

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



**Monitoreo de Eficiencia de Tratamiento de Aguas Residuales en la
PTAR-UAAAN**

Por:

FELIPE HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

TESIS

**Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Noviembre, 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Monitoreo de Eficiencia de Tratamiento de Aguas Residuales en la PTAR-UAAAN

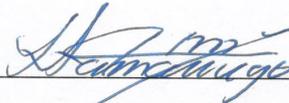
POR:

FELIPE HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

TESIS

**Presentada como Requisito Parcial Para Obtener el Título de:
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Luis Samaniego Moreno

ASESOR PRINCIPAL



Dr. Juan Nápoles Armenta
ASESOR EXTERNO



M.C. Aaron Isain Melendres Alvarez
ASESOR



M.C. Sergio Sánchez Martínez

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA



Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Noviembre 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE
Monitoreo de Eficiencia de Tratamiento de Aguas Residuales en la PTAR-UAAAN

POR:
FELIPE HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ
TESIS

Presentada como Requisito Parcial Para Obtener el Título de:
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobada por el H. Jurado Examinador:



Dr. Luis Samaniego Moreno
PRESIDENTE DEL JURADO



Dr. Juan Nápoles Armenta
VOCAL



M.C. Aaron Isam Melendres Alvarez
VOCAL



M.C. Sergio Sánchez Martínez
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA



Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

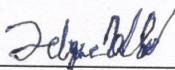
Noviembre 2022

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor quien es responsable directo, jura bajo protesta decir la verdad, que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (copiado y pegado); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como copia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin comillas; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. En este sentido, lo anterior puede ser confirmado por el lector, estando consciente de que, en caso de comprobarse plagio en el texto, no respetar los derechos de autor, edición o modificación, será sancionado por las autoridades correspondientes. Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias generadas en caso de existir cualquier tipo de plagio y declaro que este trabajo es original.

Autor principal



Felipe Hernández Hernández

AGRADECIMIENTOS

Al *Creador del universo* por permitirme vivir momentos únicos, darme la familia y amigos que tengo, y llegar hasta donde estoy ahora con las pruebas que puso en mi camino.

A la *UAAAN* por recibirme y ayudarme en mi crecimiento profesional, por ser mi hogar durante cinco años, por las oportunidades que me brindo estar en esta casa de estudios.

A *mi madre y a mi padre* por sus consejos que me han dado en cada momento importante de mi vida. A mi *hermana, hermano, sobrina y abuelita* por el tiempo y afecto que me han regalado.

Al *Dr. Luis Samaniego Moreno* por su ayuda como tutor y asesor principal en cada instante de la carrera, por sus consejos, la confianza y paciencia para realizar el proyecto de investigación de la tesis. Al *Dr. Juan Nápoles Armenta* por el apoyo personal y sus consejos para la redacción del trabajo de tesis y al *M.C. Aarón Isain Melendres Álvarez* por ser parte de la revisión de tesis.

A mis amigos y compañeros de carrera en especial a *Miguel Alfaro* por acompañarme en la mayor parte del trabajo de laboratorio en el desarrollo de la tesis; a *Adrián Morales, ing. Armin Pérez, América Cruz, Daniel Ortega, Omar Becerra, Carlos Vázquez, Dariciel Pérez, ing. Alan Rivera y Jhovanny Maldonado* por haberme ayudado en el momento que lo necesite, por las alegrías y momentos difíciles que pasamos al estudiar, gracias por todo el tiempo que compartimos; a los demás aunque no los mencione, son muy importantes para mí. A los compañeros de cada clase de la universidad por el granito de arena que me aportaron. A cada persona que he conocido y ha dejado una huella de aprendizaje en mi vida tanto personal como profesionalmente.

A mis colegas *Gabriel Cantor y Jhonni Espinoza*, por su compañía en el laboratorio, a la *Q.F.B Ana Paola Moreno* y la *Lic. Ma. Del Socorro Mireles* por su ayuda en laboratorio; a todo el personal y profesores del *departamento de riego y drenaje*, en especial a *Vicky*, a la *Dra. Manuela Bolívar Duarte* y al *Dr. Javier de Jesús Cortes Bracho*, a los demás maestros de la *UAAAN* por brindarme parte de su conocimiento y experiencia. Al *ing. V. Cárdenas Ponce* y al *ing. R.A. López Santiago* por ayudarme en el semestre de prácticas. A *Víctor Salas* por su tiempo y consejos. A las señoras *Tommy Briones y Chela Soto*, gracias por la confianza durante los años que estuve estudiando; a mi tío *Berna Vázquez* y su familia por ayudarme a conocer la universidad.

DEDICATORIA

A mis padres

Sr. Esteban Hernández Rojas y Sra. Sofía Hernández Vázquez

Les doy gracias por darme la vida, además de su amor y apoyo incondicional, por la motivación que me dieron a seguir creciendo personalmente y a tener un logro más en mi formación académica. A ustedes por educarme, e impulsarme a estudiar la universidad. Les debo todo lo bueno que he logrado y lo que soy, esto es gracias a sus desvelos, esfuerzos y sacrificios que han hecho por mí.

A mis hermanos

Valeria Hernández Hernández y Juan Diego Hernández Hernández

Por ser parte importante de mí, por brindarme parte de su tiempo compartiendo momentos únicos que hemos pasado, alegrías y tristezas, por haberme ayudado demasiado cuando lo necesite, por sus enseñanzas, los quiero mucho.

A mi sobrina

Candy Janeth García Hernández

Gracias por tu alegría y sonrisas con las que me recibes cuando te veo, por cada ocasión que me permites convivir contigo.

A mis abuelitas y abuelo

Paz Vázquez por sus palabras de aliento para concluir este proyecto de mi vida, a ***Ma. Cirila Cortes*** por sus bendiciones, ***Inés Rojas (†)*** por sus consejos, y ***Juan Hernández***.

A mis tíos y primos

Por los aprendizajes y los momentos que me compartieron durante mi infancia y juventud.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE CUADROS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo General	2
2.2 Objetivos específicos.....	2
III. HIPÓTESIS.....	2
IV. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
4.1 Agua en el mundo.....	3
4.2 Agua en México	3
4.3 Usos del agua.....	3
4.4 Contaminación del agua	4
4.5 Clasificación de agua residual.....	4
4.6 Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales	5
4.7 Principales métodos de tratamiento de las aguas residuales	5
4.8 Tratamiento del agua residual	6
4.9 Sistemas naturales	6
4.10 Sistemas convencionales.....	7
4.10.1 Tratamiento preliminar y primario.....	7
4.10.2 Tratamiento secundario.....	8
4.10.3 Tratamiento terciario.....	9
4.11 Sistemas combinados.....	10
4.12 Evaluación de los sistemas de tratamiento	11
4.13 Evaluación hidrodinámica	11
4.14 Evaluación de remoción de contaminantes.....	11

4.15	Parámetros de caracterización del agua residual	12
4.15.1	Potencial de hidrógeno (pH)	12
4.15.2	Conductividad eléctrica (CE).....	12
4.15.3	Coliformes fecales (CF)	12
4.15.4	Demanda química de oxígeno (DQO)	12
4.15.5	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	12
4.15.6	Turbidez	12
4.15.7	Sólidos suspendidos totales (SST)	13
4.16	Normatividad	13
V.	MATERIALES Y MÉTODOS	15
5.1	Localización	15
5.2	Sistema de tratamiento	15
5.2.1	Pretratamiento	16
5.2.2	Tratamiento secundario.....	16
5.3	Clima	17
5.4	Determinación de parámetros de calidad del agua y muestreo del AR.....	22
5.4.1	Potencial de hidrógeno (pH)	22
5.4.2	Conductividad eléctrica (CE).....	22
5.4.3	Coliformes fecales (CF)	22
5.4.4	Demanda química de oxígeno (DQO)	22
5.4.5	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	23
5.4.6	Turbidez	23
5.4.7	Sólidos suspendidos totales (SST)	23
VI.	RESULTADOS.....	24
6.1	Potencial de hidrógeno (pH).....	24
6.2	Conductividad eléctrica (CE).....	24
6.3	Coliformes fecales (CF)	25
6.4	Demanda química de oxígeno (DQO).....	26
6.5	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅).....	27
6.6	Turbidez.....	27
6.7	Sólidos suspendidos totales (SST)	28
6.8	Evaluación de la remoción	29

6.8.1	Remoción en DQO.....	29
6.8.2	Remoción en SST.....	29
6.8.3	Remoción en turbidez	30
6.8.4	Remoción en CF.....	30
6.8.5	Remoción en DBO ₅	31
VII.	DISCUSIÓN	32
VIII.	CONCLUSIÓN	32
IX.	RECOMENDACIONES	33
X.	BIBLIOGRAFÍA	34

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Sistemas de tratamiento secundario para PTAR	8
Cuadro 2. PTAR que operan en México por tipo de tratamiento.....	10
Cuadro 3. Fechas y número de prueba en el análisis de cada parámetro.....	19

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución del volumen total de agua dulce concesionado por uso consuntivo y por fuente de extracción.....	4
Figura 2. Evolución del agua residual generada, colectada y tratada en México (2003 - 2019)	5
Figura 3. Principales procesos de tratamiento de AR municipales, por caudal tratado	6
Figura 4. Localización de la PTAR – UAAAN.	15
Figura 5. Vista de Planta de la PTAR - UAAAN.	16
Figura 6. Precipitación registrada en Observatorio Atmosférico Saltillo.	20
Figura 7. Temperatura registrada en Observatorio Atmosférico Saltillo.....	20
Figura 8. Humedad relativa registrada en Observatorio Atmosférico Saltillo.....	21
Figura 9. Radiación solar registrada en Observatorio Atmosférico Saltillo.	21
Figura 10. pH de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo.....	24
Figura 11. CE de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo	24
Figura 12. CF de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo.....	25
Figura 13. CF de Agua Residual en efluente de la PTAR - UAAAN Saltillo.	26
Figura 14. DQO de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo.....	26
Figura 15. DBO ₅ de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo.....	27
Figura 16. Turbidez de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo	27
Figura 17. SST de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo.....	28
Figura 18. Remoción en DQO de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo.....	29
Figura 19. Remoción en SST de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo.	29
Figura 20. Remoción en turbidez de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo.	30
Figura 21. Remoción en CF de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo.	30
Figura 22. Remoción en DBO ₅ de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo.....	31

RESUMEN

La disponibilidad del agua en el mundo ha disminuido con el paso de los años y con el aumento de la población, dentro de las causas se encuentran: las necesidades de la sociedad, junto con la contaminación generada del vital recurso, provocando que escasee.

En México se tiene las zonas áridas y su condición climática, como lo es la sequía, que afecta la zona norte del país principalmente, además la concentración de población es mayor en esta parte de la República Mexicana, donde se tiene la necesidad de ser eficiente en el uso del agua, ya que se complica el futuro de la situación de la sociedad contemplando el recurso hídrico, ya que no será apto para todos los fines requeridos.

Por lo tanto se da la necesidad de buscar alternativas para obtener más recurso hídrico disponible, una forma de ellas, es la de tratamiento de aguas residuales el cual se puede realizar con diferentes procesos, así mismo, la calidad del agua tratada se determina mediante diversos parámetros, como lo son: Coliformes Fecales (CF), Conductividad Eléctrica (CE), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Potencial de Hidrogeno (pH), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Turbiedad, entre otros; para así evaluar si el agua es adecuada para distintos fines de acuerdo a estándares de calidad y normas oficiales que dictan los límites requeridos para un determinado uso.

Debido a esto, desde el veintitrés de febrero al ocho de junio del año dos mil veintidós, se realizó muestreos en los flujos de entrada (Influyente) y de salida (Efluente) de la Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), ubicada dentro de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) en Buenavista, Saltillo, Coahuila. Posteriormente se realizó el análisis correspondiente de cada muestra en las instalaciones del Laboratorio de Calidad de Aguas del Departamento de Riego y Drenaje, que se localiza dentro de la UAAAN.

La eficiencia de remoción en general estuvo en buenas condiciones, obteniéndose 92.44 y 93.11 % en DBO_5 , de 79.21 a 100% en SST, y de 98.44 a 99.99% en CF del tratamiento de la PTAR-UAAAN.

Palabras clave:

Eficiencia, remoción, agua residual, análisis, muestreo, parámetro, tratamiento, PTAR, efluente, influente.

ABSTRACT

The availability of water in the world has decreased over the years and with the increase in population, among the causes are: the needs of society, together with the pollution generated from the vital resource, causing it to become scarce.

In Mexico there are arid zones and their climatic condition, such as drought, which mainly affects the northern part of the country, in addition, the concentration of population is greater in this part of the Mexican Republic, where there is a need to be efficient in the use of water, since the future of the society's situation is complicated by contemplating the water resource, since it will not be suitable for all the required purposes.

Therefore, there is a need to look for alternatives to obtain more available water resources, one of them is the treatment of wastewater, which can be carried out with different processes, likewise, the quality of the treated water is determined by various parameters, such as: Fecal Coliforms (CF), Electrical Conductivity (EC), Biochemical Oxygen Demand (BOD5), Chemical Oxygen Demand (COD), Hydrogen Potential (pH), Total Suspended Solids (TSS), Turbidity, among others; in order to assess whether the water is suitable for different purposes according to quality standards and official regulations that dictate the limits required for a given use.

