

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD AGRONÓMICA DE LAS AGUAS

RESIDUALES DE LA PTAR-LA ESTANCIA

POR:

YASIEL ALFREDO ALVARADO ZUÑIGA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Buenavista, Saltillo, Coah, México.

MARZO del 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISION DE INGENIERÍA

DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD AGRONÓMICA DE LAS AGUAS
RESIDUALES DE LA PTAR-LA ESTANCIA

Por:

YASIEL ALFREDO ALVARADO ZUÑIGA

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobada por el Jurado Examinador



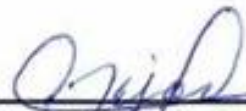
Dra. Manuela Bolívar Duarte.

Asesor Principal



M.C. Luis Edmundo Ramírez Ramos

Coasesor



M.C. Carlos Rojas Peña

Coasesor



M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coah, México.

Marzo del 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISION DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD AGRONÓMICA DE LAS AGUAS
RESIDUALES DE LA PTAR-LA ESTANCIA**

Por:

YASIEL ALFREDO ALVARADO ZUÑIGA

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dra. Manuela Bolívar Duarte.

Asesor Principal



M.C. Luis Edmundo Ramírez Ramos

Coasesor



M.C. Carlos Rojas Peña

Coasesor

Buenavista, Saltillo, Coah, México.

Marzo del 2026

DECLARATORIA DE NO PLAGIO

Declaro que el presente trabajo de investigación es original, siendo resultado de mi trabajo personal, el cual no he copiado de otro trabajo de investigación, ni utilizado ideas, fórmulas, ni citas completas, así como ilustraciones diversas, sacadas de tesis, obra, o artículo.

Caso contrario, menciono de forma clara y exacta su origen o autor, tanto en el cuerpo del texto, figuras, cuadros, tablas u otros que tengan derechos de autor.

Declaro que el trabajo de investigación que pongo en consideración para evaluación no ha sido presentado anteriormente para obtener algún grado académico o título.

Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales, por lo que asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en la tesis, así como de los derechos sobre la obra presentada.

Asimismo, me hago responsable ante la universidad o terceros, de cualquier irregularidad o daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado. De identificarse falsificación, plagio, fraude, o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, responsabilizándome por todas las cargas pecuniarias o legales que se deriven de ello sometiéndome a las normas establecidas y vigentes.

Yasiel Alfredo Alvarado Zuñiga

Agradecimientos

A mi madre por ser mi apoyo siempre en esta aventura, gracias por darme energía y ánimos cuando más lo necesitaba, a pesar de la distancia siempre te sentí presente, gracias por no dejar que me diera por vencido. A mis hermanas, gracias por alegrarme los días con su compañía. A mi hermano por las salidas y las risas. A Don J. Guadalupe, gracias por el apoyo y por lo consejos.

Dra. Manuela Bolívar D., gracias por guiarme en este proyecto, me quedo con mucho conocimiento, gracias a usted pude ver otra perspectiva a la carrera, y que irrigación no es solo pegar tubos. A mis Asesores M.C. Luis Edmundo y M.C. Carlos Rojas por sus correcciones y hacer que este proyecto saliera de la mejor manera. De igual manera, quiero agradecer a la QFB. Ana Paola Moreno Garza por su ayuda y orientación dentro del laboratorio, por último, a la Biol. Claudia por siempre sacarnos una sonrisa y hacernos compañía.

A las personas con las que tuve la fortuna de coincidir y estuvieron para mí en las buenas y en las malas durante estos 5 años: Omar Hernández Silva , Raúl Adrián (Pai), Irving Ignacio, Mauro Morales. Tomás Gutiérrez (gracias por tu apoyo y nunca dejarme abajo), Alicia Baeza, Erick Hernández, Alan Velazco, Eduardo Aguilar, José Roblero, Eduardo Villegas, Carlos Macías, Gerardo Hernández, Anthony Jr., Miguel Rendón, Pedro Adair, Jairo Álvarez, Janet Laureano y por último al Curly.

A mis amigos del rancho: Kevyn Martínez, Cristal Sánchez, Luis, Jahir (Ojitos), Sayuri.

Dedicatoria

A mi madre, este logro es tuyo, que sin ti no hubiera podido seguir adelante, por apoyarme desde el principio en esta aventura lejos de casa, tal vez hubieron días difíciles pero todo valió la pena.

A mi familia por siempre recibirme con un abrazo, era triste tener que irme pero, después de mucho tiempo, puedo decirles que por fin, puedo regresar a casa a desempacar por completo y por fin guardar las maletas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Agradecimientos.....	iv
Dedicatoria.....	v
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Cuadros	x
RESUMEN.....	1
I. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Objetivos.....	3
1.2. Hipótesis	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. El Agua	4
2.2. Situación del Agua en México	4
2.3. Aguas Residuales.....	5
2.3.1. Situación del Agua Residual en México	6
2.3.2. Uso del Agua Residual en Hidalgo	7
2.4. Propiedades del Agua Residual	8
2.4.1. Propiedades Físicas.	8
2.4.1.1. Sólidos Totales (ST).	8
2.4.1.2. Sólidos Disueltos Totales (SDT).	8
2.4.1.3. Sólidos Totales Volátiles (STV).	9
2.4.1.4. Sólidos Suspendidos Totales (SST).	9
2.4.1.5. Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV).	9
2.4.1.6. Sólidos Sedimentables (SS).	9
2.4.1.7. Color.	10
2.4.1.8. Olor.	10
2.4.1.1. Temperatura	11
2.4.2. Propiedades Químicas	11
2.4.2.1. Conductividad Eléctrica (CE).	11
2.4.2.2. pH.....	12

2.4.2.3.	Oxígeno Disuelto (OD).....	13
2.4.2.4.	Demanda Bioquímica de Oxígeno (BDO ₅).	13
2.4.2.5.	Demanda Química de Oxígeno (DQO).	14
2.4.2.6.	Grasas y Aceites (G y A).	14
2.4.2.7.	Alcalinidad.....	14
2.4.2.8.	Nitrógeno (N).....	15
2.4.2.9.	Fósforo (P).	16
2.4.2.10.	Azufre (S).	17
2.5.	Composición del Agua Residual	17
2.5.1.	Agua Residual Doméstica.....	17
2.5.2.	Agua Residual Industrial.....	18
2.5.3.	Infiltración y Aportaciones Incontroladas.....	18
2.5.4.	Aguas Pluviales.....	18
2.6.	Tratamientos de Aguas Residuales.....	19
2.6.1.	Pretratamiento.	19
2.6.1.1.	Remoción de Arena mediante Desarenadores.	19
2.6.1.1.1.	Desarenador Mecánico.	19
2.6.1.1.2.	Desarenador Hidráulico.....	20
2.6.1.2.	Remoción de Grasas y Aceites.	20
2.6.1.3.	Remoción de Sólidos Gruesos Mediante Rejillas.....	20
2.6.1.3.1.	Rejas de Limpieza Manual.	21
2.6.1.3.2.	Rejas de Limpieza Mecánica.....	21
2.6.1.4.	Tamizado.	21
2.6.2.	Tratamiento Primario.	21
2.6.2.1.	Clarificador Primario.	22
2.6.3.	Tratamiento Secundario.	22
2.6.3.1.	Lodos Activados.	23
2.6.3.2.	Filtros Biológicos.....	23
2.6.3.3.	Filtro Percolador.	23
2.6.3.4.	Lagunas.....	24

2.6.3.5.	Humedales.	24
2.6.3.5.1.	Humedales de Superficie Libre (FWS).	25
2.6.3.5.2.	Humedales Horizontales Subsuperficiales (HSSF).	26
2.6.3.5.3.	Humedales de Flujo Vertical (FWS).	26
2.6.4.	Tratamiento Terciario.....	27
2.7.	Calidad de Agua para Uso Agrícola.....	27
2.7.1.	Textura.	28
2.7.1.1.	Textura Gruesa (Arenosa o Ligera).	28
2.7.1.2.	Textura Media.....	28
2.7.1.3.	Textura Fina (Arcillosa o pesada).....	29
2.7.2.	Drenaje Agrícola	29
2.7.3.	Clima.....	29
2.7.4.	Parámetros para Determinar la Calidad Química del Agua.	30
III.	MATERIALES Y METODOS	34
3.1.	Localización Geográfica.....	34
3.2.	Muestreo	35
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
VI.	BIBLIOGRAFÍA.....	45

Índice de Figuras

Figura 1. Comportamiento del volumen de los usos del agua por tipo de fuente en el periodo 2005-2020 (CONAGUA,2020).	5
Figura 2. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, por caudal tratado (Estadísticas del Agua en México, (2023).	6
Figura 3. Ciclo general del nitrógeno en el ambiente. (Metcalf&Eddy,2014).	16
Figura 4. Sistema de humedal de superficie libre (H. Kadlec & D.Wallace,2009).	25
Figura 5. Sistema de humedal de flujo horitontal subsuperficiales (H.Kadlec & Wallace,2009).....	26
Figura 6. Sistema de humedal de flujo vertical (H.Kadlec&D.Wallace,2009).	27
Figura 7.Localizacion de la PTAR- La Estancia (Google Earth pro-2024)	34
Figura 8. Sitio de muestreo "Influyente" en la PTAR-La Estancia.....	35
Figura 9.Sitio de muestreo "Humedal Artificial" en la PTAR-La Estancia	36
Figura 10. Sitio de muestreo "Efluente" en la PTAR-	36

