.pdf.

CONAGUA. (2016b). *Situación del subsector de agua potable, drenaje y saneamiento*. Recuperado el 17 de Diciembre del 2017. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/184667/DSAPAS_2016_web_Parte1.pdf.

CONAGUA. (2016c). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Recuperado el 17 de Diciembre del 2017. Disponible en: <http://www.mapasconagua.net/previ.aspx?nm=SGAPDS-1-15-Libro32.pdf>.

Delgadillo, O., Camacho A., Pérez, L. y Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua. Cochabamba, Bolivia.

Diario Oficial de la Federación del Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Recuperado el 18 de Julio de 2017. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105139/Normas_Oficiales_Mexicanas.pdf.

Diario Oficial de la Federación de la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Consultado el 18 de Julio de 2017. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003.

Díaz-Cuenca, Elizabeth; Alavarado-Granados, Alejandro Rafael; Camacho-Calzada, Karina Elizabeth. (2012). *El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México*. Recuperado el 22 de Septiembre del 2017. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/401/40123894005.pdf>.

EPA. (2000). *Humedales artificiales de flujo superficial*. Recuperado el 12 de Agosto del 2017. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/cs_00_024.pdf

EPA. (2015). *A Handbook of constructed wetlands*. Recuperado el 12 de Agosto del 2017. Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/constructed-wetlands-handbook.pdf>

Esponda A. (2001). *Arranque de un sistema experimental de flujo vertical a escala piloto de tipo humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales*. Tesis de

Licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.

Hart Stuart L. (1997). *Beyond greening: Strategies for a sustainable world*. Recuperado el 27 de Enero del 2018. Disponible en: [http://info.psu.edu.sa/psu/fnm/yemelhem/psu%20courses/business%20ethics/ethics%20and%20green/Beyond%20greening-%20Strategies%20for%20a%20Sustainable%20World\[1\].pdf](http://info.psu.edu.sa/psu/fnm/yemelhem/psu%20courses/business%20ethics/ethics%20and%20green/Beyond%20greening-%20Strategies%20for%20a%20Sustainable%20World[1].pdf).

Henry J. Glynn y Heinke Gary W. (1999). *Ingeniería ambiental*. CDMX. México. Prentice Hall.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2007). *Experiencia exitosa del uso de humedales de tratamiento para la protección de la calidad del agua del lago de Pátzcuaro*. Recuperado el 15 de Noviembre del 2017. Disponible en: http://www.utzmg.edu.mx/UT/documentos/Experiencia_Cucuchucho.pdf.

Instituto Mexicano de Tecnología del agua (IMTA) (2012). *Plan estratégico para la recuperación ambiental de la Cuenca Amanalco-Valle de Bravo*. Recuperado el 21 de Enero de 2017. Disponible en: https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2014/05/Plan_cuenca_Amanalco_Valle_de_Bravo.pdf.

INEGI. (2017). *División municipal del estado de México*. Recuperado el 8 de Noviembre del 2017. Disponible en: http://cuentame.inegi.org.mx/mapas/pdf/entidades/div_municipal/mexicompios.pdf.

INEGI, (2018). *Índice Nacional de Precios Productor*. Recuperado el 18 de Febrero del 2017. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/IndicePrecios/Cuadro.aspx?nc=CA80&T=%C3%8Dndices%20de%20Precios%20al%20Productor&ST=%20INPP%20producci%C3%B3n%20total,%20por%20origen%20SCIAN%202007>.

Interapas. (2014). *Sistema de tratamiento de aguas residuales*. Consultado en Internet. Recuperado el 18 de Noviembre del 2017. Disponible en:

http://www.interapas.gob.mx/Cultura/folletos/sistema_de_tratamiento_de_aguas_residuales.pdf.

Kadlec, R.H. y Wallace. (2009). *D.S. Treatment Wetlands*. Recuperado el 13 de Agosto del 2017. Disponible en: https://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KADLEC%20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition_0.pdf.

Kivaisi, A. (2001). The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries. *Ecological Engineering*, 16, 4, 545-560.