Due to this, from February twenty-third to June eight of the year two thousand and twenty-two, sampling was carried out in the inflows (Influent) and outflows (Effluent) of the Wastewater Treatment Plant (WWTP), located within from the Antonio Narro Autonomous Agrarian University (UAAAN) in Buenavista, Saltillo, Coahuila. Subsequently, the corresponding analysis of each sample was carried out in the facilities of the Water Quality Laboratory of the Department of Irrigation and Drainage, which is located within the UAAAN.

The removal efficiency in general was in good conditions, obtaining 92.44 and 93.11% in BOD5, from 79.21 to 100% in SST, and from 98.44 to 99.99% in CF of the WWTP-UAAAN treatment.

Keywords:

Efficiency, removal, wastewater, analysis, sampling, parameter, treatment, WWTP, effluent, influent.

I. INTRODUCCIÓN

Las fuentes de agua disponibles han sido contaminadas gradualmente y fueron las causantes de muchas epidemias que diezmaron ciudades enteras en la Antigüedad. El hombre tardó bastante tiempo en darse cuenta de que el agua que estaba consumiendo era la causante de muchas de las enfermedades que estaba padeciendo y solo a finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX empezó a implementar procesos para tratar y desinfectar el agua que consumía (Sierra, 2011).

Toda actividad humana tiene asociada una generación de aguas residuales que deben ser sometidas a un tratamiento que garantice la continuidad del ciclo de consumo del recurso. El tratamiento y disposición apropiada de las aguas residuales supone en conocimiento de las características físicas, químicas y biológicas de dichas aguas; de su significado y de sus efectos principales sobre la fuente receptora (Villanueva & Yance, 2017).

Actualmente, la disponibilidad de agua en cantidad suficiente y de buena calidad es una de las principales necesidades de cualquier población. El impacto en la calidad del agua en los recursos hídricos, generado por las descargas de las aguas residuales municipales, se ha convertido en un problema ambiental crítico y creciente, potencializado por el rápido crecimiento poblacional, la urbanización y lo relacionado con las considerables cantidades de residuos generados, reflejado en la limitación en su uso aguas abajo, ya que los vertimientos en cuestión alteran las condiciones de calidad del agua requerida para el abastecimiento de actividades específicas (doméstica, industrial, agrícola, pecuaria, etc.) y la vida acuática (Núñez, 2019).

El nivel de tratamiento de aguas residuales industriales y municipales de un país es generalmente un reflejo de su nivel de ingresos. En promedio, los países de ingresos altos tratan cerca del 70% de las aguas residuales que generan, mientras que esa proporción cae al 38% en los países de ingresos medios-altos y al 28% en los países de ingresos medios-bajos. En países de bajos ingresos, solo el 8% de las aguas residuales industriales y municipales se someten a algún tipo de tratamiento (Bokova & Ryder, 2017).

Se conocen como operaciones unitarias a los métodos de tratamiento en los que predominan los fenómenos físicos, y como procesos unitarios a los métodos que la eliminación de los contaminantes se realiza en base a procesos químicos o biológicos. En la actualidad, estas operaciones y procesos unitarios se agrupan entre sí para constituir los tratamientos primario, secundario y terciario (Hammeken & Romero, 2005).

La eficiencia del tratamiento es la “relación entre la masa o concentración removida y la masa o concentración aplicada, en un proceso o planta de tratamiento y para un parámetro específico. Puede expresarse en decimales o porcentaje”(Huamán & Palco, 2021).

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes en el funcionamiento de la PTAR de la UAAAN mediante la evaluación de la calidad de agua en el influente y efluente de la misma, a través del monitoreo mediante la medición y determinación de parámetros.

2.2 Objetivos específicos

Analizar el comportamiento de los resultados del tratamiento del agua residual en general de la PTAR – UAAAN.

Contrastar los resultados del efluente de la PTAR – UAAAN con los límites permitidos por la NOM-003-SEMARNAT-1997 (Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en riego en servicios al público con contacto indirecto u ocasional).

III. HIPÓTESIS

El nivel de tratamiento proporcionado a las aguas residuales (AR) por la PTAR de la UAAAN es el adecuado para el reusó en riego en servicios al público con contacto indirecto u ocasional de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Agua en el mundo

Según CONAGUA (2011) la disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1 386 billones de hm^3 , de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5%, es decir 35 billones de hm^3 , es agua dulce; de esta cantidad, casi el 70% no está disponible para consumo humano porque se encuentra en glaciares, nieve y hielo. Del agua que técnicamente está disponible para consumo humano, sólo una pequeña porción se encuentra en lagos, ríos, humedad del suelo y depósitos subterráneos relativamente poco profundos, cuya renovación es producto de la infiltración. Mucha de esta agua teóricamente utilizable se encuentra lejos de las zonas pobladas, lo cual dificulta o vuelve imposible su utilización efectiva. Se estima que solamente el 0.77% se encuentra como agua dulce accesible al ser humano.

4.2 Agua en México

Anualmente, México recibe aproximadamente 1 449 471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 72.1% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.4% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.4% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta los flujos de salida (exportaciones) y de entrada (importaciones) de agua con los países vecinos, el país anualmente cuenta con 451 584.7 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable (CONAGUA, 2019).

4.3 Usos del agua

En México, 76% del agua se utiliza en la agricultura, para el riego de cultivos; 14% en el abastecimiento público, que se distribuye a través de las redes de agua potable (domicilios, industrias y a quienes estén conectados a dichas redes); 5% en las termoeléctricas, para producir electricidad y 5% en la industria, donde las empresas toman el agua directamente de los ríos, arroyos, lagos y acuíferos del país (INEGI, n.d.). En la Figura 1, se puede observar el desarrollo en diferentes años de los usos del agua en México, que desde el principio hasta el final el principal uso es el agropecuario, con 78 al 76%; mientras que el abastecimiento público tiene del 13 al 14%; y la industria cuenta con el 9 al 10%, de volumen total de agua dulce concesionado por uso consuntivo y por fuente de extracción.

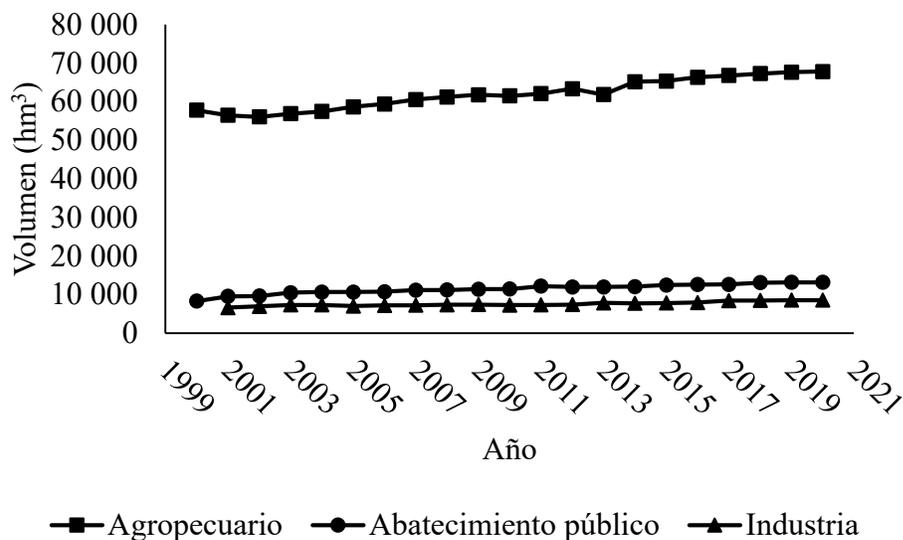


Figura 1. Evolución del volumen total de agua dulce concesionado por uso consuntivo y por fuente de extracción (SEMARNAT, 2022).

4.4 Contaminación del agua

La disponibilidad del agua depende de cantidad y calidad, aunque haya este recurso vital, si está contaminado, su empleo se limita porque se encuentra en una condición que no es acorde con algún uso determinado (Jimenez, 2001).

4.5 Clasificación de agua residual

Las descargas de aguas residuales se dividen en municipales y no municipales. Las municipales son generadas por la población y colectadas en los sistemas de alcantarillado urbano y rural, las no municipales son aquellas generadas por la industria y que se descargan a cuerpos de agua nacionales sin ser colectadas por sistemas de alcantarillado.

Las aguas residuales tratadas es el producto de haber tratado las AR después de haber eliminado los residuos líquidos transportados por el alcantarillado de una ciudad o zona rural debido al proceso en una planta de tratamiento municipal.

La evolución de la generación, colecta y tratamiento de las aguas residuales municipales, la cual se muestra en seguida en la Figura 2. Si notamos del inicio al final de la gráfica, se puede observar que del agua generada, de un ochenta al ochenta y seis por ciento fue colectada al paso de los años, mientras que un porcentaje de veinte cinco al cincuenta y seis se trató durante este periodo de tiempo.

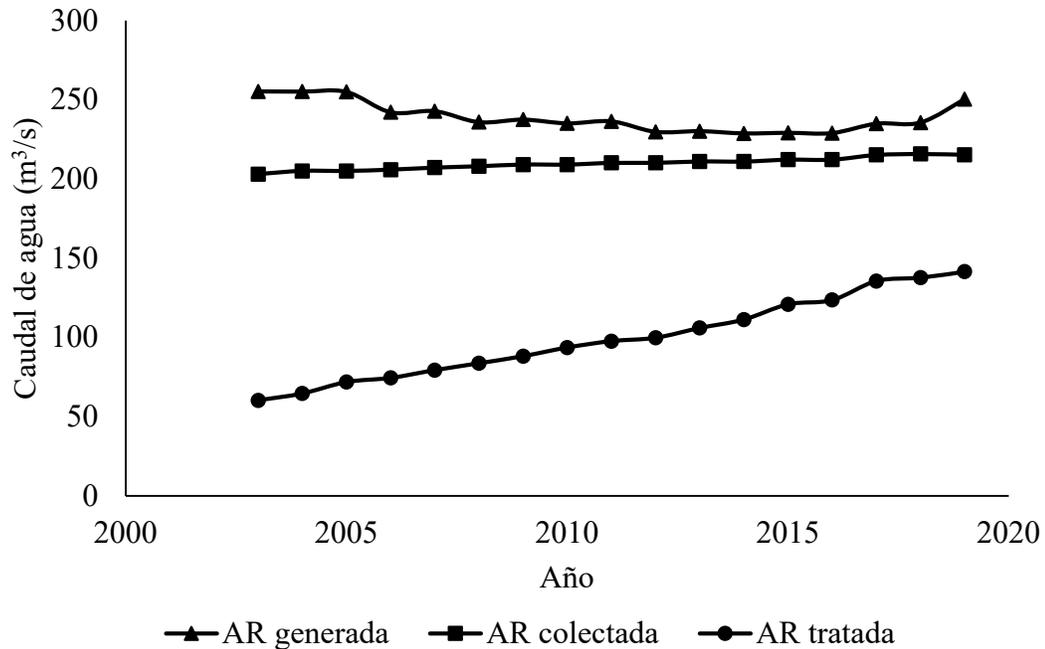


Figura 2. Evolución del agua residual generada, colectada y tratada en México (2003 - 2019) (SEMARNAT, 2020).

4.6 Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales

Las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTARM) son utilizadas en la remoción de contaminantes presentes en el agua residual cruda, y deben responder a una alta variabilidad temporal del flujo o caudal de entrada, así como a la variabilidad de las concentraciones o componentes propios de estas aguas residuales. Esto requiere una interacción en los mecanismos biológicos, físicos y químicos entre los procesos unitarios, los fenómenos hidrodinámicos y la adaptabilidad del consorcio microbiano ante las condiciones ambientales cambiantes (Rodríguez *et al.*, 2015).

Al final del año 2020 existían registradas en el país, 2 786 plantas municipales de tratamiento en operación, con una capacidad total instalada de $196\,749.51\text{ l s}^{-1}$, las que daban tratamiento a $144\,710\text{ l s}^{-1}$, equivalentes al 67.2% del agua residual generada y colectada en los sistemas municipales de alcantarillado del país. Al cierre del 2021 el registro de plantas en operación aumento a 2 872 instalaciones en relación con el año anterior con una capacidad instalada de $198\,603.55\text{ l s}^{-1}$ y un caudal tratado de $145\,341\text{ l s}^{-1}$, que significa incrementos que permitieron alcanzar una cobertura nacional de tratamiento de aguas residuales municipales del 67.5% (CONAGUA, 2021).

4.7 Principales métodos de tratamiento de las aguas residuales

A continuación, se observan los porcentajes de cada uno de los principales procesos utilizados para el tratamiento de aguas residuales (AR) municipales en la Figura 3, los de mayor porcentaje son lodos activados, dual y las lagunas de estabilización.