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Clasificación por (CE).	30
Cuadro 2. Clasificación por (SE).	31
Cuadro 3. Clasificación por (SP).	31
Cuadro 4. Clasificación por (RAS).	31
Cuadro 5. Clasificación por (CSR).	32
Cuadro 6. Clasificación por (PSP).	32
Cuadro 7. Clasificación de acuerdo a Elementos Tóxicos.	32
Cuadro 8. Clasificación de Tolerancia de cultivos al Boro.	33
Cuadro 9. Contenido de Boro por cultivo.	33
Cuadro 10. Parámetros, muestras y normas determinados para las muestras.	37
Cuadro 11. Parámetros, Métodos y Normas determinados para la calidad agronómica del agua residual.	38
Cuadro 12. Resultados de las diferentes etapas del proceso de tratamiento.	40
Cuadro 13. Comparativa de resultados obtenidos respecto a la NOM-003- SEMARNAT-1997.	41
Cuadro 14. Resultado de Aniones y Cationes para las diferentes etapas del proceso del tratamiento.	42
Cuadro 15. Índices de clasificación del agua para riego (USDA, 1964).	43

RESUMEN

El agua es un recurso de suma importancia, no sólo por el hecho de que es esencial para la vida si no que ésta es limitada. México es uno de los países que presentan problemas de sequías desde hace años, intensificándose año tras año. Como respuesta a estas problemáticas se ha optado por implementar plantas tratadoras de agua residual (AR) para poder darles otros usos; el tipo de tratamiento dependerá de la fuente del agua (doméstico, industrial). El presente estudio se llevó a cabo en la PTAR-La Estancia, realizándose los análisis en el laboratorio de calidad de aguas y fertilidad de suelos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) y en el municipio de Chilcuautila, Hgo, ubicación de la planta tratadora de agua residual (PTAR). Se tomaron muestras del influente, humedal artificial y efluente para evaluar las diferentes etapa del tratamiento y dar cumplimiento a la NOM-003-SEMARNAT-1997. Los resultados mostraron, que el humedal artificial incrementó los sólidos disueltos; los sólidos sedimentables y los sólidos suspendidos totales disminuyeron evitando el taponamiento de los emisores de riego, la DQO permaneció igual, contrario a la DBO_5 que disminuyó un 90 por ciento, mostrando una gran eficiencia de los microorganismos; los coliformes totales y fecales se redujeron prácticamente en su totalidad, lo que refleja la eficiencia del tule para la remoción de éstos; este tratamiento es poco efectivo en la remoción de las grasas y aceites siendo un gran problema para el uso agrícola y siendo el único parámetro que no cumple la NOM-003-SEMARNAT-1997. Por lo que se recomienda dar mantenimiento diario de la PTAR-La Estancia y obtener un (AR) tratada y favorecer un uso sustentable de la misma.

Palabras clave: aguas residuales, calidad agronómica, humedales artificiales, reúso agrícola

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento esencial para la vida, sin ella, el hombre no podría existir. Incluso se tiene registro que toda población o comunidad, a lo largo de la historia, ha buscado asentarse cerca de una fuente de agua. El desarrollo de la humanidad como sociedad provoco que las descargas de aguas residuales domésticas e industriales aumentaran provocando la contaminación de los recursos hídricos. De este modo se hizo necesario implementar diversos sistemas de tratamiento de aguas residuales (AR).

Es sabido que en el planeta existe un alto porcentaje de agua salada, siendo este de 97, dejando el restante tres por ciento como agua dulce, este pequeño porcentaje no está disponible para el hombre, debido a que, alrededor del 79 por ciento se encuentra en estado sólido o dicho de otra manera en forma de casquetes polares o glaciares, el 20 por ciento se encuentra dentro de acuíferos, lo que dificulta su acceso. Solo el uno por ciento restante se encuentra en la superficie. Aun en este pequeño porcentaje se debe tomar en cuenta que el 38 por ciento se encuentra en la humedad de la tierra; otro uno por ciento en organismos vivos; ocho por ciento conforman la atmosfera, un 52 por ciento constituyen a los lagos y por último solo el uno por ciento se encuentra en los ríos. En la actualidad, 1,100 millones de personas, el 18 por ciento de la población mundial, no tiene acceso al agua potable (Rul-lán, 2003).

Las descargas no controladas de aguas residuales hacia cuerpos de agua naturales pueden provocar efectos adversos a la biodiversidad presente en estos ecosistemas, aunado a esto, podemos resaltar el efecto negativo hacia la salud de las personas, provocando distintas enfermedades. (Alfárez y Nieves, 2019).

De acuerdo a Torres, (2012) los países que muestran los peores porcentajes en cuanto a recolección y tratamiento de aguas residuales domesticas (ARD) son los categorizados como países en vías de desarrollo, debido principalmente a aspectos económicos, así como el desconocimiento o falta de conocimiento sobre tecnologías alternativas de bajo costo.

En el país existen aproximadamente, tres cuartas partes de superficie considerada como zonas áridas, por lo que hay poca disponibilidad de agua de lluvia, justificado el reúso de aguas residuales domésticos tratadas en la agricultura.

Por lo anterior el objetivo planteado es:

1.1. Objetivos

- Determinar la calidad agronómica del agua residual de acuerdo a la NOM-003-SEMARNAT-1997.

1.2. Hipótesis

- El agua residual de la PTAR-La Estancia no cumple con la NOM-003-SEMARNAT-1997.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El Agua

El agua es uno de los elementos naturales más abundantes de la naturaleza y cubre aproximadamente tres cuartas partes de la superficie terrestre; más del 97 por ciento del agua total del planeta se encuentra en los océanos y debido a su naturaleza salina queda descartada para usarse, del tres por ciento restante, más del dos se encuentra en forma de hielo, provocando que no esté disponible. Tomando en cuenta lo anterior mencionado, sólo el 0.62 por ciento de toda el agua en el planeta es apta para consumo del hombre y sus actividades domésticas, agrícolas e industriales, este volumen de agua se encuentra en lagos, ríos y acuíferos subterráneos (Castañeda y Flores, 2013).

2.2. Situación del Agua en México

De acuerdo a la Comisión Nacional del Agua 2023, el número de acuíferos sobreexplotados hasta septiembre de 2020 fueron 111 acuíferos.

El volumen total que se destina al abastecimiento para los usos del agua en México ha tenido un crecimiento positivo esto en el periodo 2005-2020. Tanto extracciones subterráneas como superficiales presentan tasas de crecimiento de 0.27 y 0.11 por ciento respectivamente tal como se observa en la figura 1 (CONAGUA, 2020).

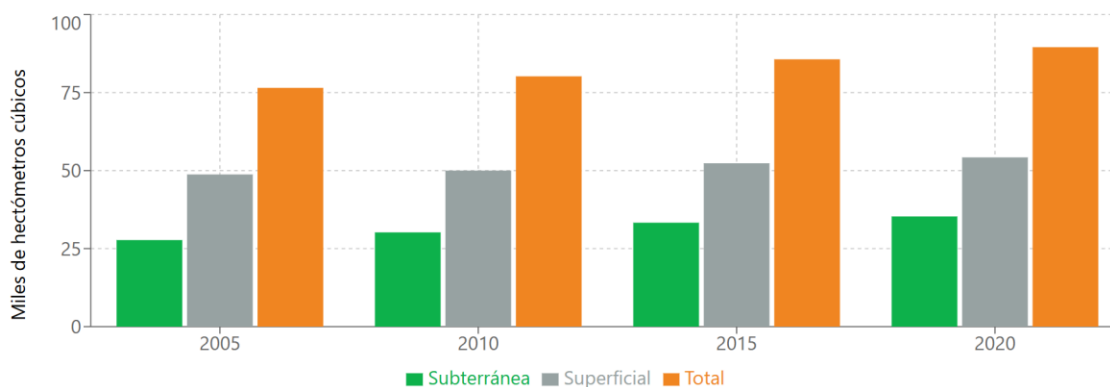


Figura 1. Comportamiento del volumen de los usos del agua por tipo de fuente en el periodo 2005-2020 (CONAGUA,2020).

Los problemas del agua en México se pueden resumir en : las cuencas y acuíferos de mayor importancia se encuentran sobre explotados debido a un aumento en la cantidad de habitantes, sin contar que estos acuíferos se encuentran sobre concesionados, a esto le podemos sumar que el porcentaje de cuerpos de agua contaminados en el país llega al 70 por ciento, mencionado por (Arreguín, et al., 2020).

2.3. Aguas Residuales

De acuerdo a Diaz ,et al, (2012) las aguas residuales se definen como la acción en la cual el hombre modifica de manera perjudicial o negativa la calidad del agua, estas acciones pueden incluir el agregado de materiales contaminantes de origen orgánico o inorgánico; puede suceder de manera directa o indirecta. Para (Kadlec y Wallace, 2009) las aguas residuales son aquéllas que provienen del uso doméstico o industrial. También se les conoce como aguas negras o aguas fecales. En general, debido a que han sido utilizadas en procesos de transformación y limpieza o ambas. Estas aguas constituyen un

residuo, algo que no tiene utilidad para el usuario directo, de igual forma, tienen una amplia variedad de composiciones y se generan principalmente por descargas de uso doméstico, comerciales, agrícolas, ganaderos e industriales o una mezcla de todos los anteriores mencionados.

2.3.1. Situación del Agua Residual en México

En México de acuerdo a las Estadísticas del Agua en México (2023) se trataron 143.8 m³/s de aguas residuales , es decir el 66.7 por ciento de los 215.6 m³/s recolectados a través del sistema de drenaje. Los principales métodos de tratamiento se muestran en la Figura 2.