Lara, B. J A. (1999). *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales*. Instituto Catalán de Tecnología. Universidad Politécnica de Cataluña. Master en Ingeniería y Gestión Ambiental, España.

Leal, José. (2000). *Técnicas de Valorización Económica de Impactos Ambientales*. Centro de Investigación y Planificación del Medio Ambiente - CIPMA / Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo - CIID. Montevideo, Uruguay.

Ley de Agua Nacionales, publicada el 1 de diciembre de 1992. Última reforma el 24 de marzo de 2016 en el Diarios oficial de la Federación.

Ley Federal de Derechos, publicada el 31 de diciembre de 1981. Última reforma del 23 de diciembre 2016 en el Diario Oficial de la federación.

Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, publicada el 28 de enero de 1998. Última reforma el 13 de mayo de 2016 en el Diario Oficial de la federación.

Luna Pabello, V.M., y Aburto –Castañeda, S. (2014). *Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón*. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas (pp.32-55).

Madrid, L. (2011). *Valoración de prácticas de manejo del territorio que proveen servicios ambientales hidrológicos*. México. Consejo civil Mexicano para la silvicultura sostenible (CCMSS).

Mantilla-Morales, G., Jungdorf, S., Anthony, C., Sánchez Castañeda, L. F., Cedillo, M., Luis, J. y Hansen Rodríguez, I. R. (2004). *Costo Índice de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México*. In Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS.

Martínez-Macedo J. (2017). *Factores socioeconómicos y ambientales relacionados con la implementación de humedales artificiales acoplados a la planta de tratamiento de aguas residuales de Amanalco, Estado de México*. Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.

Maza, V (2001). *Evaluación de Proyectos: Factibilidad Económico-Social*. Argentina.

Metcalf y Eddy. (1996). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. México: MacGraw Hill.

Metcalf y Eddy. (2014). *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*. Burton. Nueva York. McGraw-Hill Education.

Mokate K. M. (2004). *Evaluación Financiera de Proyectos de Inversión*. Uniandes, Colombia. Editorial Alfaomega.

Montalvo Viviana. (2001). *Evaluación de Proyectos. Guía*. Gestión Américas.

Municipio de Amanalco. (2017). *Amanalco donde el agua nace y se expande*. Recuperado el 27 de Septiembre del 2017. Disponible en: <http://amanalco.gob.mx/semblanza-de-amanalco/>.

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

Ramalho R.S. (1996). *Tratamiento de Aguas Residuales*. España. Editorial: Reverté.

Rebollar, R.S. y Jaramillo, J.M. (2012). *Evaluación de proyectos. Aspectos básicos.*, Madrid. España. Editorial Académica Española.

Reed, SC. (1993). *Subsurface Flow Constructed Wetlands For Wastewater Treatment, A Technology Assessment*. United States Environmental Protection Agency. EU.

Reed, S. y D. Brown (1992). *Constructed wetland design-The first generation. Water environment research*. Water Environment Federation, Alexandria. EU.

Rodríguez, C., Bao, G. y Cárdenas, L. (2008). *Formulación y valuación de proyectos*. CDMX. México. Editorial Limusa.

Ross S. A., Westerfield R.W., Jaffe J. F. (2009). *Finanzas Corporativas*. CDMX. México. Editorial Mc Graw Hill.

SAIMEX. (2017). Respuesta al oficio No. 80000/000580/2018

Secretaría de la Convención de Ramsar. (2013). Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención

SEDESOL. (2010). *Unidad De microrregiones*. Cédulas de información municipal.

Silva R., Ángela Sofía and Zamora Z., Hernán Darío (2005) Humedales artificiales. Pregrado thesis, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.

Van Horne J. C., Wachowicz Jr. John M. (2010). *Fundamentos de Administración Financiera*. Recuperado el 22 de Enero del 2018. Disponible en: <https://catedrafinancierags.files.wordpress.com/2014/09/fundamentos-de-administracion-financiera-13-van-horne.pdf>.

Wasser- und Abwasserzweckverband. (2007). *Humedal artificial en Silkerode, Alemania*. Recuperado el 09 de Enero del 2017. Disponible en: http://aquatecmexico.com/data/documents/Proyectos_Blumberg.pdf.

