



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

“Diseño de un escenario interactivo para el aprendizaje autogestivo utilizando una planta de tratamiento de aguas residuales como caso de estudio”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

FRANCISCO JACINTO QUINTANA

DIRECTOR DE TESIS:

M. EN I. MARÍA RAFAELA GUTIERREZ LARA



Ciudad Universitaria, CDMX, 2023.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Irma Cruz Gavilán García.

VOCAL: María Rafaela Gutiérrez Lara.

SECRETARIO: Luz María Lazcano Arriola.

1^{er} SUPLENTE: José Agustín García Reynoso.

2^o SUPLENTE: Úrsula Manríquez Tolsá.

Sitio donde se desarrolló el tema: Laboratorio de Ingeniería Química,
Facultad de Química UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

María Rafaela Gutiérrez Lara.

SUPERVISOR TÉCNICO:

Luís Yair Bautista Blanco.

SUSTENTANTE:

Francisco Jacinto Quintana.



AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a la **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO** por darme la oportunidad de desarrollarme personalmente y por brindarme las herramientas necesarias para completar mi formación académica.

A la **Facultad de Química** por permitirme cursar mis estudios de licenciatura, por los valores que me inculcaron a lo largo de mis estudios y a los profesores que me guiaron y me brindaron las mejores herramientas.

A mi tutora, **M. en I. María Rafaela Gutiérrez Lara** por todo el apoyo que me brindó, por su confianza, su apoyo, por su tiempo y sus consejos, siempre le estaré agradecido por creer en mí. Por otro lado, quiero agradecer a mi supervisor técnico **M. en A. Luís Yair Bautista Blanco** por su tiempo, su paciencia y por ayudarme a concluir con este trabajo.

A mis sinodales **Dra. Irma Cruz Gavilán García** y a la **Dra. Luz María Lazcano Arriola** por la ayuda y por su tiempo para la elaboración de este trabajo. Gracias.

Al Proyecto PAPIME con clave PE107221 "Desarrollo de herramientas para el aprendizaje autogestivo de la protección ambiental a través de plataformas virtuales en la Facultad de Química" por permitirme desarrollar mi trabajo de tesis, por el apoyo económico y por el tiempo que me brindaron. Muchas gracias.



ÍNDICE

<u>LISTADO DE TABLAS.....</u>	6
<u>LISTADO DE FIGURAS Y ESQUEMAS</u>	8
<u>RESUMEN</u>	10
<u>INTRODUCCIÓN</u>	12
<u>ANTECEDENTES.....</u>	14
A. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	14
A.1 HISTORIA DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL (PTAR)....	14
A.2 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA CIUDAD DE MÉXICO.	17
A.3 CALIDAD Y NORMATIVIDAD.....	20
A.4 CLASIFICACIÓN, COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES	27
B. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL "CERRO DE LA ESTRELLA"	32
B.1 HISTORIA DE LA PTAR "CERRO DE LA ESTRELLA"	32
B.2 ESPECIFICACIONES DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PTAR "CERRO DE LA ESTRELLA".....	33
B.3 USOS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA EN PTAR "CERRO DE LA ESTRELLA".	34
C. APRENDIZAJE AUTOGESTIVO.....	35
C.1 IMPORTANCIA DE LAS TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN (TIC) EN LA EDUCACIÓN Y LA AUTOGESTIÓN.	36
D. ESCENARIO INTERACTIVO DE APRENDIZAJE (EIA).....	37
D.1 SOFTWARE ´S PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ESCENARIOS INTERACTIVOS DE APRENDIZAJE AUTOGESTIVO.	39
➤ D.2 REALIDAD VIRTUAL (VR)	40
<u>OBJETIVOS.....</u>	41
<i>OBJETIVO GENERAL</i>	41
<i>OBJETIVOS PARTICULARES</i>	41
<u>METODOLOGÍA.....</u>	42
ETAPA 1: REALIZAR UNA INVESTIGACIÓN Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS DIFERENTES PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA CIUDAD DE MÉXICO.....	42