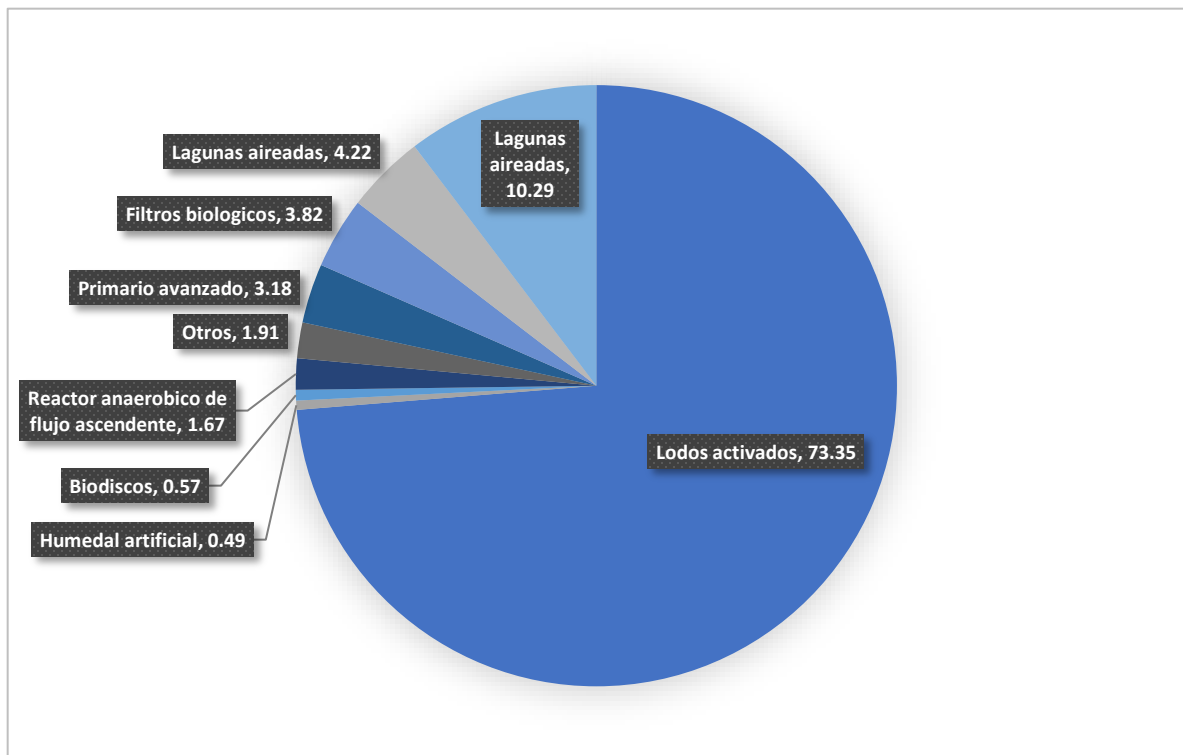


Figura 2. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, por caudal tratado (Estadísticas del Agua en México, (2023).

2.3.2. Uso del Agua Residual en Hidalgo

Desde hace 100 años en la región del Valle del Mezquital, estado de Hidalgo reportan (Vázquez et al. (2001) el agua residual que tiene su origen en la zona metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) es usada para la producción de distintos cultivos de la región. Así mismo consideran (Rosas y García, 2023) que en la actualidad la superficie cultivada es de 90 mil ha de los cuales pueden destacar cultivos como forrajes, maíz, alfalfa, frijol, cebada y trigo entre otros, se estima que esta región representa el 84 por ciento al valor total de la producción agrícola del Estado, siendo la alfalfa (44.5 por ciento) y el maíz (42.6 por ciento), los principales cultivos de la región, pero con problemáticas ambientales y en salud latentes.

Los metales pesados son los principales elementos que se encuentran en el agua residual, que posteriormente, se infiltran en el suelo y pueden participar en diversos procesos como su incorporación dentro del ciclo del agua, principalmente en la fase relacionada con el suelo y el agua subterránea; provocando la contaminación de acuíferos, también pueden acumularse en el suelo donde son absorbidos por las plantas (Vázquez, et al, 2005) terminando por afectar a la salud humana.

2.4. Propiedades del Agua Residual

2.4.1. Propiedades Físicas.

El origen del agua determinara las propiedades físicas del agua así como el tratamiento que haya recibido antes de su distribución como agua potable. Un ejemplo puede ser la temperatura inicial del agua presentara variaciones dependiendo de donde provenga esta agua (superficial o subterránea) así como de la parte del país de donde se extraiga. Las demás propiedades físicas de las aguas residuales dependerán de los componentes que se van añadiendo durante su recorrido, las descargas comerciales e industriales también afectan estas características (Metcalf & Eddy, 2014).

Estas propiedades son descritas por (Metcalf & Eddy, 2014):

2.4.1.1. Sólidos Totales (ST).

El residuo sobrante después de evaporar y secar una muestra de aguas residuales a una temperatura de (103 a 105 °C).

2.4.1.2. Sólidos Disueltos Totales (SDT).

Los sólidos que pasan a través de un filtro y luego se evaporan para posteriormente secarse . Cabe señalar que lo que se mide como TDS está compuesto por sólidos coloidales y disueltos. Los coloides suelen tener un tamaño comprendido entre 0,001 y 1 mm.

2.4.1.3. Sólidos Totales Volátiles (STV).

Aquellos sólidos que pueden volatilizarse y quemarse cuando se encienden los TS (500 ± 50 °C). Este parámetro nos indica la estabilidad biológica de los lodos.

2.4.1.4. Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Porción de los sólidos totales retenida en un filtro con un tamaño de poro especificado, después de ser secada a una temperatura de 105 °C. El filtro más utilizado para la determinación de los sólidos suspendidos totales es el filtro de fibra de vidrio Whatman, que tiene un tamaño de poro nominal de aproximadamente 1,58 micras.

2.4.1.5. Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV).

De acuerdo a Muñoz y Aldás (2017) son los sólidos en suspensión que han sido expuestos a una temperatura a una temperatura de 550 ± 50 °C, logrando su volatilización, representan la materia orgánica en suspensión.

2.4.1.6. Sólidos Sedimentables (SS).

Sólidos que se sedimentan en el fondo de un cono Imhoff después de pasar 60 minutos. (Metcalf & Eddy, 2014) Es una medida aproximada de la cantidad de lodo que se eliminara mediante sedimentación.

2.4.1.7. Color.

(Metcalf & Eddy, 2014) mencionan que el color marrón grisáceo claro suele ser característico de las aguas residuales frescas. Sin embargo, a medida que el agua residual transita a través del sistema de recolección y se desarrollan más condiciones anaeróbicas, el color de las aguas residuales puede experimentar cambios secuenciales de gris a gris oscuro y, finalmente, a negro. Cuando el color de las aguas residuales es negro, a menudo se pueden categorizar como sépticas. Se debe tomar en cuenta que las descargas de aguas residuales industriales pueden alterar este parámetro debido a que suelen contener colorantes artificiales que después se mezclan con las de origen doméstico. El color gris, gris oscuro y negro nos puede informar sobre la presencia de sulfuros metálicos, Bolívar (2025) menciona que tanto color y el olor nos puede dar una idea sobre la edad del agua.

2.4.1.8. Olor.

Los olores presentes en las aguas residuales domésticas están asociados a la producción de gases durante la descomposición de materia orgánica o por sustancias añadidas a estas. Las aguas residuales frescas suelen tener un olor particular menos molesto que el olor de las que han experimentado una descomposición anaeróbica (sin Oxígeno). El olor más característico de las aguas residuales estancadas o sépticas es el del sulfuro de Hidrógeno (H_2S), que, como se ha mencionado anteriormente, es producido por microorganismos anaeróbicos que reducen el sulfato (SO_4^{-2}) a sulfuro (S^{-2}) (Metcalf & Eddy, 2014).

2.4.1.1. Temperatura

La temperatura del agua es un parámetro importante debido a que cambios repentinos en esta, pueden afectar a la vida acuática de manera negativa aumentando su mortalidad, su efecto puede observarse en como interactúa con la constante de reacción K (Ramalho, 1983) esto coincide con lo dicho por (Metcalf & Eddy, 2014) donde menciona que las constantes de equilibrio, de solubilidad y constantes de velocidad de reacción dependen de la temperatura. En el contexto de aguas residuales la temperatura tiende a ser elevada debido a la incorporación agua caliente proveniente de las casas y en algunas ocasiones de uso industrial. Las temperaturas óptimas para la actividad bacteriana pueden variar entre los 25 y los 35 °C. La digestión aeróbica y la nitrificación se detienen cuando la temperatura alcanza los 50 °C, contrario a la actividad de bacterias productoras de metano que se vuelven inactivas a las 15 °C y a unos 5 °C, las bacterias nitrificantes autótrofas prácticamente dejan de funcionar. De igual forma, sucede con las bacterias quimio heterótrofas a 2 °C.

2.4.2. Propiedades Químicas

En estas propiedades se incluyen la remoción de materia carbonosa y nutrientes.

2.4.2.1. Conductividad Eléctrica (CE).

La conductividad eléctrica (CE) del agua nos indica su capacidad para conducir corriente eléctrica. Un valor de conductividad alto nos puede indicar, de igual manera, un valor alto de iones, debido a que son estos los que transportan la corriente eléctrica, por

ende están relacionados. De acuerdo a (Metcalf & Eddy, 2014) el valor de CE se puede utilizar como medida indirecta de la concentración total de sólidos disueltos (TDS). En la actualidad, la CE del agua es uno de los parámetros importantes que se utilizan para determinar si el agua es óptima para el riego. El valor de la CE en aguas residuales destinadas para riego nos puede dar una idea sobre su nivel de salinidad y sus posibles efectos en el campo.