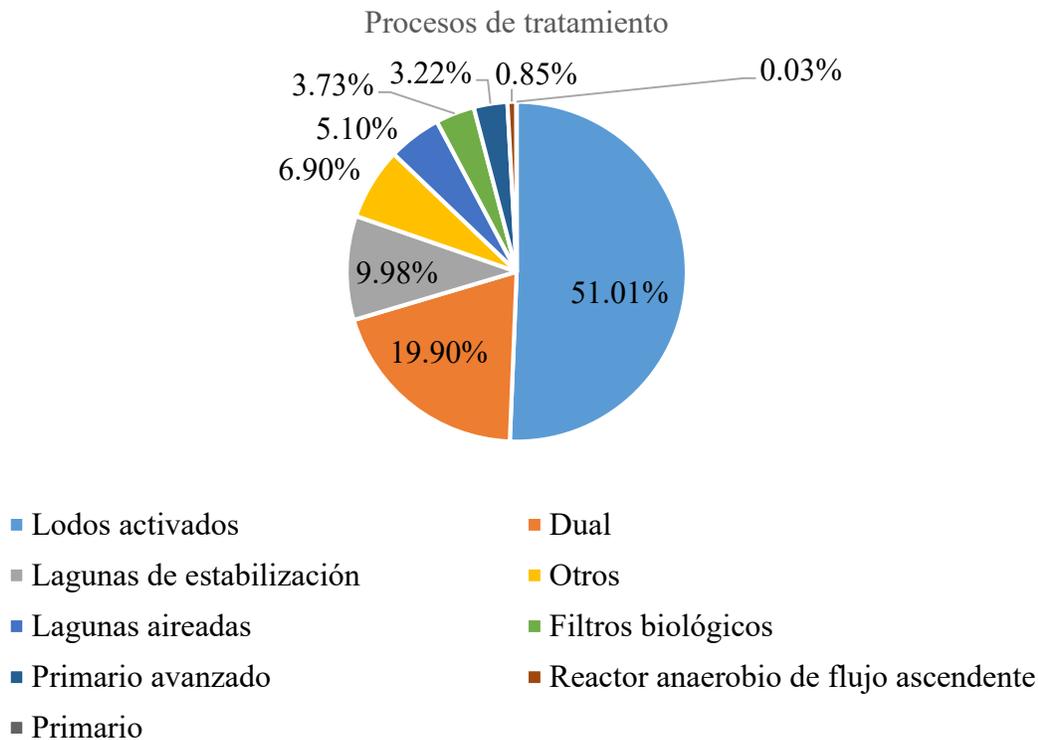


Figura 3. Principales procesos de tratamiento de AR municipales, por caudal tratado (CONAGUA, 2019).

4.8 Tratamiento del agua residual

Históricamente, los términos pre tratamiento y/o primario se refería a las operaciones físicas primarias, el termino secundario se refería a los procesos químicos o biológicos unitarios, y se conocía con el nombre de terciario o avanzado a las combinaciones de los tres. No obstante, estos términos son arbitrarios (Chávez, 2017).

4.9 Sistemas naturales

Los sistemas descentralizados en donde la recolección, tratamiento y reutilización de las aguas residuales se realiza en el lugar o cerca del punto de generación incluye letrinas y fosas sépticas, entre otros (Rivas & Paredes, 2014).

Entre estos se encuentran las lagunas anaerobias de maduración y los humedales construidos (HC). Otra tecnología que ha sido aplicada con éxito es la biofiltración sobre materiales orgánicos. La biofiltración es un proceso de filtración biológica lenta por percolación sobre materiales orgánicos (por ejemplo, residuos de poda) que actúan como un carbón activado que retiene contaminantes por adsorción, pero además, sobre este medio orgánico crece una biopelícula que permite la biodegradación de los contaminantes retenidos (Garzón *et al.*, 2016).

4.10 Sistemas convencionales

Los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales municipales, generalmente, están constituidos por un pretratamiento (remueve desechos gruesos), un tratamiento primario (separa materia orgánica particulada) y un tratamiento secundario (elimina materia orgánica disuelta) (Valdivielso, n.d.).

Las plantas de tratamiento de agua residual son alternativas a la descontaminación del agua donde basados en los contaminantes que se desean tratar se arman una serie de procesos físicos, químicos y biológicos para que tales contaminantes sean removidos. Cuando estas unidades se agrupan forman lo que se conoce como tratamiento primario, secundario y terciario o avanzado. Las unidades que componen el tratamiento primario son las unidades de tratamiento físico, que son el cribado, la sedimentación, y la flotación. Las operaciones para el tratamiento secundario son las biológicas y químicas, en los cuales se deben tener presentes los procesos de lodos activados, aireación prolongada también conocido como proceso de oxidación total, los procesos de contacto estabilización, aireación escalonada, lodos activos por mezcla completa, aireación descendente, aireación con oxígeno puro, las lagunas aireadas, lagunas de estabilización, filtros percoladores, biodiscos, y los tratamientos anaerobios. Por ultimo están los tratamientos terciarios que suelen ser combinaciones de los tres procesos, en los cuales se tienen la eliminación de sólidos en suspensión, la adsorción por carbón activo, intercambio iónico, osmosis inversa, electrodiálisis, procesos de oxidación química (cloración, ozonación) eliminación de fosforo y nitrógeno (Arévalo & Roncancio, 2015).

4.10.1 Tratamiento preliminar y primario

El tratamiento preliminar retira físicamente los sólidos a través de procesos como el cribado, bombeo del fluido entrante y separación de sólidos. En el tratamiento primario, los sólidos y materiales flotantes son retirados en tanques de sedimentación.

El tratamiento primario se refiere comúnmente a la remoción parcial de sólidos suspendidos, materia orgánica u organismos patógenos, mediante sedimentación u otros medios y constituye un método de preparar el agua para el tratamiento secundario.

En seguida se presentan los principales procesos del tratamiento preliminar y primario.

Cribado

Se instalan dos rejillas inclinadas a 45° con respecto a la horizontal y construidas a base de soleras con el objetivo de separar los sólidos gruesos mayores, para así evitar que lleguen a las siguientes unidades de tratamiento.

Desarenador

Sirve para separar las arenas de las aguas residuales que presentan diámetros menores de 2 mm (SINAT, 2006).

Cárcamo de bombeo

Los cárcamos de bombeo consisten básicamente de dos componentes, la estructura para interceptar y contener el agua donde se homogeniza la carga de bombeo y se encuentran el equipo complementario, y otra que sirve para proporcionar la energía necesaria para elevar el agua acumulada y que constituye el equipo de bombeo. El diseño de los primeros y la selección de los segundos son básicos para el correcto funcionamiento de los cárcamos (CNA, 2007).

4.10.2 Tratamiento secundario

El tratamiento secundario tiene como objetivo el limpiar el agua de aquellas impurezas cuyo tamaño es mucho menor a la que pueden captar por la decantación y las rejillas, para ello, los sistemas se basan en métodos mecánicos y biológicos combinados. Estos sistemas al manejar aspectos biológicos son afectados por factores externos, como son los climáticos, por lo que se tienen que estudiar sus características (Galvez, 2013).

El tratamiento secundario convencional se usa principalmente para remoción de DBO₅ soluble y sólidos suspendidos e incluye los procesos biológicos de lodos activados, filtros percoladores, sistemas de lagunas y sedimentación. Estos últimos, que generalmente son aplicables a operaciones de plantas de tamaño medio, consumen menos energía que el lodo activado (de la Vega, 2012).

En el Cuadro 1 se presentan los sistemas de tratamiento secundario para PTAR.

Cuadro 1. Sistemas de tratamiento secundario para PTAR (de la Vega, 2012).

SISTEMAS SECUNDARIOS	Sistemas aerobios	Reactores de masa en suspensión	Lodos activados en todas sus variantes
		Reactores de biomasa fija	Filtros percoladores o rociadores Discos biológicos o rotativos
	Sistemas anaerobios	Reactores de biomasa no adherida	Fosas sépticas Tanque Imhoff RAFA
		Reactores de biomasa fija	Filtro anaerobio Reactor tubular de película fija Lecho fluidizado Lecho expandido

A continuación, se describe los principales procesos del tratamiento secundario.

Reactores de lodos activados

Es el proceso de tratamiento de aguas residuales más comúnmente utilizado y fue desarrollado inicialmente en Inglaterra, en 1914. A pesar de ser un proceso biológico con altos costos de inversión, operación y mantenimiento, sigue siendo muy utilizado en el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales. Es un proceso estable y con

altas eficiencias de remoción de materia orgánica. Las modificaciones al proceso convencional son atractivas por su flexibilidad, sobre todo en la aceptación de cargas orgánicas variables. Es el sistema más utilizado en Estados Unidos principalmente para plantas de gran capacidad. En México más del 30% de las plantas de tratamiento son de lodos activados (Ramirez, 2015).

Sedimentadores secundarios

Aquí es el proceso unitario en el que el lodo activado, biomasa o licor mezclado proveniente de un reactor, es separada de la fase líquida del agua, generándose un sobrenadante clarificado y un lodo de fondo.

Los sedimentadores lamelares: consisten en tanques de poca profundidad que contienen paquetes de placas (lamelas) o tubos inclinados respecto a la base, y por cuyo interior se hace fluir el agua de manera ascendente. En la superficie inferior se van acumulando las partículas, desplazándose de forma descendente y recogiendo en el fondo del sedimentador. Las partículas depositadas en el fondo de los equipos (denominados fangos) se arrastran mediante rasquetas desde el fondo donde se “empujan” hacia la salida. Estos fangos, en muchas ocasiones y en la misma planta de tratamiento, se someten a distintas operaciones para reducir su volumen y darles un destino final (Cyclus ID, 2011).

Tornillo helicoidal

Utiliza la rotación para generar una fuerza que impulsa los cuerpos que están alrededor de su hélice, en nuestro caso los lodos, y que simplemente se limita la salida del lodo, lo cual genera una gran presión expulsando el agua y dejándola salir entre los espacios de los aros que se mueven alrededor del tornillo (Tecproambiental, n.d.).

Sopladores

Son para aplicaciones que incluyen aireación, agitación, limpieza de membranas, lavado a contracorriente de filtros y recuperación de biogás (Kaeser, n.d.). Producen una agitación que garantiza una mezcla total entre la materia orgánica y las bacterias aeróbicas, suministran el oxígeno necesario para que las bacterias puedan sobrevivir y se logre la digestión de la materia orgánica contenida en el agua residual (Universidad de los Llanos, 2019).

Canal de cloración

En él se colocan algunas pastillas de hipoclorito de calcio, utilizadas para la eliminación de bacterias y microorganismos que llegan a este proceso. Desde aquí se vierte el agua tratada hacia el efluente de la PTAR.

4.10.3 Tratamiento terciario

También conocido como tratamiento avanzado. Sus procesos reducen sólidos suspendidos, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, metales pesados y DQO soluble. Eliminan también, iones inorgánicos como el calcio, potasio, sulfato, el nitrato y el fosfato.

Los procesos disponibles para este tratamiento son los siguientes:

Filtración, adsorción del carbón, eliminación del fosforo, control del nitrógeno y arrastre de amoniaco (Báez & Cely, 2013).

4.11 Sistemas combinados

Los sistemas combinados se integran por dos procesos o dos reactores biológicos en serie, las combinaciones posibles son anaerobio-aerobio o aerobio-aerobio. Los diseñadores de sistemas biológicos han optado por estos sistemas combinados ya que de esta forma se minimizan las debilidades de los procesos individuales, se potencian los beneficios y resultan más económicos.

Los sistemas combinados anaerobio-aerobio soportan cargas orgánicas muy altas (reactor anaerobio) y obtienen un efluente de muy buena calidad (pulimento por parte del reactor aerobio) a un costo menor que si se tratara de un sistema puramente aerobio; se obtiene gas metano que puede utilizarse en la propia planta de tratamiento o en las calderas de la industria que utiliza el proceso. Las aplicaciones de estos sistemas son principalmente para efluentes industriales. Los arreglos posibles son muchos, pero los que se encuentran se muestran en el Cuadro 2 (de la Vega, 2012).

Cuadro 2. PTAR que operan en México por tipo de tratamiento.

		Tratamiento preliminar y primario	Sistema primario o sedimentación Sistema primario avanzado
Plantas de tratamiento de agua residual que operan en México por tipo de tratamiento	Tratamiento secundario		Aerobio
			Anaerobio
			Biológico
			Discos biológicos o biodiscos
			Dual
			Filtros biológicos o rociadores percoladores
			Fosa séptica
			Fosa séptica + filtro biológico
			Fosa séptica + wetland
			Lagunas aireadas
			Lagunas de estabilización
			Lodos activados
			Rafa + Filtro biológico
			Rafa + wasb
			Reactor enzimático
	Tanque Imhoff		
	Tanque imhoff + Filtro bilógico		
	Tratamiento terciario	Humedales (wetland)	
		Rafa, wasb + humedal	
		Tanque imhoff + wetland	
		Sedimentación + Wetland	

4.12 Evaluación de los sistemas de tratamiento

En México, como en la mayoría de los países de América Latina, se hacen grandes esfuerzos de gestión para obtener el financiamiento que requiere la construcción de instalaciones para el tratamiento de las AR municipales, además de adquirir las capacidades para administrarlas y mantenerlas en operación. Sin embargo, cuando se logra el objetivo de instalación, después de algún tiempo de constatar que los recursos municipales son insuficientes para operarlas, se decide cancelar el suministro de los recursos, dejan de operar y con el tiempo terminan siendo abandonadas. En el mejor de los casos, las AR que dejan de tratarse terminan siendo reutilizadas directamente para el riego agrícola, lo cual implica diversos riesgos para el medio ambiente, la salud de la población y disminuye la calidad de vida de las personas (de Anda, 2017). Los sistemas de tratamiento de AR descentralizados pueden utilizarse para compensar algunos de los problemas económicos causados por los sistemas centralizados. Estas tecnologías de bajo costo, si son correctamente diseñadas y aplicadas, generan buenos resultados en la calidad de los efluentes, si bien también necesitan determinados niveles de operación y mantenimiento para evitar fallas en el sistema (Bokova & Ryder, 2017).