Young, T.C., A.G. Collins, T.L. Theis. (2000). *Subsurface flow wetland for wastewater treatment at Minoa, NY*. Report to NYSERDA and USEPA, Clarkson University, NY.

8 Anexos

8.1 Funcionamiento de la PTAR-LA

Para especificar el funcionamiento de la PTAR de LA es necesario llevar a cabo el siguiente procedimiento.

Los kg de DBO₅ que se consumen diariamente pueden calcularse fácilmente a partir de:

$$\frac{Kg DBO}{d} = 86.4 \times Q_F (S_F - S_e)$$

La suposición del valor preliminar de la potencia requerida puede hacerse mediante una estimación rápida que se describe a continuación. La regla de estimación rápida de la potencia requerida establece que en las plantas de lodos activos se consumen diariamente de 20 a 22 kg de DBO₅ por HP, esto es:

$$HP \approx \frac{Kg DBO / d}{(20 - 22) Kg DBO / HP \times d}$$

Consecuentemente, la estimación inicial de la potencia se obtiene a partir de:

$$HP = \frac{86.4 \times Q_F \times (S_F - S_e)}{21}$$

En los procesos típicos convencionales de lodos activos, el tiempo de residencia t se encuentra comprendido en el intervalo de 4 a 8 h. Debido a que el tiempo de residencia hidráulico (t_h) depende de la relación de reciclado, es mucho más adecuado caracterizar un proceso aerobio dado, que se lleva a cabo en un reactor continuo con reciclado, en función del tiempo de residencia t basándose exclusivamente en la alimentación inicial Q_F .

El tiempo de residencia en el reactor se calcula mediante el siguiente criterio con objeto de determinar cuál controla el diseño:

La calidad del efluente, que debe cumplir con las especificaciones impuestas por las autoridades. La calidad de efluente depende del consumo de DBO₅ soluble dado por la ecuación:

$$V = Q_F \times t$$

Donde t hace referencia al tiempo de residencia. Para ello, se cuenta con Volumen (V) de 787.5 m³.

Para una operación del sistema de lodos activados, es necesario que los microorganismos tengan la cantidad adecuada de alimento, el parámetro denominado relación alimento/microorganismo, A/M se define como:

$$\frac{A}{M} = \frac{S_F}{X_{v,a} \times t}$$

Cálculo de la relación de reciclado r aproximado, por medio de la siguiente ecuación:

$$r = \frac{X_{v,a}}{X_{v,u} - X_{v,a}}$$

Calculo de la producción neta de biomasa:

$$\Delta X_v = Y \times (S_F - S_e) \times Q_F - K_d \times X_{v,a} \times V$$

Cálculo de reciclado r, de la ecuación:

$$r = \frac{Q_F \times X_{v,a} - \Delta X_v - Q_F \times X_{v,F}}{Q_F \times (X_{v,u} - X_{v,a})}$$

Dónde: $Q_F \times X_{v,F} \approx 0$

Por tanto:

$$r = \frac{Q_F \times X_{v,a} - \Delta X_v}{X_{v,u} - X_{v,a}}$$

Cálculo de los caudales restantes:

$$Q_R = r \times Q_F$$

$$Q_o = Q_F \times (r + 1)$$

$$Q_E = Q_F - Q_w = Q_v = Q_R + Q_w$$

8.2 Resultados de Evaluación costo-beneficio

1) Resultados extendidos del Costo-Beneficio de HAFSS

Tabla 43. Resultados del escenario 1 (HAFSS).

año	Costos			Beneficios	Flujo de efectivo anual
	Inversión	operación y mantenimiento	Costos totales	Agua tratada	
0	\$67,631,989	\$ -	\$67,631,989	\$-	-\$67,631,989
1		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
2		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
3		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
4		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
5		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
6		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
7		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
8		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
9		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
10		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
11		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
12		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
13		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
14		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
15		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
16		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
17		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
18		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
19		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646
20		\$90,154	\$90,154	\$17,344,800	\$17,254,646

Tabla 44. Resultados del escenario 2 (HAFSS en acoplamiento con PTAR-LA).