Este parámetro puede verse afectado por diversos factores, como tal como lo expresa Vera, et al (2010) que debido a la descomposición de raíces y rizomas de la planta del tule puede provocar un aumento de la CE, esto contrasta con lo dicho por García, et al (2023) y Camargo, et al (2024) donde ambos relacionan el aumento de la CE con el proceso de crecimiento del tule (*Typha domingensis*), siendo en su etapa de maduración donde la planta empieza la descomposición de biomasa, provocando una liberación de iones.

2.4.2.2. pH.

Es la concentración del ión Hidrogeno. Esta concentración juega un papel importante debido a que muchas especies dependen de un rango muy estrecho para sobrevivir y poder desarrollarse (normalmente de 6 a 9). Las aguas residuales con una concentración extrema de iones de Hidrógeno son difíciles de tratar por medios biológicos y, sino se modifica la concentración antes de su descarga, las aguas residuales pueden alterar la concentración en las aguas receptoras naturales. Para los efluentes tratados

descargados al medio ambiente, el rango de pH permitido suele variar entre 6.5 y 8.5 (Metcalf & Eddy, 2014).

2.4.2.3. Oxígeno Disuelto (OD).

De acuerdo a Noyola, et al. (2000) este parámetro es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios y demás formas de vida de la misma naturaleza. La solubilidad del Oxígeno depende de la temperatura, mientras mayor sea esta, menor será el nivel de Oxígeno por lo tanto los niveles de Oxígeno disuelto tienden a ser menores en los meses de verano, esto repercute de manera negativa en la vida acuática.

2.4.2.4. Demanda Bioquímica de Oxígeno (BDO₅).

Para Muñoz y Aldás (2017) este parámetro indica el nivel de concentración orgánica biodegradable en aguas residuales a los 5 días. Contempla la cantidad de Oxígeno disuelto que los microorganismos aerobios consumirán para poder oxidar bioquímicamente la materia orgánica. Los resultados de la prueba de DBO₅ se utilizan actualmente para:

- Conocer la cantidad aproximada de Oxígeno necesaria para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente.
- Determinar el tamaño de las instalaciones de tratamiento de residuos.
- Medir la eficiencia de distintos procesos de tratamiento.
- Determinar el cumplimiento de las normas de descarga de las aguas residuales.

2.4.2.5. Demanda Química de Oxígeno (DQO).

La DQO es por lo general 1.68 mayor que la DBO₅, esto debido a que es mayor el número de compuestos que pueden oxidarse por vía química que biológicamente. Es posible hallar una correlación entre la DQO y la DBO₅ de ahí que la medida de DQO puede utilizarse para corroborar el funcionamiento y control de la planta de tratamiento (Metcalf & Eddy, 2014).

2.4.2.6. Grasas y Aceites (G y A).

El autor anterior indica que las grasas y aceites son compuestos de alcohol y ácidos grasos (de acuerdo a su temperatura y estado son llamados aceites o grasas). Estos acceden al agua residual como mantequilla, manteca de cerdo, margarina y aceites vegetales halladas en la carne, semillas, nueces y ciertas frutas. Su rápida acumulación en los sistemas de tratamiento se debe a que las bacterias presentan dificultades para descomponerlas, interviniendo en la vida biológica, así como creando películas y metería flotante que pueden interferir en el proceso de tratamiento.

2.4.2.7. Alcalinidad.

De acuerdo a Romero (2010) a la alcalinidad del el agua residual es la capacidad para neutralizar ácidos, puede generarse debido a la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos tales como Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), Sodio (Na^{+}), Potasio (K^{+}) o Amonio (NH_4^{+}). Normalmente el agua residual es alcalina debido a que está compuesta de aguas subterráneas y posteriormente es mezclada con distintos

componentes durante su etapa de uso doméstico. La alcalinidad en las aguas residuales ayuda a resistir los cambios en el pH causados por la adición de ácidos. El grado de alcalinidad en las aguas residuales es importante cuando se va a utilizar un tratamiento químico o biológico, en la eliminación biológica de nutrientes como Nitrógeno y Potasio así como cuando se va a eliminar el Amonio (NH_4^+) por arrastre con aire.

2.4.2.8. Nitrógeno (N).

La importancia del elemento radica en su importancia para el correcto desarrollo de las plantas y siendo esencial para la síntesis de proteínas, (Metcalf & Eddy, 2014) mencionan que la forma en que se presenta en el agua residual es en forma de urea y materia proteica que debido a la actividad bacteriana se transforma en Amonio (NH_4^+) que es la forma asimilable para la planta. El predominio del N en forma de NO_3^- indica la estabilización del agua residual respecto a la demanda de Oxígeno. Sin embargo la presencia de N en forma de NO_2^- en aguas residuales representa un problema, debido a que, perjudica a la mayoría de los peces y demás especies acuáticas, a esto podemos agregar que, los NO_2^- presentes en los efluentes de aguas residuales se oxidan con el Cloro (Cl) por lo que, si se encuentran altas concentraciones de NO_2^- , se necesitan dosis más altas de Cloro elevando el costo de desinfección. En la Figura 3 se muestra, esquemáticamente, el ciclo general del Nitrogeno en el ambiente.

Las principales fuentes de compuestos nitrogenados son:

- Los compuestos nitrogenados de origen vegetal y animal.

- El nitrato de sodio .
- El nitrógeno atmosférico (fijación de nitrógeno).

El Nitrógeno tiene diversos estados de oxidación que puede adoptar, además, los organismos vivos pueden provocar cambios en el estado de oxidación, algunas de estas formas del nitrógeno son: Nitratos (NO_3^+), Nitritos (NO_2^-), Amoníaco (NH_3^+), Amonio (NH_4^+), Gas Nitrógeno (N_2).

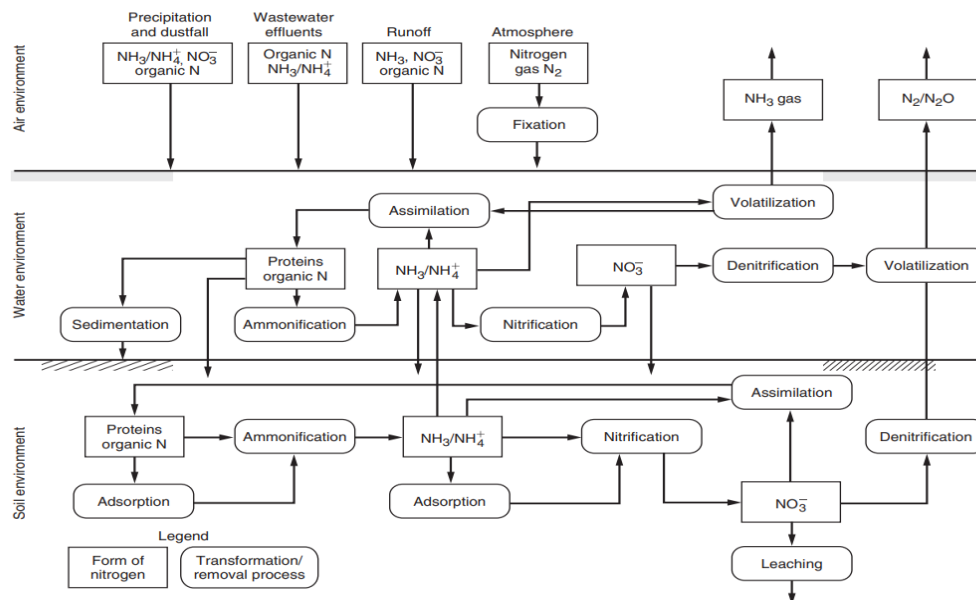


Figura 3. Ciclo general del nitrógeno en el ambiente. (Metcalf&Eddy,2014).

2.4.2.9. Fósforo (P).

Elemento es esencial para el crecimiento de algas, cultivos agrícolas y otros organismo biológicos, Noyola, et al.(2000) menciona que la cantidad presente de este elemento en el agua residual se debe al contenido de desechos humanos y detergentes sintéticos, como se mencionó anteriormente causan un crecimiento exponencial en algas

las cuales afectan al proceso de tratamiento. Sus formas más comunes de encontrar en soluciones acuosas son ortofosfato (disponible para el metabolismo biológico), polifosfato y fosfato orgánico. El P contamina los cuerpos de agua por arrastre, esto afectara de acuerdo a la pendiente del terreno.

2.4.2.10. Azufre (S).

(Metcalf & Eddy, 2014) mencionan que el ion (SO_4^{2-}) se presenta de manera natural en los suministros de agua y por consecuencia en el agua residual. Es requerido en la síntesis de proteínas. Los sulfatos se reducen químicamente a sulfuros (S^{2-}) por las bacterias en condiciones anaerobias, estos pueden alterar el proceso biológico si llegan a sobrepasar los 200 mg/l.

2.5. Composición del Agua Residual

La cantidad y concentración de las aguas residuales dependerá de su origen y de sus componentes (Romero , 2010) y (Metcalf & Eddy, 2014) mencionan que conocer los datos mencionados anteriormente nos podría dar una idea sobre el tipo de tratamiento que se le dará al agua residual.