ETAPA 2: REALIZAR UNA FICHA TÉCNICA EN DONDE SE ESPECIFIQUE EL FUNCIONAMIENTO Y LA UBICACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL.....	42
ETAPA 3: REALIZAR EL DIAGRAMA DE FLUJO PARA UBICAR CADA UNO DE LOS EQUIPOS QUE CONFORMA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL.	42
ETAPA 4: SE GENERARÁ UN MODELO 3D CON APOYO DEL SOFTWARE "BLENDER" DE ACCESO LIBRE PARA DESARROLLAR UN AULA VIRTUAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL.	43
ETAPA 5: RENDERIZADO DEL MODELO EN 3D GENERADO CON EL SOFTWARE BLENDER POR MEDIO DE UN MOTOR GRÁFICO A LA PLATAFORMA DE METAVERSO VR CHAT DE ACCESO LIBRE.	43
<u>RESULTADOS.....</u>	44
ETAPA 1	44
ETAPA 2	48
ETAPA 3	51
ETAPA 4	59
ETAPA 5	62
<u>ANÁLISIS DE RESULTADOS</u>	66
<u>CONCLUSIONES</u>	68
<u>REFERENCIAS</u>	70



LISTADO DE TABLAS

Tabla A.1.1 Desarrollo histórico del tratamiento de las aguas residuales.

Tabla A.2.1 Plantas Municipales de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación en la Ciudad de México.

Tabla A.3.1 Parámetros establecidos para el Índice de Calidad del Agua.

Tabla A.3.2 Promedio de aguas residuales municipales por tamaño de población.

Tabla A.3.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅).

Tabla A.3.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Tabla A.3.5 Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Tabla A.3.6 Normas Oficiales Mexicanas relacionadas con el tratamiento de las aguas residuales.

Tabla A.4.1 Composición de las aguas crudas de origen doméstico.

Tabla 1. Principales Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación en la Ciudad de México por Alcaldía.

Tabla 2. Límites Permisibles.

Tabla 3. Límites Máximos Permisibles.

Tabla 4. Límites máximos permisibles de contaminantes.

Tabla 5. Parámetros medidos en el influente que llega a la PTAR "Cerro de la Estrella" del año 2012 al 2020.



Tabla 6. Parámetros medidos en el efluente que llega a la PTAR "Cerro de la Estrella" del año 2012 al 2020.

Tabla 7. Características de las aguas residuales en la PTAR "Cerro de la Estrella".



LISTADO DE FIGURAS Y ESQUEMAS

Figura 1. La P.T.A.R “Cerro de la Estrella” está ubicada en la CDMX en el centro de México.

Figura 2. Vista satelital de la P.T.A.R “Cerro de la Estrella”.

Figura 3. Etapas del tratamiento de Aguas Residuales en la PTAR “Cerro de la Estrella”.

Figura 4. Caja de Llegada del influente.

Figura 5. Canales abiertos.

Figura 6. Criba Tamiz.

Figura 7. Canal Parshall.

Figura 8. Sedimentador Primario.

Figura 9. Bioselector anóxico.

Figura 10. Reactor Biológico.

Figura 11. Sistema Clariback.

Figura 12. Sala de sopladores.

Figura 13. Sensores del sistema Clariback.

Figura 14. Sistema de filtros.

Figura 15. Sistema de retrolavado.

Figura 16. Tanque de contacto de cloro.

Figura 17. Cárcamo de Bombeo.



Figura 18. Caja de llegada del influente representada en el modelo 3D con Blender.

Figura 19. Sedimentadores Primarios representados en modelo 3D con Blender.

Figura 20. Sedimentadores secundarios con sistema Clariback en modelo 3D con Blender.

Figura 21. Sistema de Filtración y Estación de Cárcamo de Bombeo con Blender.

Figura 22. Vista general del modelo en 3D de la PTAR "Cerro de la Estrella" en programa Blender.

Figura 23. Vista de la caja de llegada y criba tamiz en el modelo 3D de la PTAR "Cerro de la Estrella" representada en aula virtual.

Figura 24. Vista de tanques de almacenamiento de HClO_3 del modelo en 3D de la PTAR "Cerro de la Estrella" en el aula virtual.

Figura 25. Vista general sedimentación primaria en 3D de la PTAR "Cerro de la Estrella" en el aula virtual con tuberías de lodos.

Figura 26. Vista principal de uno de los sedimentadores primarios con modelo en 3D de la PTAR "Cerro de la Estrella" en el aula virtual.

Figura 27. Vista de Sala de máquinas y sopladores representados en el modelo en 3D de la PTAR "Cerro de la Estrella" en el aula virtual.

Figura 28. Vista general de los filtros utilizados en la PTAR "Cerro de la Estrella" al igual que los tanques en contacto con cloro gas dentro del aula virtual.

Figura 29. Estación de Cárcamo de Bombeo representada en el aula virtual de la Planta de tratamiento de agua residual "Cerro de la Estrella".