4.13 Evaluación hidrodinámica

El tiempo de retención es la duración que tarda una partícula cualquiera del fluido en entrar y salir del reactor; éste se calcula dividiendo el volumen del tanque entre el caudal de ingreso al mismo. Si el tiempo de retención hidráulico es muy corto, los microorganismos no pueden cumplir su función de degradación correcta de las partículas, ni se logra una adecuada sedimentación; mientras que, si el tiempo por el contrario es demasiado largo, se da una inundación de superficie o se suspenden las partículas ya sedimentadas, teniendo contaminaciones cruzadas (Picardo, 2016).

4.14 Evaluación de remoción de contaminantes

La eficiencia de remoción en la depuración que se define como la diferencia entre los valores de la concentración del afluente a la entrada y a la salida de un proceso concreto, o a la salida de una planta depuradora. La eficiencia se expresa tanto en términos porcentuales como absolutos (Quispe, 2021).

Uno de los métodos que logra evidenciar la eficiencia de los sistemas corresponde al cálculo del porcentaje de remoción de los contaminantes, el cual relaciona las concentraciones iniciales y finales de los criterios que son monitoreados durante todo el proceso (ver ecuación 1).

$$\text{Remoción (\%)} = \left(1 - \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}}\right) * 100 \quad (1)$$

La importancia de conocer la eficiencia del tratamiento por medio de los porcentajes de remoción radica en identificar las características que deben ser mejoradas en el sistema para obtener concentraciones bajas y que den cumplimiento a las normativas vigentes en materia de aguas residuales (Oliveros & Wild, 2019).

4.15 Parámetros de caracterización del agua residual

A continuación, se definen los indicadores de la calidad del agua, y a su vez como se evalúa el parámetro de acuerdo a su norma correspondiente establecida por la organización competente.

4.15.1 Potencial de hidrógeno (pH)

Es una forma de expresar la concentración de iones Hidrógeno [H⁺]. Se usa universalmente para expresar la intensidad de las condiciones ácidas o alcalinas de una solución (Pérez, 2010). Es importante para el funcionamiento efectivo de los procesos de tratamiento de aguas y su control (por ejemplo, floculación y desinfección con cloro), el control de disolución de metales en canales y conductos y tratamiento biológico de aguas residuales y los vertidos de aguas residuales (SCFI, 2016).

4.15.2 Conductividad eléctrica (CE)

Es una medida de la corriente conducida por los iones presentes en el agua y depende de: la concentración de iones, la naturaleza de los iones, la temperatura de la disolución. Se expresa en las unidades de siemens por metro (S m⁻¹) o unidades equivalentes como microsiemens por centímetro (uS cm⁻¹) (SCFI, 2018).

4.15.3 Coliformes fecales (CF)

Comprende todos los bacilos aerobios o anaerobios facultativos, gram negativos no esporulados que fermentan la lactosa con producción de ácido y gas a 44° C ± 1° en un plazo de 24 h (SCFI, 2006).

Los CF se pueden evaluar con el método número más probable o el de filtración por membrana.

4.15.4 Demanda química de oxígeno (DQO)

La concentración de la masa de oxígeno equivalente a la cantidad de dicromato consumida por la materia disuelta y suspendida cuando una muestra de agua se trata con este oxidante bajo condiciones definidas (SCFI, 2011).

La DQO se puede determinar por el método del refluo abierto o por el del pequeño tubo sellado a escala con diferentes rangos, los cuales son: rango alto, medio y bajo.

4.15.5 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días. El método se basa en medir el oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se ha inhibido los procesos fotosintéticos de producción de oxígeno en condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos (SCFI, 2001a).

4.15.6 Turbidez

La turbiedad en agua se debe a la presencia de partículas suspendidas y disueltas. Materia en suspensión como arcilla, cieno o materia orgánica e inorgánica finamente dividida, así como compuestos solubles coloridos, plancton y diversos microorganismos (SCFI, 2001b).

Para medir la turbidez se utiliza un turbidímetro.

Principio de funcionamiento

El haz de luz que pasa a través de la muestra se dispersa en todas las direcciones. La intensidad y el patrón de la luz dispersa son afectados por muchas variables, como la longitud de onda de la luz incidente, el tamaño y la forma de las partículas, el índice de refracción y el color. El sistema óptico del HI93703 incluye un LED y un detector de luz dispersa (90°) (Hanna instruments, 2022).

4.15.7 Sólidos suspendidos totales (SST)

Es el material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por un filtro de fibra de vidrio con poro de 1,5 µm secado y llevado a masa constante a una temperatura de 105 °C ± 2 °C (SCFI, 2015).

4.16 Normatividad

Para poder reusar el agua tratada en servicios al público con contacto indirecto u ocasional como riego, se debe cumplir con la normativa mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los siguientes límites máximos permisibles de contaminantes: Coliformes fecales (CF) 1000 NMP/100 ml, huevos de helminto (HH) igual o <5/L, grasas y aceites (G y A) 15 mg/L, demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) 30 mg/L y sólidos suspendidos totales (SST) 30 mg/L (SEMARNAT, 1997).

Norma Mexicana (NMX).

Norma elaborada por un organismo nacional de normalización, o la Secretaría de Economía, que prevé, para un uso común y repetido, reglas, especificaciones, atributos, métodos de prueba, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado. Las normas mexicanas son de aplicación voluntaria, salvo en los casos en que los particulares manifiesten que sus productos, procesos o servicios son conformes con las mismas y sin perjuicio de que las dependencias requieran en una norma oficial mexicana su observancia para fines determinados.

Norma Oficial Mexicana (NOM).

La regulación técnica de observancia obligatoria expedida por las dependencias competentes, que establece reglas, especificaciones, atributos, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado y las que se refieran a su cumplimiento o aplicación (CONAGUA, 2019)

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Localización

La PTAR de la UAAAN se ubica en Buenavista, Saltillo, Coahuila con coordenadas geográficas Latitud: 2805395.58 m N, Longitud: 295102.36 m E y 1775 msnm (Figura 4).



Figura 4. Localización de la PTAR – UAAAN.

5.2 Sistema de tratamiento

La PTAR – UAAAN consta de los procesos unitarios de pre-tratamiento, cárcamo de bombeo, reactores de lodos activados, sedimentador secundario, digester de lodos, canal de cloración (Figura 5).

La PTAR cuenta con tres sopladores; dos bombas para aplicar hipoclorito de sodio; tres bombas para aplicar un polímero, hay una cisterna de agua tratada para servicios, los cuales son para dar mantenimiento a algunos de los procesos de la PTAR; se tiene los tanques para preparar el cloro y polímero, también se cuenta con un tornillo helicoidal para la extracción de lodos.

En el tablero de control PLC se tiene las funciones Manual, Fuera (no está en servicio) y Automático, esto para cada uno de los componentes de la PTAR.



Figura 5. Vista de planta de la PTAR - UAAAN.

En la PTAR de la UAAAN se tiene un registro de drenaje donde se puede observar la llegada de las aguas residuales (AR) de la Colonia Eulalio Gutiérrez “El Ranchito” y de la universidad, anteriormente se recibía agua residual de los establos de los cerdos que se tienen en las instalaciones de producción animal de la institución.

5.2.1 Pretratamiento

Las AR se reciben en el área de pretratamiento, el cual consta de dos pares de rejillas de diferente tamaño, que sirven para retener los sólidos de mayor tamaño, que pueden ser heces fecales, papeles, plásticos, madera y desechos de basura, entre otros, después hay una fosa (tipo de trampa), donde se sedimentan las arenas, cuando hay demasiado caudal en esta parte, se debe hacer una limpieza tres veces por día, de un lapso de cinco a diez minutos, las arenas se expulsan con ayuda de una bomba desarenadora, que se activa desde el tablero PLC.

5.2.1.1 Cárcamo de bombeo

Son cuatro bombas con las que cuenta la planta de tratamiento. En este cárcamo se almacena el agua residual y a su vez con ayuda de una bomba y un sensor de nivel o flotador sube el AR a través de una tubería, se envía el agua hacia un cabezal que divide el AR, 50 por ciento para un reactor y el otro para el otro. Se puede saber el caudal enviado con ayuda de un medidor de flujo establecido. Debido a la diferencia de niveles, se tiene una válvula check para evitar contraflujos que dañen al sistema de bombeo.

5.2.2 Tratamiento secundario

5.2.2.1 Reactores de lodos activados

En este proceso de tratamiento de aguas residuales el cual se fundamenta en la utilización de microorganismos (sobre todo bacterias heterótrofas facultativas), que crecen en el agua

residual, convirtiendo la materia orgánica disuelta en productos más simples como nuevas bacterias, dióxido de carbono y agua. Aquí se encuentra un soplador, el cual aplica aire a través de unas tuberías, que cuentan con varios difusores de aire, estos se encuentran en la parte inferior de los reactores, debido a esto se mantiene en movimiento la bacteria con el agua, lo que hace que se tenga una mezcla homogénea, conocida como lodo activado. También en cada reactor se cuenta con una bomba de recirculación interna, que es activada desde el tablero PLC.

5.2.2.2 Sedimentador secundario

En esta parte desde un reactor por medio de gravedad llega el lodo activado, el cual se divide, la bacteria se sedimenta y sobre esta queda el agua tratada (AT), esto sucede porque aquí no se aplica aire, además gracias a dos válvulas, se realizan los procesos de retorno de lodos (tubería por donde recirculan los lodos) y del desnatador, las natas se retiran por el principio de sifón, también se cuenta con un vertedero y una lamela donde se retienen los sólidos que quedan en el fondo debido al principio de decantación.

5.2.2.3 Canal de cloración

Después de haber pasado por el proceso del sedimentador secundario se recibe el AT, aquí antes de enviarse a la pila del efluente de la PTAR-UAAAN, se le aplican pastillas de hipoclorito de calcio, esto para eliminar alguna bacteria que lleve el AT que va a la pila de almacenamiento. Al final se distribuye el AT a otra pila, que está en el jardín hidráulico.

5.2.2.4 Digestor de lodos

Este elemento se usa en caso de que haya exceso de bacteria (>800 ml por litro) en los reactores, cuando se hace una prueba de sedimentación con una probeta de litro y dejar sedimentar el lodo activado media hora para observar la cantidad de bacteria sedimentada. Si se usa y también llegara a tener exceso se cuenta con un pozo (sistema de demasías) conectado a una tubería que retorna el agua al cárcamo de bombeo.

El periodo de muestreo y análisis comenzó desde finales del mes de febrero del año 2022 hasta principios del mes de junio del 2022, por lo regular dos veces a la semana. Con los datos obtenidos de los análisis de entrada y salida de la PTAR, se representó el porcentaje de remoción de contaminantes en los parámetros medidos y determinados, esto para ver la eficiencia del proceso de tratamiento que se realiza en general en la PTAR de la UAAAN.

5.3 Clima

Las clasificaciones climáticas agrupan características relacionadas con las condiciones atmosféricas más importantes para entender la distribución de los seres vivos y, por otro lado, la disponibilidad o limitación de éstos como recursos naturales para el ser humano. Los elementos climáticos más socorridos son, por lo regular, la temperatura y la precipitación pluvial. A través de las clasificaciones climáticas se describe el comportamiento de estos elementos a lo largo del año, comparando unas regiones con otras. La descripción del clima de una zona o región sintetiza en forma de letras o siglas sus características más importantes.

A partir de 1964 Enriqueta García adaptó para las condiciones de México la clasificación mundial de Wilhelm Köppen. Ésta ha recibido el denominativo de sistema de Köppen modificado por García y ha sido usado oficialmente en el país, cuyos mapas a varias escalas han sido publicados por el actual INEGI y la Conabio. El sistema modificado consiste en que a la clasificación original se adicionaron algunos parámetros que son muy importantes para diferenciar los climas en México, los que se organizaron en grupos, tipos, subtipos y variantes climáticas (ccpy, n.d.).

Los climas en el estado de Coahuila varían del templado al semicálido según su temperatura y de muy seco a subhúmedo según su grado de humedad; puede distinguirse que la temperatura es más homogénea que la humedad. La porción oeste de la entidad se caracteriza por tener el clima semicálido muy seco que se extiende desde la zona de La Laguna hasta el río Bravo. Hacia el noreste el clima es más benigno en cuanto a su grado de humedad, aunque conserva su temperatura, éste es de los tipos semicálido seco y semicálido semiseco que en lo alto de las sierras cambia a templado semiseco. La variación más notable entre los tipos climáticos del estado se halla en las sierras situadas al sur de Saltillo donde es templado subhúmedo.

La clasificación empleada para esta descripción corresponde a la de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1973.

La temperatura media anual en el estado varía entre 10 y 22°C; las mínimas tienen lugar en las partes altas del sureste del estado, zona de Saltillo. En general, los meses más cálidos son junio, julio y agosto y los más fríos diciembre~ enero y febrero; las temperaturas máximas y mínimas en estos meses son del orden de 32 y 7°C, respectivamente, aunque cabe aclarar que éstas son promedios anuales, no extremas (INEGI, 1986).

En el Cuadro 3 se presentan la fecha del análisis con un número de prueba, relacionando más adelante con algunas variables climáticas para saber qué condiciones se tuvieron en los días de cada muestreo del influente y efluente de la PTAR – UAAAN.

Cuadro 3. Fechas y número de prueba en el análisis de cada parámetro.