2.5.1. Agua Residual Doméstica.

Para Muñoz y Aldás las aguas residuales domésticas incluyen el agua utilizada en el interior de residencias privadas, edificios de apartamentos, etc., para beber, cocinar,

lavarse las manos, bañarse, lavar la ropa, descargar el inodoro y otros usos y en el exterior para el riego de jardines entre otros, puede contener heces fecales, plásticos, cáscaras y restos de comida.

2.5.2. Agua Residual Industrial.

Agua residual en la cual predominan las descargas industriales. De acuerdo al sector de la industria contendrá metales pesados, contaminantes orgánicos e inorgánicos, sólidos en suspensión, grasas y aceites y un pH alterado, de igual forma, podemos incluir colorantes o solventes así como aceites hidráulicos. Esto hace que este tipo de descargas sean difíciles de tratar.

2.5.3. Infiltración y Aportaciones Incontroladas.

Agua que entra, tanto de manera directa como indirecta, en la red de alcantarillado. La filtración hace referencia al agua que penetra en el sistema a través de juntas defectuosas, fracturas y grietas, o paredes porosas. Las aportaciones incontroladas corresponden a aguas pluviales que se descargan a la red por medio de alcantarillas, drenes, drenajes o bajadas de edificios y tapas de pozos de registro (Metcalf & Eddy, 2014).

2.5.4. Aguas Pluviales.

Los autores anteriores definen a las aguas pluviales como el resultante de la escorrentía superficial así como agua proveniente de precipitaciones que son captadas por

el drenaje. En muchos casos la captación de este tipo de aguas se vuelve un problema debido a la mala condición de obras de captación.

2.6. Tratamientos de Aguas Residuales

Dependiendo de la fuente y el reúso es el tratamiento que se utiliza en las aguas residuales.

2.6.1. Pretratamiento.

Dentro de este proceso se encuentran procesos donde se remueven principalmente materiales que puedan impedir un correcto funcionamiento de la planta, tales son la remoción de trapos, palos, materiales flotantes, arena y grasa, que pueden causar problemas de mantenimiento u operativos en las operaciones de tratamiento, los procesos y los sistemas auxiliares (Metcalf & Eddy, 2014).

De acuerdo a Muñoz y Aldás (2017) las operaciones unitarias que forman parte del pretratamiento son las siguientes:

2.6.1.1. Remoción de Arena mediante Desarenadores.

Siempre se debe contemplar la presencia de arenas en el sistema de alcantarillado. Se recomienda retirar arena de diámetro igual o mayor a 0.2 mm:

2.6.1.1.1. Desarenador Mecánico.

Estos sistemas crean un vórtice controlado que genera una fuerza centrífuga que arroja los granos de arena hacia las paredes, propiciando la separación al fondo del tanque.

2.6.1.1.2. Desarenador Hidráulico.

Para este tipo de desarenadores se debe mantener una velocidad de flujo de 0.3 m/s, esto permite la sedimentación de arena y al mismo tiempo mantiene los sólidos orgánicos en suspensión que continúan su recorrido hacia las siguientes etapas del tratamiento.

2.6.1.2. Remoción de Grasas y Aceites.

Las trampas de grasas son estructuras que se utilizan para el efluente de fregaderos de cocina. Otro método utilizado es la trampa de grasa aireada que funciona inyectando microburbujas de aire, en estas microburbujas se adhieren las grasas y aceites, saliendo a flote y facilitando su recolección.

2.6.1.3. Remoción de Sólidos Gruesos Mediante Rejillas.

Algunos parámetros de diseño para rejillas es la velocidad, siendo la velocidad recomendada entre 0.4 m/s y 0.9 m/s, esto para evitar sedimentación prematura de igual forma se toma en cuenta el tipo de rejilla (manual o mecánica) para saber el grado de inclinación.

2.6.1.3.1. Rejas de Limpieza Manual.

Para la limpieza se requieren herramientas comunes, baratas y de fácil mantenimiento, además de mano de obra no especializada. Normalmente se usan en plantas pequeñas donde la retención de residuos es poca.

2.6.1.3.2. Rejas de Limpieza Mecánica.

Se requiere equipo especial, su instalación es costosa, requiere mantenimiento y una considerable cantidad de energía debido a su continuo funcionamiento; se utilizan en instalaciones de tamaño considerable donde la retención de residuos es voluminosa.

2.6.1.4. Tamizado.

Esta parte del tratamiento se usa para retener sólidos en suspensión de diámetro mayor a 0.5 mm. Están constituidos de mallas especiales de acero inoxidable de tal manera que la obstrucción es mínima, son de funcionamiento continuo y auto limpiantes.

2.6.2. Tratamiento Primario.

El tratamiento primario se utiliza para eliminar los sólidos grandes y gruesos mediante cribado, así como aquellas partículas con densidad suficiente para ser eliminadas por sedimentación por gravedad (Metcalf & Eddy, 2014).

2.6.2.1. Clarificador Primario.

De acuerdo a Noyola, et al (2000) los tipos de tanques de sedimentación usado en las plantas de tratamiento son rectangulares o circulares y cuentan con sistemas automáticos para recolectar el lodo producido. La selección del tipo de tanque dependerá de distintos factores como: tamaño de la instalación, de las disposiciones y reglamentos de los organismos locales de control, las condiciones locales del terreno y de la estimación de los costos entre otros. Se recomienda tener al menos dos tanques con el fin de que el proceso permanezca en funcionamiento mientras que uno de ellos esté fuera de servicio por reparación y mantenimiento.

2.6.3. Tratamiento Secundario.

El tratamiento secundario, tal y como lo define la EPA mencionado por (Metcalf & Eddy, 2014) se dirige principalmente a la eliminación de compuestos orgánicos fácilmente biodegradables y sólidos en suspensión. Para proteger aún más el medio ambiente en algunas áreas críticas, se han establecido normas más estrictas para la eliminación de nutrientes y patógenos y para lograr niveles de demanda de oxígeno más bajos que los que se pueden alcanzar actualmente con las técnicas de tratamiento secundario. Cuando las aguas residuales se van a reutilizar, las normas pueden incluir requisitos de eliminación de compuestos orgánicos refractarios, metales pesados y sólidos inorgánicos disueltos.

2.6.3.1. Lodos Activados.

Para Muñoz y Aldás (2017) el proceso de los activados se define como un sistema en el cual una porción de biomasa es continuamente recirculada al biorreactor para aumentar la concentración de los microorganismos activos que consumen la materia orgánica en presencia de Oxígeno disuelto (OD). Cabe señalar que el volumen del reactor biológico es inversamente proporcional a la concentración de biomasa.

2.6.3.2. Filtros Biológicos.

De acuerdo a los autores anteriores, la concentración de biomasa es un parámetro relevante, por ende se tiende a desarrollar reactores biológicos que incrementen y mantengan la mayor concentración de biomasa cautiva en el reactor. Los sistemas de película biológica (Lechos bacterianos) persiguen este propósito, llenándose el reactor con material de soporte que permita el crecimiento bacteriano, atrapándolo en su superficie como película biológica.

2.6.3.3. Filtro Percolador.

Este tipo de sistema no requiere una recirculación del licor mezclado como con los lodos activados, su funcionamiento se basa en la adsorción y asimilación biológica, se debe mencionar que, tanto este sistema como lodos activados dependerán de los microorganismos presentes ya que estos se encargarán de oxidar la materia orgánica

presente, produciendo bióxido de carbono, promoviendo el crecimiento de biomasa. (Noyola, et al, 2000).

2.6.3.4. Lagunas.

Para Noyola, et al. (2000) las lagunas o estanques de estabilización son medios simples y flexibles de tratamiento de aguas residuales para la descomposición biológica del material orgánico estas se clasifican en:

- Anaerobias: se caracterizan por su alta carga orgánica. Se usan microorganismos anaerobios y facultativos.
- Facultativas: Presentan condiciones aerobias en la capa superior de la masa líquida, disminuyendo la concentración de oxígeno disuelto hacia el fondo, que es normalmente anaerobio. La estabilización del agua residual se alcanza por una combinación de microorganismos anaerobios, aerobios y facultativos.
- Aerobias: Son tanques poco profundos. Los contaminantes orgánicos son degradados por bacterias aerobias y facultativas. Debido a las limitaciones inherentes del diseño, las lagunas aerobias son empleadas para remover materia orgánica seguidas de un tratamiento convencional.

2.6.3.5. Humedales.

Para Kadlec & Wallace (2009) a los humedales y sus tipos son descritos de la siguiente manera :

Los humedales son áreas de tierra que están húmedas durante parte o todo el año debido a su ubicación en el paisaje. Históricamente, los humedales se denominaban de una u otra forma. Una de las principales funciones que desempeñan los ecosistemas de humedales es la eliminación de los sedimentos en suspensión del agua que fluye a través de ellos. Las bajas velocidades del agua, junto con la presencia de residuos vegetales en los humedales FWS (Free Water Surface) o de arena/grava en los humedales HSSF (Horizontal Sub-Surface Flow) y VF (Vertical Flow), favorecen la sedimentación y la interceptación de materiales sólidos

Los humedales de tratamiento modernos son sistemas artificiales que se han diseñado para enfatizar las características específicas de los ecosistemas de humedales con el fin de mejorar la capacidad de tratamiento. Los humedales de tratamiento pueden construirse en una variedad de sistemas hidrológicos como se muestra a continuación:

2.6.3.5.1. Humedales de Superficie Libre (FWS).

Tienen áreas de agua abierta y son similares en apariencia a las marismas (humedales costeros o interiores de aguas someras) naturales, como se muestra en la figura 4.