año	Costos			Beneficios	Flujo de efectivo anual
	Inversión	op y Man	Costos totales	Agua tratada	
0	\$69,660,948.00	\$ -	\$69,660,948.00	\$0.00	-\$69,660,948.00
1		\$243,035.32	\$243,035.32	\$965,369.94	\$722,334.62
2		\$243,035.32	\$243,035.32	\$965,369.94	\$722,334.62
3		\$243,035.32	\$243,035.32	\$965,369.94	\$722,334.62
4		\$243,035.32	\$243,035.32	\$965,369.94	\$722,334.62
5	\$500,000.00	\$243,035.32	\$743,035.32	\$965,369.94	\$222,334.62
6		\$243,035.32	\$243,035.32	\$965,369.94	\$722,334.62
7		\$243,035.32	\$243,035.32	\$965,369.94	\$722,334.62
8		\$243,035.32	\$243,035.32	\$965,369.94	\$722,334.62
9		\$243,035.32	\$243,035.32	\$965,369.94	\$722,334.62
10	\$500,000.00	\$243,035.32	\$743,035.32	\$965,369.94	\$222,334.62
11		\$243,035.32	\$243,035.32	\$965,369.94	\$722,334.62
12		\$243,035.32	\$243,035.32	\$965,369.94	\$722,334.62
13		\$243,035.32	\$243,035.32	\$965,369.94	\$722,334.62
14		\$243,035.32	\$243,035.32	\$965,369.94	\$722,334.62
15	\$500,000.00	\$243,035.32	\$743,035.32	\$965,369.94	\$222,334.62
16		\$243,035.32	\$243,035.32	\$965,369.94	\$722,334.62
17		\$243,035.32	\$243,035.32	\$965,369.94	\$722,334.62
18		\$243,035.32	\$243,035.32	\$965,369.94	\$722,334.62
19		\$243,035.32	\$243,035.32	\$965,369.94	\$722,334.62
20		\$243,035.32	\$243,035.32	\$965,369.94	\$722,334.62

Tabla 45. Resultados de la PTAR-LA

año	Costos			Beneficios	Flujo de efectivo anual
	Inversión	op y man	Costos totales	Agua tratada	
0	\$ 23,485,437.27		\$23,485,437.27		-\$23,485,437.27
1		\$836,535.32	\$ 836,535.32	\$965,370	\$ 128,834.62
2	0	\$836,535	\$836,535	\$965,370	\$ 128,834.62
3		\$836,535	\$836,535.32	\$965,370	\$ 128,834.62
4		\$836,535	\$ 836,535.32	\$965,370	\$ 128,834.62
5	\$ 500,000.00	\$836,535	\$1,336,535.32	\$965,370	-\$ 371,165.38
6		\$836,535	\$ 836,535.32	\$965,370	\$ 128,834.62
7		\$836,535	\$ 836,535.32	\$965,370	\$ 128,834.62
8		\$836,535	\$ 836,535.32	\$965,370	\$ 128,834.62
9		\$836,535	\$ 836,535.32	\$965,370	\$ 128,834.62
10	\$ 500,000.00	\$836,535	\$ 1,336,535.32	\$965,370	-\$ 371,165.38
11		\$836,535	\$ 836,535.32	\$965,370	\$ 128,834.62
12		\$836,535	\$ 836,535.32	\$965,370	\$ 128,834.62
13		\$836,535	\$ 836,535.32	\$965,370	\$ 128,834.62
14		\$836,535	\$ 836,535.32	\$965,370	\$ 128,834.62
15	\$ 500,000.00	\$836,535	\$ 1,336,535.32	\$965,370	-\$ 371,165.38
16		\$836,535	\$ 836,535.32	\$965,370	\$ 128,834.62
17		\$836,535	\$ 836,535.32	\$965,370	\$ 128,834.62
18		\$836,535	\$ 836,535.32	\$965,370	\$ 128,834.62
19		\$836,535	\$ 836,535.32	\$965,370	\$ 128,834.62
20		\$836,535	\$ 836,535.32	\$965,370	\$ 128,834.62