# de Prueba	Fecha	Parámetro						
		CE	pH	SST	CF	DBO	DQO	Turbiedad
1	23/02/2022	✓	✓	✓	✓			
2	28/02/2022	✓	✓	✓	✓			✓
3	02/03/2022	✓	✓	✓	✓		✓	✓
4	07/03/2022	✓	✓	✓	✓			✓
5	09/03/2022	✓	✓	✓	✓			✓
6	14/03/2022	✓	✓	✓	✓		✓	✓
7	16/03/2022	✓	✓	✓	✓			✓
8	22/03/2022	✓	✓	✓	✓		✓	✓
9	24/03/2022	✓	✓	✓	✓		✓	✓
10	28/03/2022	✓	✓	✓	✓			✓
11	30/03/2022	✓	✓	✓	✓			✓
12	04/04/2022	✓	✓	✓	✓			✓
13	06/04/2022	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
14	11/04/2022	✓	✓	✓				✓
15	18/04/2022	✓	✓	✓	✓		✓	✓
16	25/04/2022	✓	✓	✓	✓		✓	✓
17	27/04/2022	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
18	02/05/2022	✓	✓	✓	✓		✓	✓
19	11/05/2022	✓	✓	✓	✓		✓	✓
20	18/05/2022	✓	✓	✓	✓		✓	✓
21	23/05/2022	✓	✓	✓	✓		✓	✓
22	25/05/2022	✓	✓	✓	✓		✓	✓
23	30/05/2022	✓	✓	✓			✓	✓
24	01/06/2022	✓	✓	✓	✓		✓	✓
25	06/06/2022	✓	✓	✓	✓		✓	✓
26	08/06/2022	✓	✓	✓	✓		✓	✓

Se tomaron en cuenta variantes climáticas, la cuales son: temperatura, precipitación, humedad y radiación solar, datos registrados del observatorio atmosférico Saltillo, en la página en línea de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA, 2022):

En la Figura 6 se observa la ausencia de lluvia en todos los días que se muestreo, la precipitación fue cero.

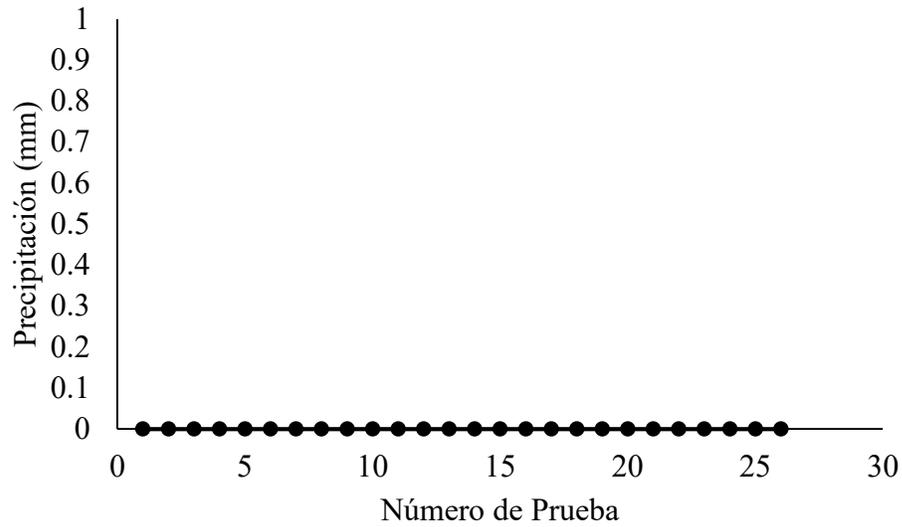


Figura 6. Precipitación registrada en Observatorio Atmosférico Saltillo.

En la Figura 7 se presenta una tendencia creciente de la temperatura, a pesar de las variaciones, con un rango de 13 a 31 °C. La temperatura en la superficie de los cuerpos de agua cambia por la época del año, nubosidad, así como el flujo y profundidad del cuerpo de agua (García et al., 2011).

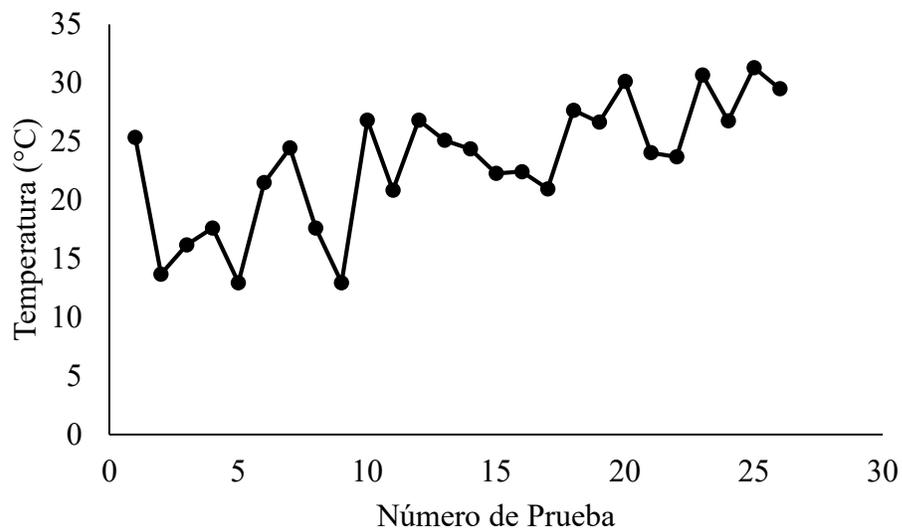


Figura 7. Temperatura registrada en Observatorio Atmosférico Saltillo.

En la Figura 8 se nota que la humedad relativa tiene muchas variaciones, a veces muy altas, con un rango de 10 a 62%.

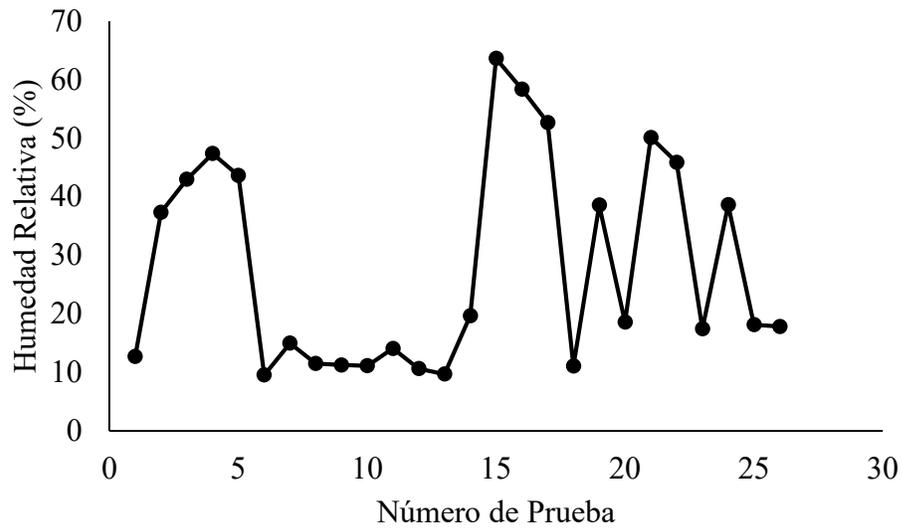


Figura 8. Humedad relativa registrada en Observatorio Atmosférico Saltillo.

En la Figura 9 se muestra la radiación solar, que al final se mantiene un poco constante, con valores de aproximadamente 900 W/m²

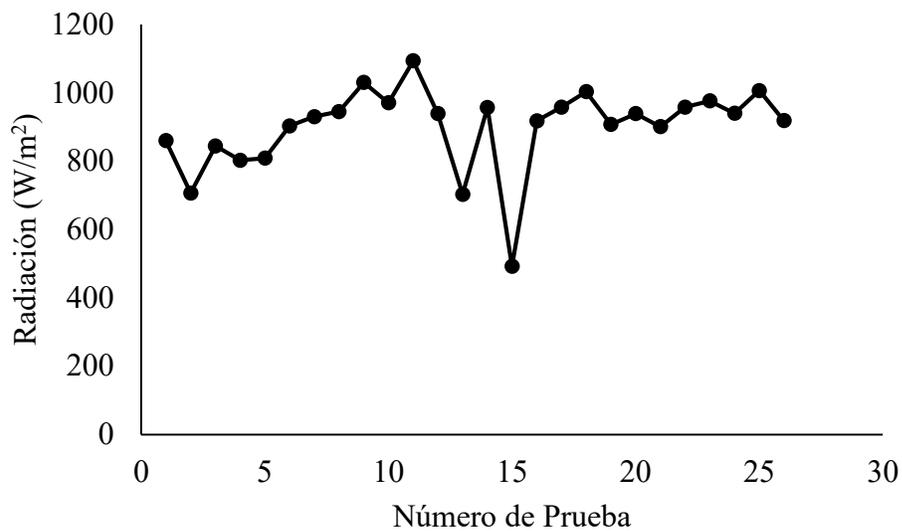


Figura 9. Radiación solar registrada en Observatorio Atmosférico Saltillo.

5.4 Determinación de parámetros de calidad del agua y muestreo del AR

Se realizó el muestreo de agua de entrada y salida de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), por lo regular dos veces a la semana, desde el veintitrés de febrero hasta el ocho de junio del año dos mil veintidós, esto se hizo con el fin de analizar la calidad del agua a través de varios parámetros, los cuales son pH, CE, CF, DBO₅, DQO, SST y turbidez; con esto, a su vez, se buscó monitorear la eficiencia del tratamiento en general de la PTAR-UAAAN.

5.4.1 Potencial de hidrógeno (pH)

Se tomó un volumen de muestra y una vez que el equipo para la medición estuvo calibrado y verificado correctamente, se procedió a realizar la medición de la muestra. Se sumergió el electrodo en la muestra que estuvo dentro de un vaso de precipitado, se agito levemente, espero que la lectura de pH se estabilizara, y registrar el dato.

Se hizo la medición del pH de cada muestra de las aguas residuales, comenzando con la más limpia, con un medidor de electroquímica avanzada (Advanced Electrochemistry Meter) de la marca Thermo Scientific Orion Versa star, y con el electrodo combinado de pH/ATC (Automatic Temperature Correction) Orion ROSS Ultra Triode 8157BNVMD.

5.4.2 Conductividad eléctrica (CE)

La medición de la conductividad se debe realizar tan pronto como sea posible sin exceder las 24 horas, a partir de la toma de la muestra. Una vez que el equipo o instrumento este calibrado, se procede a realizar la medición de la muestra por triplicado de manera independiente. Sumergir la celda o el sensor en la muestra, agitar levemente, esperar que la lectura de conductividad se estabilice, obtener y registrar. Se hizo la medición de la conductividad eléctrica (CE) de cada muestra de las aguas residuales con un potenciómetro de la marca Thermo Scientific Orion Versa star Advanced Electrochemistry Meter y con la celda de conductividad 013005MD, la cual se introduce en la muestra contenida dentro de un vaso de precipitado, luego se realiza la lectura.

5.4.3 Coliformes fecales (CF)

Se utilizó una autoclave modelo 25x-1 para esterilizar el material de laboratorio utilizado para el análisis mediante el método de filtración por membrana. También se incubo las muestras sobre una membrana con poro de 0.45 μm y 47 mm de diámetro, en los medios de cultivo Agar m FC Difco contenido en cajas Petri dentro de una incubadora DigiTherm Tritech Research modelo: SYM 04-1 que estuvo a una temperatura de 44°C a 45°C en 24 horas para la detección de organismos coliformes fecales.

5.4.4 Demanda química de oxígeno (DQO)

Se realizó la determinación de DQO a través del método del tubo sellado a pequeña escala, para este análisis se ocuparon los siguientes aparatos: Reactor de instrumentos Hanna Calentador De Bloque C 9800 donde se colocan los tubos sellados a 150°C por 2 horas y posteriormente se utiliza el Fotómetro de banco multiparamétrico C99 Marca HANNA donde se introduce el tubo de blanco para calibrar posteriormente, para leer los tubos de salida y entrada, se da en la tecla read, primero la de efluente y al final la del influente.

Todos los datos son obtenidos con el método del tubo sellado a pequeña escala, con reactivo para rango medio (MR).

5.4.5 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

Se prepararon cuatro disoluciones, las cuales fueron las siguientes: disolución amortiguadora de fostato, sulfato de magnesio, de calcio y cloruro férrico, cada una con diferentes proporciones de reactivos en matraces aforados, para el agua de dilución, la cual se preparó con un litro de agua destilada y un mililitro de cada una de las cuatro soluciones antes mencionadas. El agua de dilución que estuvo contenida en una jarra, se puso a airear por media hora mínimo, al mismo tiempo se agregó una alícuota de la muestra de agua a una botella o frasco Winkler y se rellenó con el agua de dilución, y otra botella Winkler se llenó con agua de dilución, la cual fue el blanco.

Se determinó el análisis de la DBO₅ con los siguientes aparatos de laboratorio:

Incubadora para mantener una temperatura de 20 °C durante 5 días y medidor de oxígeno disuelto portátil - HI9146, el cual cuenta con una sonda para medir el oxígeno disuelto del agua de un blanco, salida y entrada, las cuales estuvieron contenidas en botellas winkler.

5.4.6 Turbidez

Se toma una alícuota de muestra y se agrega a un frasco hasta la marca graduada que tiene, cerrar frasco y se coloca en el orificio de un turbidímetro para hacer la medición, la cual es de manera directa y al instante, solo con dar lectura.

La medición de este parámetro se realizó con el aparato de laboratorio: Medidor portátil de turbidez HI 93703 en el cual se realiza la lectura de una muestra de 10 mL de agua residual contenida en un pequeño frasco que se introduce en el aparato.