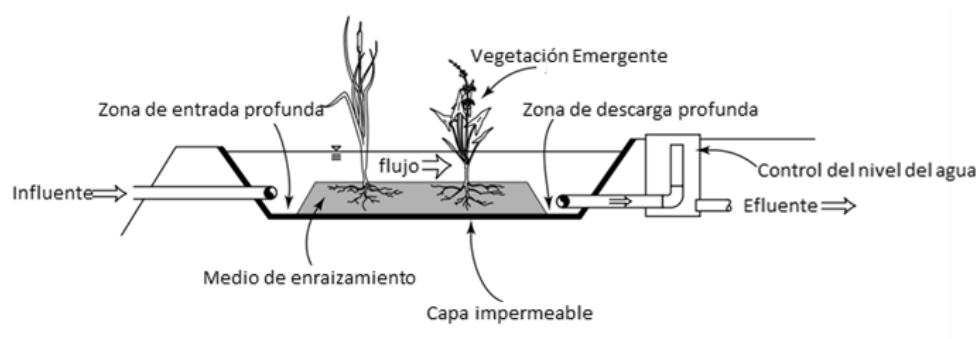


Figura 4. Sistema de humedal de superficie libre (H. Kadlec & D.Wallace,2009).

2.6.3.5.2. Humedales Horizontales Subsuperficiales (HSSF).

Según (H. Kadlec & D. Wallace, 2009) estos suelen emplear un lecho de grava plantado con vegetación acuática. El agua, que se mantiene por debajo de la superficie del lecho, fluyendo horizontalmente desde la entrada hasta la salida tal como se muestra en la figura 5.

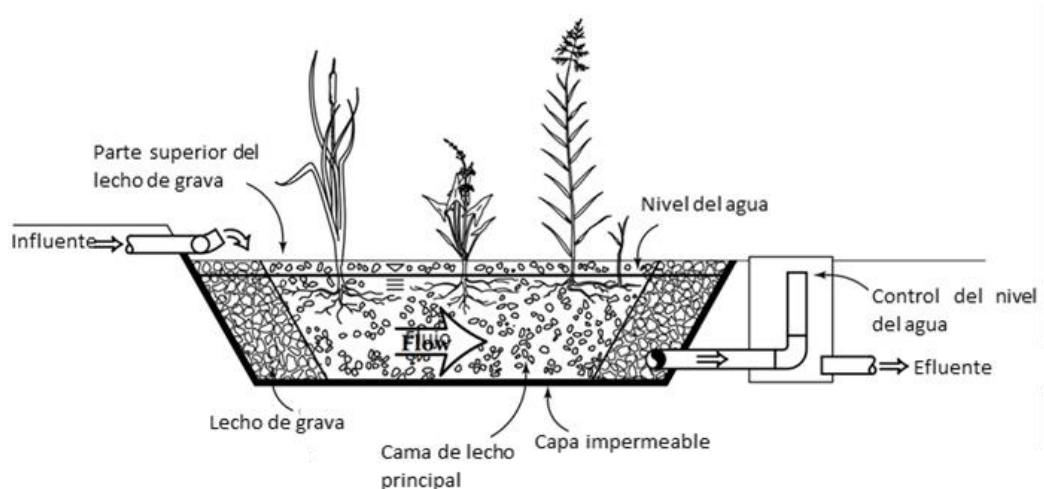


Figura 5. Sistema de humedal de flujo horizontal subsuperficiales (Kadlec & Wallace, 2009).

2.6.3.5.3. Humedales de Flujo Vertical (FWS).

Los autores anteriores explican estos humedales como un tipo de sistema de humedal donde distribuyen el agua por la superficie de un lecho o cama de arena o grava plantado con vegetación de humedal. El agua inicia su tratamiento a medida que se filtra a través de la zona radical de las plantas. En la figura 6 se muestra un diagrama representativo del sistema.

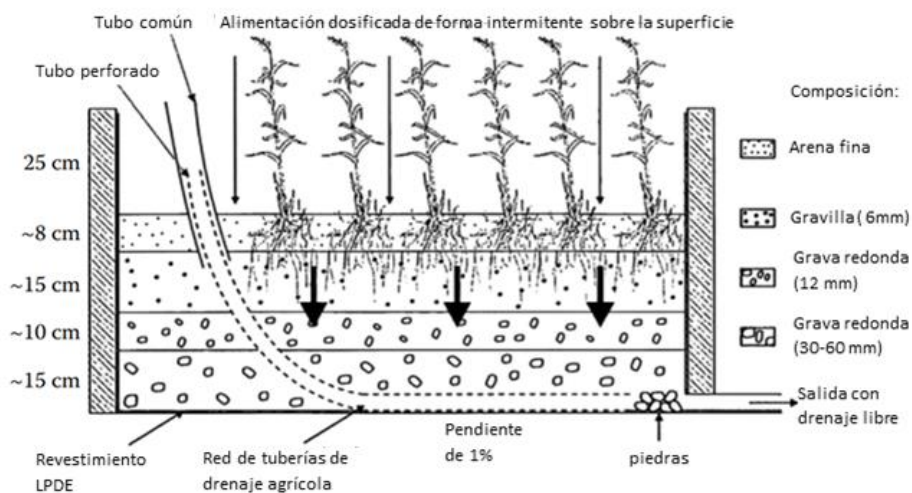


Figura 6. Sistema de humedal de flujo vertical (H.Kadlec&D.Wallace,2009).

2.6.4. Tratamiento Terciario.

De acuerdo a (Ramalho, 1983) el tratamiento terciario como tratamiento avanzado es una serie de procesos que tienen como fin de poder mejorar de manera considerable la calidad del agua ; incluyen tratamientos como: separación de sólidos en suspensión, adsorción en carbón activo, intercambio iónico, osmosis inversa, electrodiálisis, oxidación química (cloración y zonación) y métodos de eliminación de nutrientes (eliminación de Nitrógeno y Fósforo).

2.7. Calidad de Agua para Uso Agrícola.

De acuerdo a Castellanos, et al. (2000) la calidad del agua juega un papel importante sobre el manejo de láminas y frecuencias de riego para lograr su optimo

aprovechamiento, particularmente cuando se usan sistemas de riego presurizado. Las principales variables que considerar desde una perspectiva agrícola son: concentración de sólidos disueltos o sales, presencia relativa de sodio, contenido de carbonatos y bicarbonatos y concentración de otros iones tóxicos para la planta como cloro y boro. A continuación se muestran los parámetros utilizados para clasificar la calidad química del el agua de riego de acuerdo a lo mencionado por el autor anterior.

2.7.1. Textura.

De acuerdo a Castellanos, et al. (2000) la textura indica la proporción de arcilla, limo y arena, esta se puede agrupar en fina, media y gruesa. Influye en la cantidad y disponibilidad de agua, así como en las condiciones de aireación y drenaje.

2.7.1.1. Textura Gruesa (Arenosa o Ligera).

De acuerdo al autor anterior este grupo se compone principalmente de arena siendo el 50 por ciento de este elemento y de al menos un 20 por ciento de arcilla, esta distribución de porcentajes engloba a grupos como: Arenosos, Franco Arenosos. Aunque estos suelos pueden labrarse fácilmente (siendo su principal ventaja) no son eficientes al retener nutrientes y agua debido a su alta cantidad de poros y a su baja concentración de arcillas.

2.7.1.2. Textura Media.

El autor anterior indica que estos suelos suelen componerse de arcilla en un 30-40 por ciento y menos del 50 por ciento de arena. Las texturas que engloba este grupo son: Franco Limoso, Franco, Franco Arcillo Arenoso, Franco Arcillo Limoso y Franco

Arcilloso. Son ideales para la producción debido a su alta capacidad para retener agua y nutrientes, aunque son propensos a la compactación Castellanos, et al. (2000).

2.7.1.3. Textura Fina (Arcillosa o pesada)

Están compuestos por más de 40 por ciento de arcillas y más de 60 por ciento de limos. Sus grupos texturales son: Arcilloso, Arcilloso Limoso, Arcilloso Arenoso y Limoso. Tienen una alta capacidad para retener agua y nutrientes y aunque son naturalmente fértiles suelen compactarse con demasiada facilidad y esto sin un buen manejo puede ocasionar problemas de drenaje Castellanos, et al. (2000).

2.7.2. Drenaje Agrícola

Consiste en evacuar los excesos de agua superficiales y subterráneos por debajo de la zona radical de la planta para que esta no afecte el rendimiento de los cultivos, utilizando sistemas como drenes subterráneos o canales. Muchas veces los drenes subterráneos pueden eliminar concentraciones de sales en el suelo que son perjudiciales para los cultivos (Gavilánez, 2020).

2.7.3. Clima

El clima dentro de la agricultura es importante debido a cómo afecta la demanda de nutrientes tomados por la planta, ya que diversos factores como, el sol (radiación), humedad (en suelo y aire), el viento, temperatura y precipitación son solo algunos factores

que influyen directamente en la planta y en sus procesos tanto químicos como físicos para desarrollarse así como en la asimilación de nutrientes, cabe mencionar que los parámetros anteriores también nos dará una idea sobre el tipo de sistema de riego que se usara. El no tomar en cuenta dichos parámetros podría originar una baja producción, significando pérdidas económicas.

2.7.4. Parámetros para Determinar la Calidad Química del Agua.

De acuerdo a Bolívar (2025) la calidad química del agua para riego se determina con los siguientes parámetros:

- Por su conductividad eléctrica (CE)

Cuadro 1. Clasificación por (CE).