RESUMEN

Sandoval, et al. 2020 señala que debido a la difícil situación que atravesó el mundo derivado de la contingencia sanitaria por el COVID19, el estilo de vida de millones de personas cambió radicalmente, modificando la manera de trabajar y de aprender. La COVID-19 afectó todos los aspectos de las actividades humanas a nivel mundial, desde la educación, investigación, reuniones e interacciones sociales, transporte hasta la política. El sector educativo fue uno de los más impactados debido a la interrupción de las clases presenciales viéndose rebasados ante los nuevos retos que se presentaron con el confinamiento forzado, obligando a las instituciones a recurrir a los medios digitales para continuar con el proceso de enseñanza y aprendizaje. La emergencia también reveló las carencias y desigualdades tanto en la disponibilidad de recursos como en la preparación de profesores y alumnos para poder adaptarse a distintos modelos (a distancia, presenciales, o híbridos), por ello se necesitan soluciones innovadoras y eficaces con la finalidad de mejorar el aprendizaje de los estudiantes, y aprovechar al máximo los medios digitales que puedan ser utilizados en cualquier tipo de modalidad. Con base en las recientes experiencias se puede decir que, la educación a distancia transforma la interacción entre el profesor y el alumno, y entre los propios alumnos.

Para Lara, et al. 2016 "El Escenario Interactivo de Aprendizaje (EIA) es una herramienta que facilita las relaciones multidireccionales entre los actores del proceso de enseñanza-aprendizaje y resultan fundamentales para lograr un ambiente de compatibilidad con los objetivos pedagógicos que persiga el docente y también, con las necesidades que requiere cada alumno". Uno de los beneficios más significativo que se obtiene al utilizar los EIA es el hecho de que la forma de enseñar puede ser más dinámica dado que es impulsada por el propio estudiante.

El punto clave de utilizar Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) radica en hacer de estas una parte significativa en los métodos de enseñanzas, para mejorar el desempeño, pero lo más importante es que permite darle sentido a todo aprendizaje visto, por lo que los estudiantes obtienen un panorama más amplio, una mejor comprensión de los



conceptos estudiados, y una mayor familiarización con los sistemas físicos reales con los que puedan encontrarse en el campo profesional.

Este trabajo tiene como objetivo el diseño de una interfaz gráfica con un Escenario Interactivo de Aprendizaje como un recurso didáctico que fomente el aprendizaje autogestivo aplicado a una Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), combinando una variedad de herramientas virtuales como herramientas didácticas para dar soporte a profesores y estudiantes, así también como proyectar y transmitir el contenido de manera diferente, dejando de lado la enseñanza tradicional. El software que se utilizó para el diseño del EIA fue Blender 2.92.0 de acceso libre, el cual permite modelar objetos en 3D. Previo al diseño del EIA, se desarrolló la información técnica correspondiente al estudio de las diferentes Plantas de Tratamiento de Agua Residual instaladas en la Ciudad de México, para este trabajo se seleccionó la Planta de Tratamiento de Agua Residual "Cerro de la Estrella" ubicada en Avenida San Lorenzo No. 312, colonia San Juan Xalpa, Alcaldía Iztapalapa al oriente de la Ciudad de México. Posteriormente se concretó una visita de forma presencial a las instalaciones de la PTAR seleccionada para conocer su proceso productivo, disposición de los equipos y marco normativo. Se realizó el diseño en bloques de cada uno de los equipos que conforman la planta, para esta etapa se realizaron más detalles de los materiales y texturas al diseño de los equipos y la planta, así como su entorno. Una vez concluido lo anterior se exportó la planta en 3D al metaverso por utilizando el motor gráfico Unity, se exportó el modelo al programa VR Chat en el formato estandarizado para la transmisión de objetos gráficos GLTF.



INTRODUCCIÓN

El repentino brote en China de la SARS COVID-19 y su rápida expansión por todo el mundo, ha representado; por su gravedad, un reto global sin precedentes. Tanto el ámbito social e individual padecieron los efectos de la emergencia sanitaria, el campo educativo resultó gravemente afectado, pues esto implicó un cierre e interrupciones parciales en los sistemas educativos nacionales y locales. A los pocos meses del brote de la COVID-19, el estilo de vida de los seres humanos cambió drásticamente. El cierre inmediato de las instituciones educativas en todo el mundo mostró la necesidad de la adaptación y despliegue de nuevas tecnologías en la educación. La UNESCO estima que el 90% de la comunidad estudiantil a nivel mundial se vio afectada a causa de la pandemia, lo que representa algo sin precedentes, en ningún momento de la historia de la humanidad se habían visto suspendidas las actividades de más de 1,215 millones de estudiantes de todos los niveles educativos en todo el planeta. Esta pandemia también expuso las carencias y desigualdades tanto en la disposición de recursos como en la preparación de profesores y estudiantes para transitar hacia la modalidad de educación a distancia, aunque muy pocas estuvieron preparadas para hacer este cambio de manera inmediata (Garduño, 2021).