5.4.7 Sólidos suspendidos totales (SST)

Para el análisis se coloca agua destilada para enjuagar un Papel Filtro de Fibra de Vidrio Whatman de grado GF/A con diámetro 47 mm y referencia 1820, luego aplicándole vacío dentro del matraz y se coloca en una caja de aluminio y se pasa al horno a una temperatura de 105 °C, después de 1 h, se pasan a desecar 15 min y se pesan, posteriormente se agrega una muestra de 20 mL sobre el filtro, aplicando vacío dentro de un matraz, luego el filtro se regresa al horno de secado y se pone a desecador y se pesa igual, así obteniendo la relación de dos pesos, inicial y final. Para la determinación de este parámetro se utilizó: horno de secado hdt-17 mapsa, desecador y balanza analítica.

Se prepara el dispositivo de filtración y secado, usar filtro de fibra de vidrio en charola de aluminio, con la ayuda de unas pinzas se coloca la cara rugosa hacia arriba en el dispositivo de filtración. Se moja filtro con agua destilada y aplicar vacío, luego se regresa el filtro a la charola para colocarlo en el horno secado por una hora como mínimo. Se pesa el filtro con la charola y registrar peso inicial o peso sin muestra, después volver a colocar filtro en el dispositivo de filtración y aplicar una alícuota de la muestra y repetir los mismos pasos anteriores, solo que al último se registra el peso como final o con muestra.

VI. RESULTADOS

6.1 Potencial de hidrógeno (pH)

En pH se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la Figura 10.

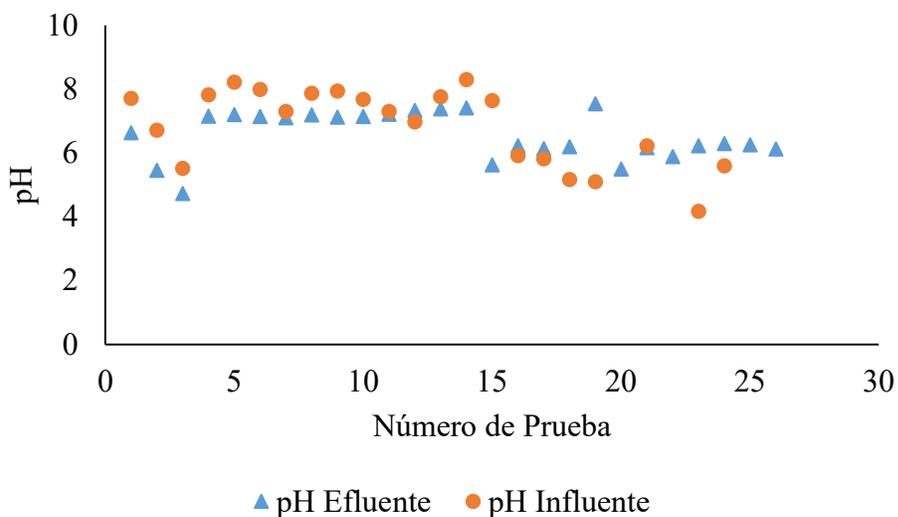


Figura 10. pH de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo

Hay una tendencia decreciente en el pH tanto para influente como efluente de la PTAR. Los resultados varían, pero están en un rango de 4 a 8. Un valor cercano a 0 es muy ácido y cercano a 14 es muy básico o alcalino.

6.2 Conductividad eléctrica (CE)

En CE se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la Figura 11.

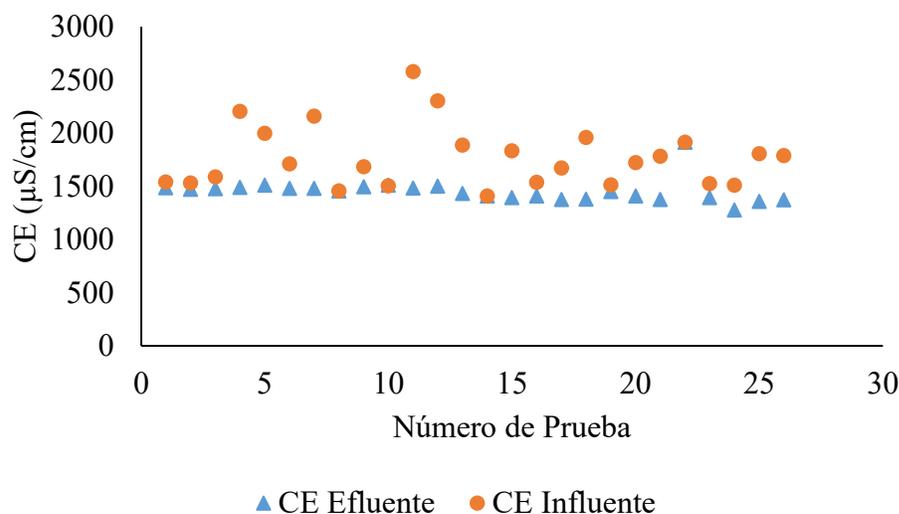


Figura 11. CE de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo

Se puede ver una variación en la CE del influente, aunque tiene una tendencia decreciente con rango de valores de 1550 hasta 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que en el efluente los datos se mantienen en un límite con un valor aproximado igual o menor de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

6.3 Coliformes fecales (CF)

Los resultados de unidades formadoras de colonias por mililitro (UFC/mL), se observan en la Figura 12.

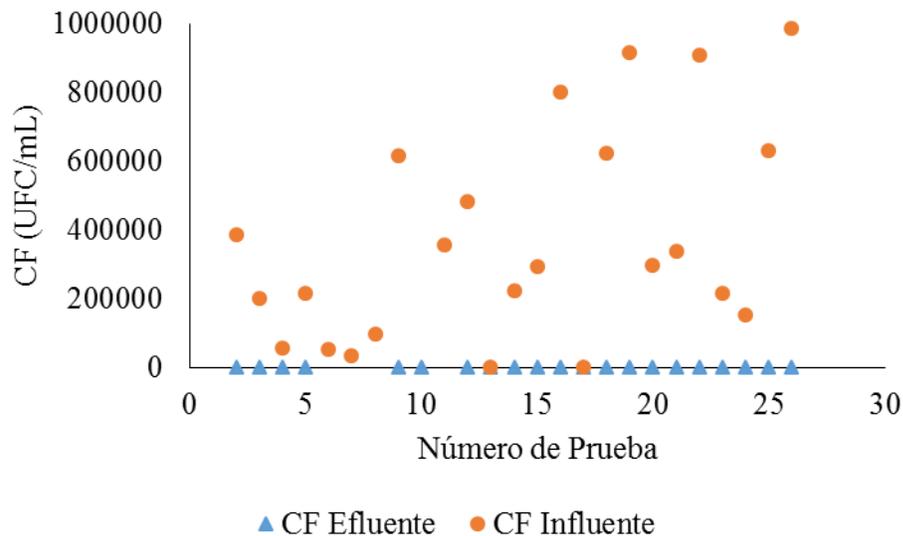


Figura 12. CF de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo.

Se puede ver una variación muy pronunciada en los valores del influente, además de reflejarse una tendencia creciente de bacteria llegando al millón de unidades formadoras de colonias por mililitro (UFC/mL). En esta comparación se observa que debido a los procesos de desinfección del agua se tiene valores de bacteria no detectada (mostrados como cero) en el efluente de la PTAR sin embargo en la Figura 13 se observa un mejor rango para los datos de CF en la salida.

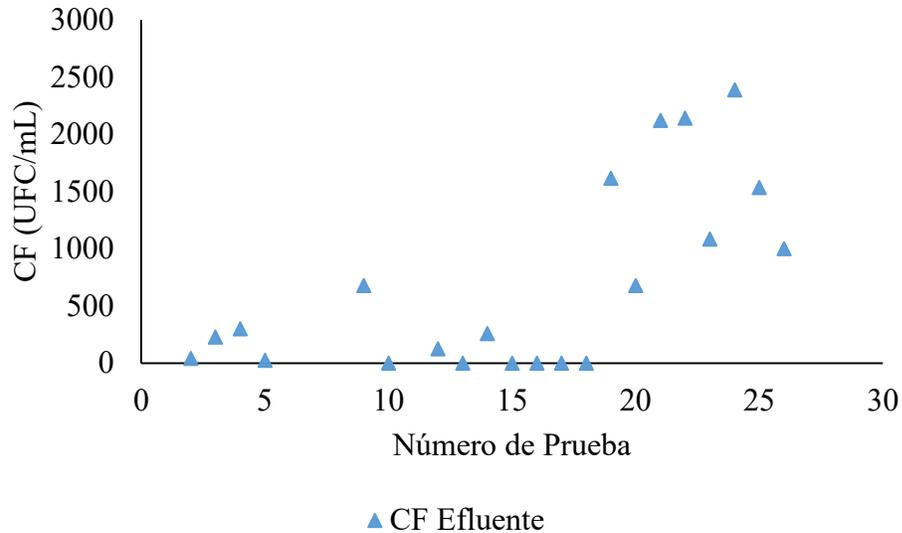


Figura 13. CF de Agua Residual en efluente de la PTAR - UAAAN Saltillo.

El rango de valores varía de bacteria no detectada (indicada con valor cero) hasta 2388 unidades formadoras de colonia por mililitro (UFC/mL), que pudo deberse a una falta de dosis de cloración.

6.4 Demanda química de oxígeno (DQO)

En DQO se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la Figura 14.

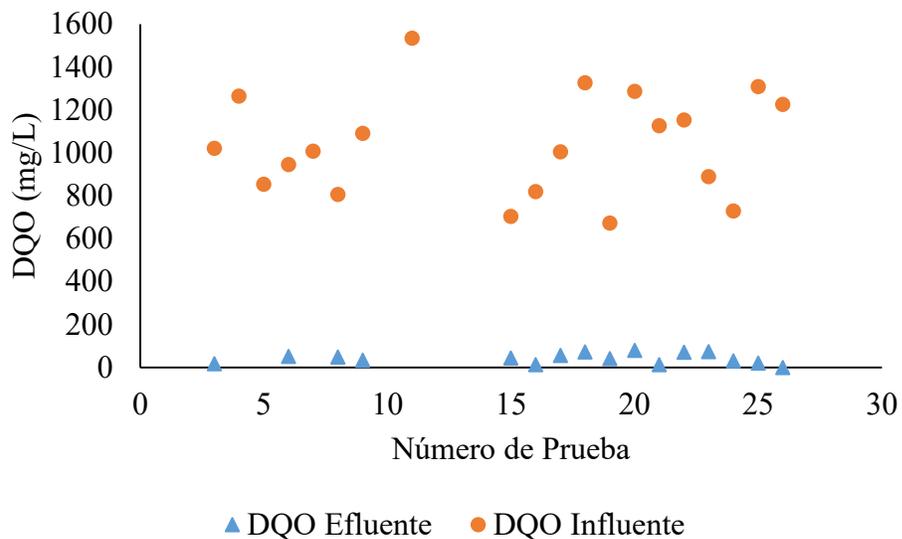


Figura 14. DQO de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo.

En el efluente se notan valores que no superan los 100 mg/L, mientras que en el influente el rango valores esta entre 600 a 1600 mg/L. En el efluente se presentan datos muy constantes, mientras que en el influente varían, aunque la tendencia parece ser decreciente

6.5 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

En DBO₅ se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 15.

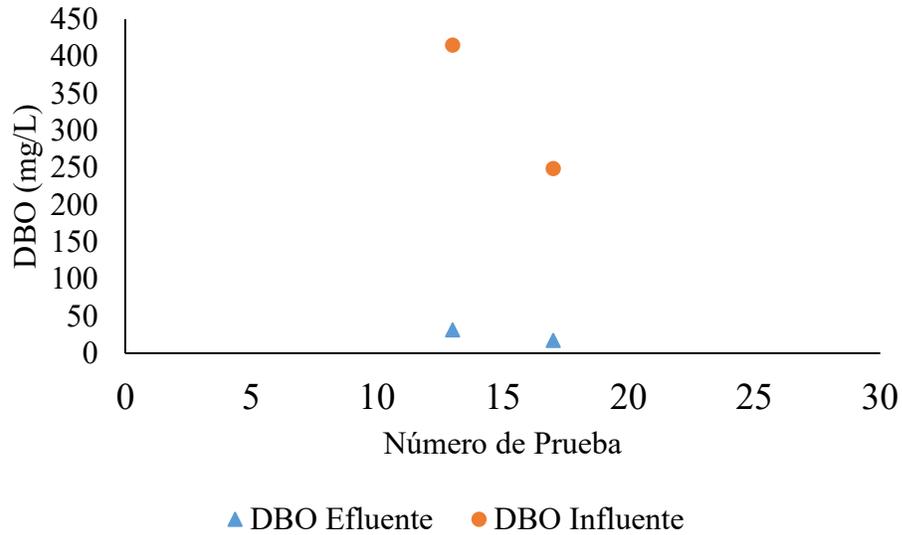


Figura 15. DBO₅ de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo

Se observa que los datos del Efluente son bajos y constantes con valores menores a 50 mg/L, mientras que en el influente se tiene una variación, uno de 400 otro de 250 mg/L.

6.6 Turbidez

En la Figura 16 se muestran los resultados obtenidos de turbidez.