CLASIFICACION	$\mu\text{S/ cm}$ ($\mu\text{mhos/ cm}$)
C1.Agua baja en sales	<250
C2.Agua media en sales	250-750
C3.Agua alta en sales	750-2250
C4.Agua muy alta en sales	>2250

- Por su Salinidad Efectiva (SE)

Se calcula con las siguientes formulas:

- Si $\text{Ca} > \text{CO}_3 + \text{H CO}_3 + \text{SO}_4$; Entonces:

$$\text{SE} = \text{Suma de cationes} - (\text{CO}_3 + \text{H CO}_3 + \text{SO}_4)$$

- Si $\text{Ca} < \text{CO}_3 + \text{H CO}_3 + \text{SO}_4$ pero $\text{Ca} > \text{CO}_3 + \text{H CO}_3$; Entonces:

$$\text{SE} = \text{Suma de cationes} - \text{Ca}$$

- Si $\text{Ca} < \text{CO}_3 + \text{H CO}_3$; pero $\text{Ca} + \text{Mg} > \text{CO}_3 + \text{H CO}_3$; Entonces:

SE= Suma de cationes – ($\text{CO}_3 + \text{H CO}_3$)

- Si $\text{Ca} + \text{Mg} < \text{CO}_3 + \text{H CO}_3$; Entonces:

SE= Suma de cationes – ($\text{Ca} + \text{Mg}$)

Cuadro 2. Clasificación por (SE).

CLASIFICACION	Meq/l
Buena	< 3
Condicionada	3-15
No recomendable	> 15

- Por su Salinidad Potencial (SP)

Cuadro 3. Clasificación por (SP).

CLASIFICACION	Meq/l
Buena	< 3
Condicionada	3-15
No recomendable	> 15

- Por su Relación de Absorción de Sodio (RAS)

Cuadro 4. Clasificación por (RAS).

CLASIFICACION	
S1.Baja RAS	0-10
S2.Media RAS	10-18
S3.Alta RAS	18-26
S4.Muy Alta RAS	>26

- Carbonato de Sodio Residual (CSR)

Cuadro 5. Clasificación por (CSR).

CLASIFICACION	Meq/l
1. Buena	<1.25
2. Condicionada	1.25-2.50
3.No recomendable	>2.50

- Por ciento de Sodio Posible (PSP).

Cuadro 6. Clasificación por (PSP).

CLASIFICACION	%
Buena	<50
Condicionada	>50

- Contenido de Elementos Tóxicos

Cuadro 7. Clasificación de acuerdo a Elementos Tóxicos

CLASIFICACION		
	Boro (B) ppm	Cloro (Cl) meq/l
Buena	<0.3	<1
Condicionada	0.3-4	1-5.0
No recomendable	>4	>5.0

Boro (Scotfield 1936).

Cuadro 8. Clasificación de Tolerancia de cultivos al Boro.

CLASIFICACION	ppm
Cultivos Sensibles	0.3-1.0
Cultivos Semitolerantes	1.0-2.0
Cultivos Tolerantes	2.0-4.0

Cuadro 9. Contenido de Boro por cultivo.

CONTENIDO DE BORO mg/l	CULTIVO
0.7-1.0	Fresa, Chile
1.0-2.0	Chícharo, Pepino
2.0-4.0	Lechuga, Calabacita, Melón
4.0-6.0	Tomate

Mass (1986); Kemeth (1990).

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Localización Geográfica.

Se tomaron muestras de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de La Estancia (PTAR-La Estancia) con las siguientes coordenadas geográficas: Latitud 20 23.445' N; Longitud 99 12.958' W y altitud de 1805 msnm como se muestra a continuación en la Figura 7 (Google Earth,2009).



Figura 7. Localización de la PTAR- La Estancia (Google Earth pro-2024)

3.2. Muestreo

El muestro se llevó a cabo en el mes de abril del 2025 en diferentes sitios como lo son: influente (figura 8) , efluente (figura 9) y humedal artificial (figura 10). Se usaron de tres recipientes de plástico previamente lavados con el agua problema . Las muestras se etiquetaron y se guardaron en frio para posteriormente realizar los parámetros correspondientes y determinar el cumplimiento de los métodos, parámetros y Normas Oficiales Mexicanas como se muestran en el Cuadro 10. Estos se determinaron en el Laboratorio de Calidad de Aguas y Fertilidad de Suelos del Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro sede Saltillo.



Figura 8. Sitio de muestreo "Influente" en la PTAR-La Estancia



Figura 9. Sitio de muestreo "Humedal Artificial" en la PTAR-La Estancia



Figura 10. Sitio de muestreo "Efluente" en la PTAR-La Estancia.

Cuadro 10. Parámetros, métodos y normas determinados para las muestras.

Parámetro	Método	NOM-MX
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) (CE)	Conductivímetro	NMX-AA-008
pH	Potenciómetro	NMX-AA-008
Sólidos Totales (mg/l) (ST)	Método gravimétrico	NMX-AA-034
Sólidos Totales Volátiles (mg/l) (STV)	Método gravimétrico	NMX-AA-034
Sólidos Totales Fijos (mg/l) (STF)	Método gravimétrico	NMX-AA-034
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l) (SST)	Método gravimétrico	NMX-AA-034
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/l) (SSV)	Método gravimétrico	NMX-AA-034
Sólidos Suspendidos Fijos (mg/l) (SSF)	Método gravimétrico	NMX-AA-034
Sólidos Disueltos Totales (mg/l) (TSD)	Método gravimétrico	NMX-AA-020
Sólidos Sedimentables (ml/l) (SS)	Cono Imhoff	NMX-AA-004
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Método de reflujo abierto	NMX-AA-030/2
Demanda Bioquímica de Oxígeno ₅ (ppm) (DBO ₅)	Medidor portátil de oxígeno disuelto (HANNA), modelo “HI 9146”	NMX-AA-028
Grasas y Aceites (mg/l) (G y A)	Método gravímetro	NMX-AA-005
Coliformes Totales (NMP/100ml) (CT)	Método del número más probable	NMX-AA-042
Coliformes Fecales (NDP/100 ml) (CF)	Método del número más probable	NMX-AA-042

Como el reúso de esta agua tratada es para riego es necesario determinar su calidad agronómica, señalando los parámetros, métodos y normas aplicadas, esto se muestra en el cuadro 11.

Cuadro 11. Parámetros, Métodos y Normas determinados para la calidad agronómica del agua residual.

Parámetro	Método	NOM-MX
Calcio	Titulación con EDTA	NMX-AA-072
Magnesio	Titulación con EDTA	NMX-AA-072
Carbonatos	Titulación con ácido sulfúrico	NMX-AA-072
Bicarbonatos	Titulación con ácido sulfúrico	NMX-AA-072
Cloruros	Titulación con nitrato de plata	NMX-AA-073
Sulfatos	Método gravimétrico	NMX-AA-074

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el cuadro 12 se concentran los resultados de cada parámetro de los sitios muestreados, para posteriormente analizarlos y compararlos con las normas correspondientes.

Puede observarse que la concentración de sales disueltas y los Sólidos Totales Fijos (STF) incrementan conforme avanzó el proceso de tratamiento, esto puede deberse a la liberación de iones debido a la descomposición de raíces y rizomas en etapas avanzadas en el crecimiento del tule (*Typha domingensis*) coincidiendo con lo mencionado por Vera, et al. (2010) de igual forma García, et al. (2023) donde se muestra en sus resultados que tanto la absorción de Nitrógeno como el aumento de la CE se ven afectadas de acuerdo a las etapas de crecimiento de *Typha domingensis*, siendo la etapa inicial donde se observa una alta absorción de Nitrógeno, esto debido a que en esta etapa los requerimientos de nutrientes en la planta son mayores provocando que la CE baje, y en la etapa de senescencia se puede observar una reducción en la absorción de nitrógeno, respecto a la CE esta se ve incrementada debido a que en esta etapa la planta suele empezar el proceso de descomposición de biomasa. Camargo, et al. (2024) demuestra resultados similares respecto a que la CE puede aumentar en etapas avanzadas en la maduración del tule.

Todos los demás parámetros disminuyeron, el pH bajo ligeramente en el área del tule, incrementándose ligeramente en la salida, prácticamente igual en el rango de neutro; tanto los Sólidos Totales, Sólidos Totales Volátiles, Sólidos Suspendidos Volátiles, Sólidos Suspendidos Totales y Sólidos Sedimentables disminuyeron esto se puede

traducir a un favorecimiento al no taponamiento de los emisores de riego. La DQO permaneció constante prácticamente igual, no así, la DBO₅ que disminuyó un 90 por ciento lo que significa que los microorganismos demuestran una gran eficiencia al momento de oxidar el contenido de materia orgánica (M.O) presente. En cuanto a los Coliformes Totales y Fecales fueron reducidos prácticamente en su totalidad, lo que refleja la eficiencia del tule para la remoción de estos.

Cuadro 12. Resultados de las diferentes etapas del proceso de tratamiento.