Ante tal escenario, una de las cuestiones que surgen entorno a la pandemia y sus efectos sobre la educación se relaciona con el riesgo de contagio y, por consecuencia, el confinamiento obligado y un cierre de las instituciones educativas, dando paso al surgimiento de nuevas prácticas de enseñanza que pueda interrelacionar los distintos modelos educativos. Las instituciones educativas han sido desplazadas por espacios habitacionales en donde los estudiantes atienden a través de un dispositivo electrónico las actividades propuestas por los docentes como discusión de resultados y tareas de investigación. Por ello, son necesarias las propuestas de innovación educativa para poder atender dicha situación.

De acuerdo con López, et al. 2015 la educación es un proceso que involucra personas que están en aprendizaje, en crecimiento y que se desenvuelve en un entorno en constante cambio. Cercas, et al. 2013 identifica la innovación educativa con la incorporación de sistemas de información, herramientas digitales o herramientas didácticas dentro de un aula, lo que significa que existen cambios dentro del proceso de enseñanza aprendizaje, creando y promoviendo nuevas opciones pedagógicas que impactan positivamente en el aprendizaje de los estudiantes.



Desde el punto de vista de Delgado, et al. 2020 la pandemia obligó a la comunidad académica ha desarrollar estrategias virtuales y a distancia que permitieran continuar con el proceso de enseñanza aprendizaje; sin embargo, no ha sido fácil, ya que tanto estudiantes como docentes se han enfrentado a situaciones de carácter emocional, academica, física y económica. La educación a distancia brinda a los docentes la posibilidad de ser más creativos con el uso de las tecnologías de información y comunicación (Sapién, 2020). Por otra parte, las materias que están conformadas por una parte teórica y un componente práctico se ven beneficiadas gracias a que se refuerza lo aprendido, ya sea en un laboratorio virtual o de simulación, brindando a los estudiantes la oportunidad de trabajar de una manera más segura (Sandoval, 2020).

Tanto los docentes como las instituciones educativas no estaban preparadas para realizar este cambio radical en un plazo de tiempo tan corto; sin embargo, los sistemas educativos promovieron que los alumnos siguieran aprendiendo durante el tiempo de cuarentena, a fin de salvaguardar la distribución del bien educativo (Vargas, 2020). Entorno a estas condiciones, surge la premisa de ¿qué beneficios son los que se adquieren al emplear herramientas digitales en la educación superior? y ¿qué aspectos se deben retomar para los distintos sistemas educativos que existen actualmente?.

La implementación de nuevas tecnologías de información y comunicación en el marco educativo requieren de una evaluación de los programas existentes y es necesario aprender a gestionar el cambio que se produce, por lo que las herramientas digitales tienen como finalidad generar clases más dinámicas. Las posibilidades que brindan estas tecnologías permiten complementar la docencia tradicional a través de los escenarios interactivos de aprendizaje dentro de la red, pero está no la sustituye. Por lo tanto, las herramientas digitales adquieren un valor como apoyo a la docencia de forma presencial, facilitando que los estudiantes adquieran materiales de una forma accesible, además de complementar los conocimientos adquiridos a lo largo de su vida académica. El reto es hacer que el uso de estos recursos sea una herramienta de apoyo para sus actividades académicas (Gutiérrez, 2019).

Durante la elaboración de este proyecto, se procedió a desarrollar una herramienta didáctica como estrategia educativa a partir de una planta de tratamiento de agua residual lo cual nos ayudó a plasmar a partir de un modelo 3D los conocimientos teóricos de una de las áreas de la Ingeniería Química: **El tratamiento del agua residual.**



ANTECEDENTES

A. Principios básicos del tratamiento de aguas residuales.

A.1 Historia de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR).