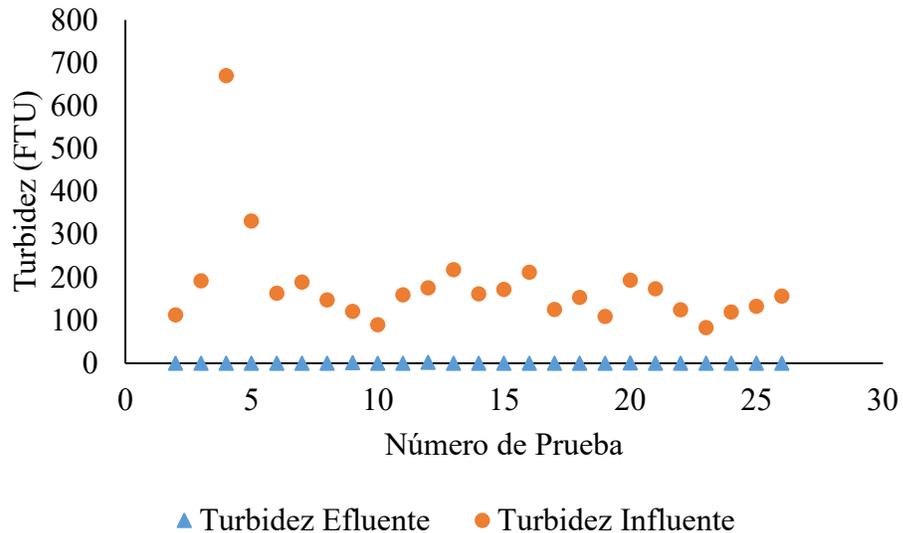


Figura 16. Turbidez de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo

Se puede ver que en el efluente se tiene una tendencia constante con un valor de cero, debido a los procesos de tratamiento, como la sedimentación que se tiene en la PTAR. Mientras que en el influente hay variaciones con una frecuencia similar, al subir y bajar, manteniendo así una tendencia decreciente.

En el influente se muestra una variación con rango de 100 a 200 FTU, tiende a subir y bajar poco a poco, a excepción de un dato con valor alto, posiblemente se deba que en ocasiones se recibía agua de marraneras con mayor cantidad de sólidos en la PTAR.

6.7 Sólidos suspendidos totales (SST)

Los resultados de SST se muestran en la Figura 17.

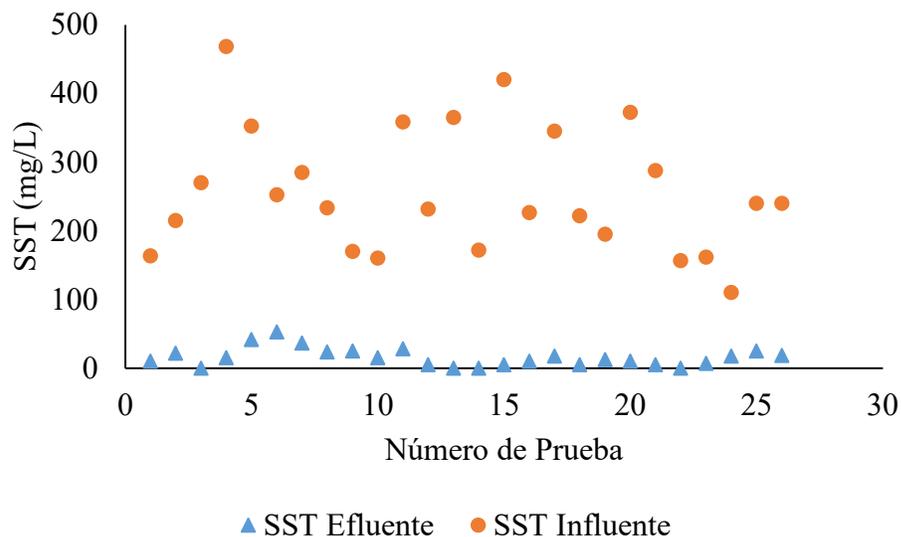


Figura 17. SST de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo

En el efluente se presenta una tendencia un poco constante con un rango de valor de 0 a 50 mg/L, debido a los tratamientos que permiten retirar los sólidos de las AR. Mientras que en el Influyente se tiene un rango de 100 hasta 500 mg/L, lo cual nos muestra variaciones con una tendencia decreciente.

6.8 Evaluación de la remoción

6.8.1 Remoción en DQO

En la Figura 18 se puede observar la remoción obtenida en el parámetro de DQO.

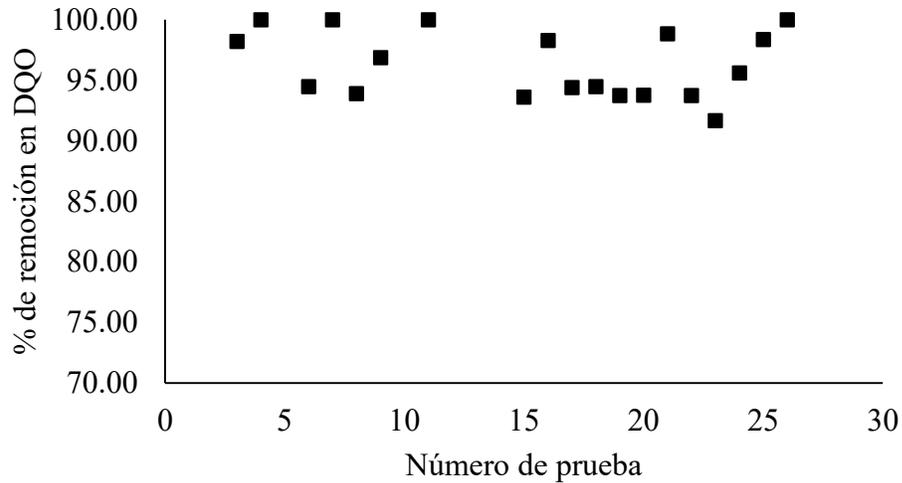


Figura 18. Remoción en DQO de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo.

La eficiencia de remoción va desde un rango entre noventa a cien por ciento en la DQO.

6.8.2 Remoción en SST

En la Figura 19 se puede notar la remoción en Sólidos Suspendidos Totales (SST)

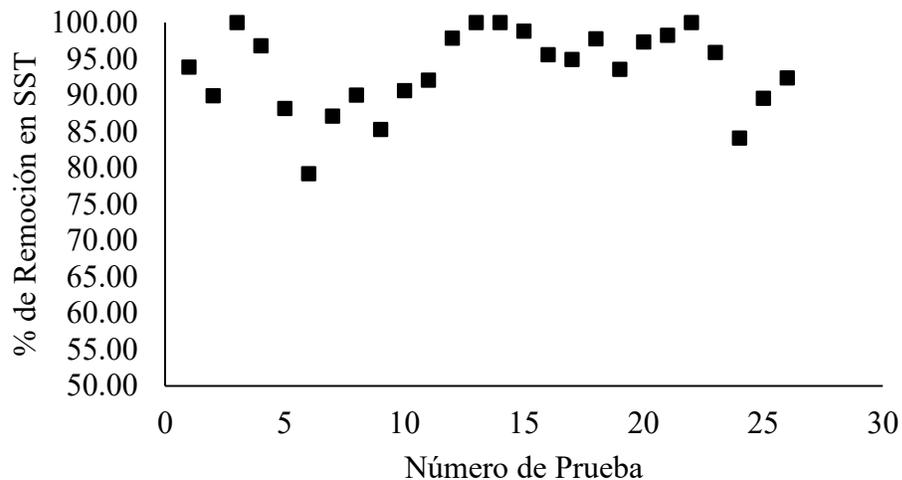


Figura 19. Remoción en SST de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo.

El por ciento de remoción en SST vario por lo regular, con promedio de 93.52%. Se tiene un rango de valores de 79 a 100%, lo cual representa una muy buena eficiencia de remoción.

6.8.3 Remoción en turbidez

En la Figura 20 se puede examinar la remoción en turbidez.

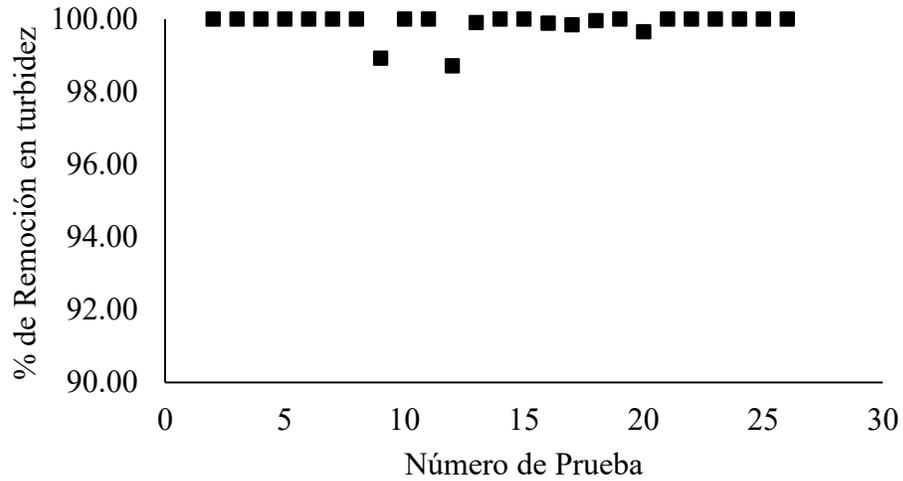


Figura 20. Remoción en turbidez de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo.

El promedio del por ciento de remoción fue de 99.87%, representando una eficiencia excelente.

6.8.4 Remoción en CF

En la Figura 21 se puede observar la remoción en Coliformes Fecales.

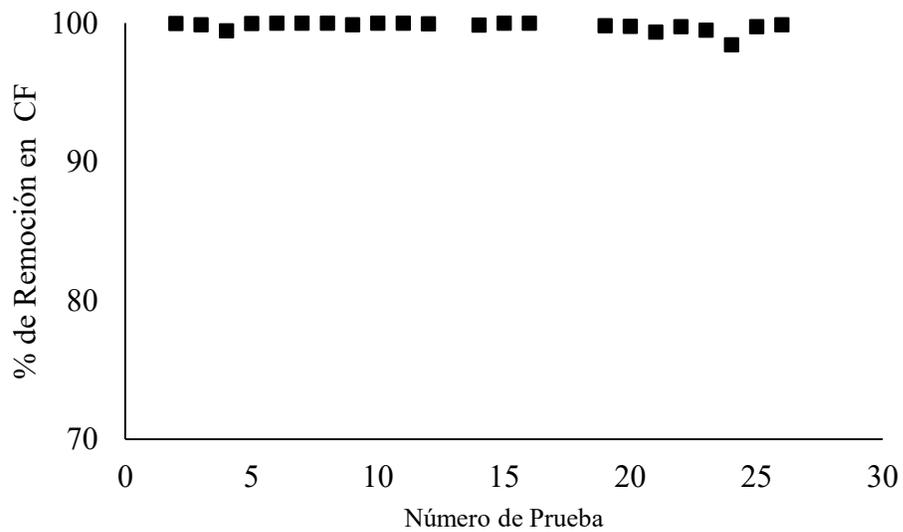


Figura 21. Remoción en CF de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo.

El porcentaje de remoción en este parámetro es poco variable, con valores de 98 a 100%.

Por lo regular fue excelente la remoción.

6.8.5 Remoción en DBO₅

En la Figura 22 se puede observar la remoción de DBO₅

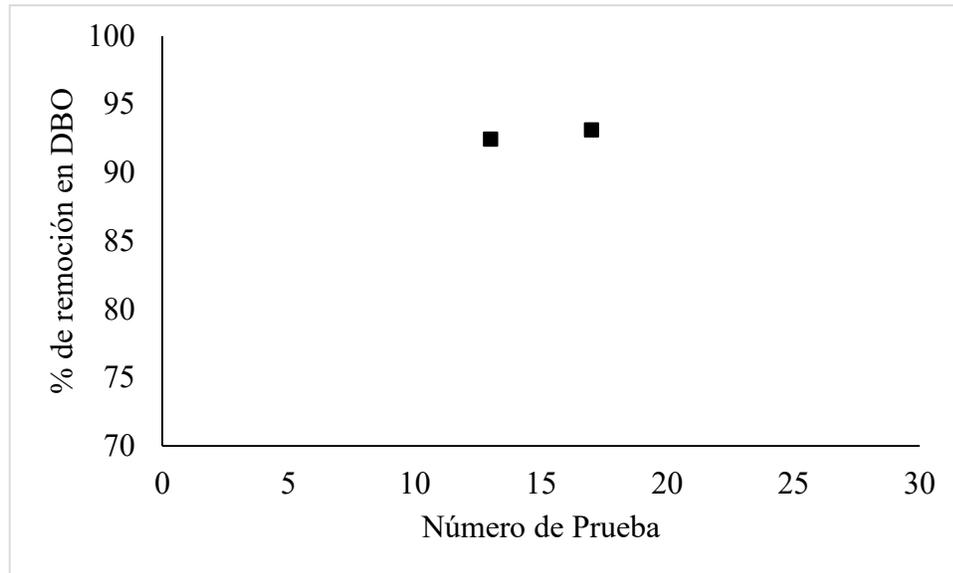


Figura 22. Remoción en DBO₅ de Agua Residual en PTAR - UAAAN Saltillo.

Se puede notar que los valores son de 92.44 y 93.11% de remoción.

VII. DISCUSIÓN

La eficiencia que se obtuvo sobre los parámetros medidos y determinados como turbidez y coliformes fecales representan un excelente resultado en remoción, aunque para la calidad del agua para reusó en servicios al público con contacto indirecto u ocasional, no fue apta en algunos momentos cuando se desestabilizó el proceso de un reactor de la PTAR, seis días (19, 21, 22, 23, 24, y 25) de análisis, en los cuales se obtuvo resultados (superando el límite permisible de acuerdo a la NOM-003-SEMARNAT-1997) con detección de UFC de coliformes fecales en el efluente de la planta.