Parámetro	Influente	Zona de Tule	Efluente
Conductividad Eléctrica (CE) (μ S/ cm)	3.000	3.137	3.357
pH	6.85	7.248	6.756
Sólidos Totales (ST) (mg/l)	1417	1285	1299
Sólidos Totales Volátiles (STV) (mg/l)	539	380	297
Sólidos Totales Fijos (STF) (mg/l)	878	905	1002
Sólidos Suspendidos Totales (SST) (mg/l)	16	3	7
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) (mg/l)	14	3	5
Sólidos Suspendidos Fijos (SSF) (mg/l)	2	0	2
Sólidos Disueltos Totales (SDT) (mg/l)	63	114	113
Sólidos Sedimentables (SS) (ml/l)	2.1	0.9	0.8
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	50.325	50.3625	50.3037
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) (mg/l)	40.2	28.8	3.66
Grasas y Aceites (G y A) (mg/l)	5,265	13,180	1,075
Coleiformes Totales (NMP/100ml) (CT)	28	13	0
Coleiformes Fecales (NDP/100 ml) (CF)	9.4	2	0

En el cuadro 13 se muestra el cumplimiento de la NOM-003-1997. Demostrando que el sistema de Humedales Artificiales, para el tratamiento de aguas domesticas es efectivo ya que gran parte de los sólidos suspendidos y sedimentables son removidos de igual forma nos muestra un cantidad mínima de carga orgánica presente esto se ve reflejado en los bajos niveles de DBO Y DQO. Cabe mencionar que existe un exceso de grasas y aceites, siendo muy poco efectivo para removerlas, aunque para el uso agrícola que se le dará al agua esto no presenta un problema.

Cuadro 13. Comparativa de resultados obtenidos respecto a la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Parámetros que medir	Límites permisibles máximos	Lugar
	NOM-003-SEMARNAT-1997	Efluente
Grasas y Aceites (G y A) (mg/L)	15	1,075
Solidos Suspendidos Totales (SST) (mg/L)	30	7
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) (mg/L)	30	3.66
Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L)	N/A	50.30
Conductividad Eléctrica (CE) (µS/ cm)	N/A	3,000
pH	N/A	6.756
Solidos Sedimentables (SS) (ml/L)	N/A	0.8
Coleiformes Totales (NDP/100 ml)	N/A	0
Coleiformes Fecales (NDP/100 ml)	1,000	0

Los datos en el Cuadro 14 se muestran los resultados del análisis donde se obtuvieron aniones y cationes contenidos en el efluente e influente donde se observa que los CO_3^{2-} y SO_4^{2-} disminuyeron significativamente, lo que reduce significativamente la probabilidad de formación de compuestos insolubles con Ca^{2+} y Mg^{2+} , que podrían depositarse en los emisores; los HCO_3^- y el Cl^- permanecen igual, lo que quiere decir, que como entran salen.

Analizando específicamente la CE, se incrementa en el efluente, explicando esta respuesta por Vera, et al. (2010) donde el tule extrae las sales durante su ciclo de desarrollo e incorporándolas en el rendimiento.

Cuadro 14. Resultado de Aniones y Cationes para las diferentes etapas del proceso del tratamiento.

Aniones y Cationes		
	Influente	Efluente
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	3000	3357
pH	6.8	6.75
Calcio meq/l	4.1	5.5
Magnesio meq/l	7.8	9
Carbonatos meq/l	19.4	9.8
Bicarbonatos meq/l	3.2	3.2
Cloruros meq/l	0.6	0.6
Sulfatos meq/l	11.13	7.43

En el cuadro 15 se muestra la clasificación agronómica, que es C4, S1. Agua muy alta en sales y baja en sodio, además de mostrar una CE elevada, esto condiciona el uso de cultivos tolerantes a las sales y advierte de un posible problema de acumulación de sales en el perfil del suelo, requiriéndose de un buen drenaje en un futuro así como de Lr extras (requerimiento de lavado R-L) para evitar la acumulación de sales en la zona radical. Este problema se agrava dependiendo del sistema de riego que se usa, agravándose con el superficial o melgas causando compactación de suelos y acumulando cada vez más sales, así como posibles afectaciones en el rendimiento causando pérdidas significativas.

Cuadro 15. Índices de clasificación del agua para riego según USDA (1964).

Parámetros	Resultados	Clasificación
CE	3357	C4, Muy Alta en sales
pH	6.75	Neutro
SE	1..5	Buena
RAS	---	Bajo
SP	4.315	Clase 1, Buena
CSR	1.5	Condicionada
Cl	0.6	Buena

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El contenido de Grasas y Aceites (G y A) es elevado. Esto se debe a que no se tienen implementado algún sistema de remoción de grasas por lo que se recomienda instalar un desgrasador.
- El proceso de tratamiento de AR cumple con la NOM-003-SEMARNAT-1997, agua utilizada para riego de cultivos tolerantes.
- Se recomienda dar mantenimiento diario de la PTAR-La Estancia para darle al agua residual (AR) tratada un uso sustentable.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Alfárez R., L.E. y N. Nieves P.2019. Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR): impacto ambiental esperado e impacto ambiental provocado. Revista Caribeña de Ciencias Sociales,(6):p.42.
- Arreguín C., F. I., M. López P. y C. E. Cervantes J.2020. Los retos del agua en México. Tecnología y Ciencias del Agua, 11(2):pp.341-371.Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, México.
- Bolívar D.M.2005. Apuntes de la clase de Suelos, Salinos y Sódicos. Departamento de Riego y Drenaje. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro .Mexico.
- Camargo A., A., R. García A., J.A. Rodríguez C., R. Ruiz C., E. García R., J. P. Molina A. y H.L Chávez G.2024. Evaluación de la remoción de nitrógeno total en humedales con Typha domingensis y grava compacta. Ciencia Nicolaíta.(92):pp.102-106.Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.
- Castañeda V. , A. A., y H. Flores L. 2013. Tratamiento de aguas residuales domesticas mediante plantas macrófitas típicos en Los Altos de Jalisco, México. PAAKAT: Revista de Tecnología y Sociedad, 3(5).Universidad de Guadalajara. Jalisco, México.
- Castellanos, J.Z., J.X. Uvalle B. y A. Aguilar S.2000. Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. (2° Ed).Mexico.

Comisión Nacional del Agua. 2023. Estadísticas del Agua en México. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional del Agua. 2020. Sistema Nacional de Información del Agua. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional del Agua. NMX-AA-004-SCFI-2013. Análisis de agua- Medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional del Agua. NMX-AA-005-SCFI-2013. Análisis de agua- Medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional del Agua. NMX-AA-008-SCFI-2016. Análisis de agua- Medición pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional del Agua. NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional del Agua. NMX-AA-030/1-SCFI-2012. Análisis de agua- Medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional del Agua. NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua- Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional del Agua. NMX-AA-042-SCFI-2015. Análisis de agua- Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termo tolerantes) y Escherichia coli- Método de prueba. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional del Agua. NMX-AA-072-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional del Agua. NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. SEMARNAT. México.

Comisión Nacional del Agua. NMX-AA-074-SCFI-2014. Análisis de agua- Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. SEMARNAT. México.

Díaz C., E., A.R. Alavarado G. y K.E. Camacho C.2012. El tratamiento de agua residual domestica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) de San Miguel Almaya, México. Quivera: Revista de Estudios Territoriales.14(1): pp.78-97. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Mexico.

Diario Oficial de la Federación (DOF).2013.Análisis de agua- Medición de Solidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

García A., R., E. García R. y N.E. Pérez A.2023. Remoción de contaminantes del agua en humedales artificiales de flujo subsuperficial, utilizando Typha domingensis, tezontle y grava triturada y su relación con la conductividad hidráulica. Ciencia

- Nicolaíta.(87):pp.108-120.Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
Morelia, Michoacán, México.
- Gavilánez L. F. C. 2020. El Drenaje Agrícola y sus Elementos de Diseño. (1° ed.). Mawil.
Quito, Ecuador.
- H. Kadlec, R., & D. Wallace, S. 2009. Treatment Wetlands. CRC Press. EUA.
- Metcalf, & Eddy.2014. Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery (5°
Ed., Vol. 1). McGraw-Hill.
- Muñoz, M., y B. Aldás, M. 2017. Sistemas de depuración de aguas residuales. Escuela
Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
- Noyola R. , A., E. Vega G. , J.G. Ramos H. y C.G. Calderón H. 2000. Alternativas de
tratamientos de aguas residuales. (3° Ed): Instituto Mexicano de Tecnología del
Agua. México, D.F.
- Ramallo, R.1983. Tratamiento de Aguas Residuales. REVERTÉ, S.A. Quebec, Canadá.
- Romero R., J. A.2010. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y principios de diseño.(3°
Ed). Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia.
- Rosas B., M. y E.M García S.2023. Percepción ambiental del uso de agua residual de
productores agrícolas del Valle del Mezquital, Hidalgo. Observatorio
Medioambiental.26:pp.181-205.Universidad Complutense de Madrid. España.
- Rul-lán B.,G.2003. El planeta Agua. Revista de Fomento Social. 58,(232),pp. 681-
728.Universidad Loyola Andalucía. Córdoba, España.

- Torres, P. 2012. Perspectivas del tratamiento anaeróbico de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. Revista EIA(18):pp. 115-129. Escuela de Ingeniería de Antioquia. Colombia
- Vázquez A., A., L.J. Cajuste , R. Carrillo G., B. Zamudio G., E. Álvarez S. y J. Castellanos R. 2005. Límites permisibles de acumulación de cadmio, níquel y plomo en suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo. TERRA Latinoamericana, 23(4): pp. 447-455. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.
- Vázquez A., A., L. J. Cajuste , C. Siebe G. , G. Alcántar G. , y M. De L. de la Isla. de B. 2001. Cadmio, Níquel y Plomo en el agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Agrociencia, 35(3): pp.267-274. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México.
- Vera, A., C. Andrade , E. Flores , M. Núñez , C. Cárdenas y E. Morales. 2010. Removal of nutrients and organic matter in a constructed wetland, in function of the development of the macrophyte *Typha dominguensis* Pers. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, 33(2): pp.153-163. Universidad del Zulia. Maracaibo, Zulia, Venezuela.