VIII. CONCLUSIÓN

La eficiencia de tratamiento general en la PTAR-UAAAN estuvo en buenas condiciones de tratamiento, se obtuvo una remoción de entre el 80 y 100% en el parámetro de sólidos suspendidos totales, de 92 a 100% en DQO, de 92 y 93% en DBO y de 99 al 100% en la turbiedad, por otro lado, la remoción encontrada, al inicio del muestreo, en coliformes fecales, presenta rangos alrededor de 99.99% sin embargo, esta eficiencia disminuyó hasta 98.44% después de que se hizo el mantenimiento de uno de los reactores del sistema. Estos indicadores nos permiten saber que se estuvo realizando un buen proceso en general. En cuanto al reusó del agua para fin de riego en contacto indirecto u ocasional los resultados de la DBO₅ cumplieron con el límite permisible (30 mg/L), de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997, mientras que los de SST, hubo tres días (5, 6 y 7) de análisis que se superó el límite permisible igual de (30 mg/L), fuera de esos días el agua tratada estuvo adecuada para el uso mencionado anteriormente, en relación a estos dos parámetros.

IX. RECOMENDACIONES

Tener un monitoreo constante de los parámetros de la calidad del agua de la PTAR-UAAAN anualmente observando su evolución con relación a los factores climáticos.

Hacer consciencia de la disponibilidad del agua en la población en general, considerando los usos y el aprovechamiento que se le dé a este recurso vital.

Implementar el uso de tratamientos de agua residual correspondientes en las zonas rurales marginadas, donde no se cuente con el adecuado tratamiento.

Moderar los vertimientos de la generación del agua residual, debido al crecimiento urbano e industrial.

Mejorar la tecnificación de los procesos unitarios en donde se pueda aumentar la eficiencia del tratamiento en general.

X. BIBLIOGRAFÍA

- Arévalo, W. S., & Roncancio, L. X. (2015). *Evaluación de alternativas de tratamiento de agua residual doméstica para reúso en irrigación en una hospedería en el municipio de Villa de Leyva - Boyacá* [Universidad de La Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1297&context=ing_ambiental_sanitaria
- Báez, L. X., & Cely, K. Z. (2013). Estudio para la adaptación del tratamiento terciario de la PTAR – UPB como un sistema de lodos activados. In *Universidad Pontificia Bolivariana*. https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/9956/digital_27082.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bokova, I., & Ryder, G. (2017). Aguas Residuales el Recurso Desaprovechado. In *Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura*. http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf
- ccpy. (n.d.). *tipos climas y escenarios-cambio-climatico*. http://www.ccpy.gob.mx/pdf/Regional/escenarios-cambio-climatico/tipos_climas.pdf
- Chávez, I. (2017). Diseño E Implementación De Un Sistema De Tratamiento De Aguas Residuales. *Dominio de Las Ciencias*, 3(1), 536–560. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjY1Pez28n6AhUrLkQIHbDdBoUQFnoECAYQAQ&url=https%3A%2F%2Ffdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F6134928.pdf&usg=AOvVaw1bLYYkxVulvrGi_Xu0wvx9
- CNA. (2007). *Cárcamos De Bombeo Para Alcantarillado, Funcional E Hidraulico*. [ftp://ftp.conagua.gob.mx/Mapas/libros_pdf_2007/Desinfecci%F3n para Sistemas de Agua Potable y Saneamiento.pdf](ftp://ftp.conagua.gob.mx/Mapas/libros_pdf_2007/Desinfecci%F3n_para_Sistemas_de_Agua_Potable_y_Saneamiento.pdf)
- CONAGUA. (2011). Agua en el mundo. In *Estadísticas del agua en México, Edición 2011* (2011th ed., pp. 114–126). http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/sina/capitulo_8.pdf
- CONAGUA. (2019). *Estadísticas del Agua en México 2019*. https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019.pdf
- CONAGUA. (2021). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/759492/Inventario_2021.pdf
- Cyclus ID. (2011). *Tratamiento Primario*. <https://www.cyclusid.com/tecnologias-aguas-residuales/tratamiento-aguas/tratamiento-primario/>
- de Anda, J. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y Ambiente*, 14, 119–143.

<https://doi.org/10.31840/sya.v0i14.1770>

- de la Vega, M. (2012). *Eficiencia en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales* (Vol. 53, Issue 9). [http://indesol.gob.mx/cedoc/pdf/III. Desarrollo Social/Agua y Saneamiento/Eficiencia en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.pdf](http://indesol.gob.mx/cedoc/pdf/III_Desarrollo_Social/Agua_y_Saneamiento/Eficiencia_en_Plantas_de_Tratamiento_de_Aguas_Residuales.pdf)
- Galvez, C. (2013). *Eficiencia de la planta de tratamiento de agua residual* [Universidad Rafael Landívar]. <http://biblio3.url.edu.gt/Tesario/2013/06/15/Galvez-Carlos.pdf>
- García, A. J., Ramíres, N., Vazquez, C., & Leal, T. (2011). Impacto del Cambio Climático en la Calidad del Agua en México. *Coordinación de Tratamiento y Calidad Del Agua*. <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1427/TC-0872.4.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Garzón, M. A., González, J., & García, R. (2016). Evaluación de un sistema de tratamiento doméstico para reúso de agua residual. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 1–14. <https://www.redalyc.org/journal/370/37045328006/html/>
- Hammeken, A. M., & Romero, E. (2005). Capítulo 2. Fundamentos del tratamiento de agua residual. In *Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Cholula* (pp. 23–52).
- Hanna instruments. (2022). *HI93703 Medidor portátil de turbidez compatible con ISO*. <https://hannainst.com.mx/productos/medidores-portatiles/medidor-portatil-de-turbidez-compatible-con-iso-sin-accesorios/>
- Huamán, C., & Palco, M. (2021). *Eficiencia en la reducción del DBO5 y DQO en la PTAR en la encañada Cajamarca 2021* [Universidad Privada Antonio Guillermo Urrello]. <http://repositorio.upagu.edu.pe/bitstream/handle/UPAGU/2103/TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- INEGI. (n.d.). *Cuentame Inegi. Usos Del Agua*. <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/usos.aspx?tema=T#:~:text=En México%2C 76 %25 del agua,5 %25%2C en la industria.>
- INEGI. (1986). *Hidrología del estado de Coahuila*. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825221232/702825221232_1.pdf
- Jimenez, B. E. (2001). *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología aplicada*. https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=8MVxlyJGokIC&oi=fnd&pg=PA29&dq=contaminación+del+agua+en+méxico&ots=IVBEVLDvDE&sig=nEVG5plaKuCqdxSBG_m4mMCvGoA#v=onepage&q=contaminación del agua en méxico&f=false
- Kaeser. (n.d.). *Sopladores para plantas de tratamiento de aguas residuales*. 1–2. <https://mx.kaeser.com/recursos-de-aire-comprimido/aplicaciones/tratamiento-de-aguas-residuales/>
- Núñez, M. (2019). *Eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales en la ciudad*

de Cajabamba - Cajamarca. Alternativas para mejorar su tratamiento [Universidad Nacional de Cajamarca Escuela de Posgrado].
<https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3526>

- Oliveros, D. M., & Wild, J. C. (2019). *Evaluación de la remoción de nutrientes. Evaluación de la eficiencia de remoción de nutrientes presentes en aguas residuales municipales en un sistema de tratamiento terciario* [Corporación Universidad de la Costa]. [https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/5311/Evaluación de la eficiencia de remoción de nutrientes presentes en aguas residuales municipales en un sistema de tratamiento terciario.pdf?isAllowed=y&sequence=1](https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/5311/Evaluación%20de%20la%20eficiencia%20de%20remoción%20de%20nutrientes%20presentes%20en%20aguas%20residuales%20municipales%20en%20un%20sistema%20de%20tratamiento%20terciario.pdf?isAllowed=y&sequence=1)
- Pérez, J. E. (2010). *Caracterización de la calidad del agua en la planta de tratamiento de agua potable y en la red de distribución de la ciudad de Yopal*. Universidad Industrial de Santander.
- Picardo, S. de los Á. (2016). *Evaluación físico-química, biológica e hidrodinámica del funcionamiento de sistemas de tratamiento prefabricados para el tratamiento de aguas residuales domiciliarias*. [Tecnológico de Costa Rica]. [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9226/%282016%29 TFG_Sofia Picado Valverde.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9226/%282016%29%20TFG_Sofia%20Picado%20Valverde.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ramírez, E. (2015). Capítulo II: Fundamentos teóricos de lodos activados y aereación extendida. In *Fundamentos teóricos de lodos activados y aereación extendida* (p. 36). <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/MEMORIAS2004/CapituloII/1Fundamentosdelprocesodelodosactivados.pdf>
- Rivas, A., & Paredes, D. (2014). *Sistemas de humedales para el manejo , tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua*. https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/sistemas-de-humedales/files/assets/common/downloads/publication.pdf
- Rodríguez, J. P., García, C. A., & Pardo, J. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Revista Tecnura*, 19(46), 149–164. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a12>
- RUOA. (2022). Datos de cada hora para el Observatorio Atmosférico Saltillo. In *Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos. Observatorio Atmosférico Saltillo*. https://www.ruoa.unam.mx/csv_data/sllo/hora.php
- SCFI. (2001a). Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Norma mexicana. NMX-AA-028-SCFI-2001 Análisis De Agua - Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en Aguas Naturales, Residuales (DBO5) y Residuales Tratadas - Método de prueba. In *Diario Oficial de la Federación. Secretaria de Economía. DGN*. <https://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2001/nmx-aa-028-scfi-2001.pdf>
- SCFI. (2001b). Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Norma mexicana NMX-AA-038-SCFI-2001 -Análisis de agua - Determinación de turbiedad en aguas naturales , residuales y residuales tratadas - Método de prueba. In *Diario Oficial de la Federación. Secretaria de Economía. DGN*.

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166777/NMX-AA-038-SCFI-2001.pdf>

SCFI. (2006). Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Norma mexicana NMX-AA-102-SCFI-2006 Calidad del Agua – Detección y Enumeración de Organismos Coliformes, Organismos Coliformes Termotolerantes y Escherichia coli presuntiva – Método de Filtración en Membrana. In *Diario Oficial de la Federación. Secretaría de Economía*. DGN. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166804/NMX-AA-102-SCFI-2006.pdf>

SCFI. (2011). Norma mexicana NMX-AA-030/2-SCFI-2011 Análisis de Agua - Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas - Método de prueba - Parte 2 - Método de tubo sellado a pequeña escala. In *Diario Oficial de la Federación. Secretaria de Economía. DGN. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166775/NMX-AA-030-2-SCFI-2011.pdf>

SCFI. (2015). Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. NMX-AA-034-SCIFI-2015 Análisis de Agua - Medición de Sólidos y Sales Disueltas en Aguas Naturales , Residuales y Residuales Tratadas – Método de prueba. In *Diario Oficial de la Federación. Secretaria de Economía. DGN*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>

SEMARNAT. (1997). Normas Oficiales Mexicanas. In *CONAGUA*. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>

SEMARNAT. (2020). *Agua residual generada, colectada y tratada*. http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AGUA07_15&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREANIO=*

SEMARNAT. (2022). *Volumen total concesionado por uso consuntivo*. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjTtdq4ycz6AhWYD0QIHTJgBAAQFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fapps1.semarnat.gob.mx%3A8443%2Fdgeia%2Fcompartidos%2Fcomplementarias%2FCOM_IC_B_USOCONS.xlsx&usq=AOvVaw3LHORFJ-4MHo5MgtI2Hj5n

Sierra, C. A. (2011). *Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico*. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=2fAYEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA33&dq=calidad+del+agua&ots=cd-MQn2Nek&sig=TUDmet3BfmzHGqK1R0ycqZIs28#v=onepage&q=calidad+del+agua&f=false>

SINAT. (2006). *Manifestación de Impacto Ambiental Planta de Tratamiento de Aguas Residuales*. <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/ver/estudios/2008/30VE2008H>

D017.pdf

Tecproambiental. (n.d.). *Sistema de deshidratación de lodos*.
<https://www.tecproambiental.com/desaguadodelodos#:~:text=El filtro Tornillo o Screwpress,una gran presión expulsando el>

Universidad de los Llanos. (2019). *Manual de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento agua residual doméstica (PTAR)*. Universidad de los Llanos Villavicencio. [https://sig.unillanos.edu.co/phocadownloadpap/MN-GCL-02 MANUAL DE OPERACION Y MANTENIMIENTO DE LA PTAR.pdf](https://sig.unillanos.edu.co/phocadownloadpap/MN-GCL-02%20MANUAL%20DE%20OPERACION%20Y%20MANTENIMIENTO%20DE%20LA%20PTAR.pdf)

Valdivielso, A. (n.d.). *¿Qué es un tratamiento terciario de aguas residuales?*
<https://www.iagua.es/respuestas/que-es-tratamiento-terciario-aguas-residuales>

Villanueva, L., & Yance, J. Y. (2017). “*Mejoramiento de la eficiencia de remoción de materia orgánica y coliformes termotolerantes en la PTAR del distrito de Huáchac-Chupaca*” [Universidad Nacional del Centro del Perú].
[https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3781/Villanueva Aliga -Yance Soto.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3781/Villanueva%20Aliga%20-%20Yance%20Soto.pdf?sequence=1&isAllowed=y)