El tratamiento de aguas residuales es relativamente reciente. Su inicio comienza a finales del siglo XIX y principios del siglo XX desarrollándose como consecuencia de la relación entre la contaminación de los cuerpos de agua y las enfermedades de origen hídrico. En principio, el tratamiento se hacía mediante la descarga de las aguas residuales al suelo, pero la superficie de los terrenos no se dio abasto para absorber un mayor caudal de aguas residuales (CONAGUA, 2021). En Inglaterra, después de la epidemia del cólera de mitad del siglo XIX, se inició la construcción de los sistemas de alcantarillado, pero el tratamiento de aguas residuales recibió poca atención, convirtiéndose en un problema.

Para evitar afectaciones a la salud pública, se llevaron a cabo nuevos métodos de tratamiento. De este modo, se estudió la precipitación química, digestión de lodos, filtración intermitente en arena, filtración en lechos de contacto, aireación. En 1912 se desarrolló el proceso de lodos activados. En la Tabla A.1.1 se presenta el desarrollo histórico de tratamiento de aguas residuales:

Tabla A.1.1 Desarrollo histórico del tratamiento de las aguas residuales.

	Desarrollo
A.C.	Irrigación con aguas residuales - Atenas, Grecia.
1550	Uso de aguas residuales en agricultura - Alemania.
1700	Uso de aguas residuales en agricultura - Reino Unido.
1762	Precipitación química de aguas residuales - Reino Unido.
1860	Dispositivo de Mouras. Tratamiento anaerobio de sólidos de aguas residuales.
1865	Experimentos sobre microbiología de digestión de lodos - Reino Unido.



Tabla A.1.1 Continuación.

1868	Investigaciones sobre filtración intermitente de aguas residuales - Reino Unido.
1870	Filtración en arena de aguas residuales - Reino Unido.
1876	Primeras fosas sépticas - EE. UU.
1882	Experimentos sobre aireación de alcantarillas - Reino Unido.
1884	Introducción de las rejillas de desbaste - EE. UU.
1887	Estación experimental de Lawrence para el estudio de agua y aguas residuales. Massachusetts - EE. UU.
1887	Primera planta de precipitación química - EE. UU.
1889	Filtración en lechos de contacto - Massachusetts. EE. UU.
1891	Digestión de lodos - Alemania.
1895	Recolección de metano de fosas sépticas y su empleo en alumbrado - Reino Unido.
1898	Molinete hidráulico para filtros percoladores - Reino Unido
1904	Empleo de desarenadores - EE. UU.
1904	Fosa séptica Travis de dos pisos - Reino Unido.
1906	Tanque Imhoff - Alemania. Primera planta en 1908.
1906	Cloración de aguas residuales - EE. UU.
1908	Ley de Chick - EE. UU.
1911	Aplicación de tanques Imhoff - EE. UU.
1911	Digestión separada de lodos - EE. UU.
1914	Ardern y Locket publican su trabajo sobre lodos activados.
1916	Primera planta municipal de lodos activados.
1954	Inicia la operación de la primera planta de lodos activados en la Ciudad de México.
1957	Pöpel y Hartmann desarrollan y patentan los biodiscos.
1961	En EE. UU. Ludzac y Ettinger, y en Suiza, 1964 Whurmann definen las características de la nitrificación y desnitrificación.
1965	Levin y Shapiro, desarrollan las bases del sistema PhoStrip
1967	William Irvine y Lloyd Ketchum, de la Universidad de Notre Dame en EE. UU. patentan los sistemas SBR (<i>sequencing batch reactor</i>).
1973	En Sudáfrica, James Barnard patenta el proceso BarDenPho® (en la década de 1970, se desarrollaron otros procesos: A/O (anaerobic-oxic) y A2/O (anaerobic-anoxic-oxic) para remoción de nutrientes.
1976	Gatze Lettinga de la Universidad de Wageningen en Holanda, implementó por primera ocasión el reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB, por sus siglas en inglés) en una industria azucarera.



Tabla A.1.1 Continuación.

1990-1992	En Francia, la compañía OTV desarrolla los filtros biológicos aerados y patenta el Biostyr.
1996	En Holanda, la compañía STOWA patenta el proceso SHARON® (nitrificación controlada).
1999	El Instituto Coreano de Ciencia y Tecnología, patenta la primera celda de combustible microbiana, que da inicio a una serie de estudios para producir electricidad a partir del tratamiento de aguas residuales.
2000	En Alemania se construye la primera planta (SBR) con Anammox (oxidación anaerobia de amonio con nitratos).
2008	El grupo de investigación del Dr. Mark Van Loosdrecht, de la Universidad Técnica de Delft en Holanda, desarrollan el proceso NEREDA®, que permite la granulación aerobia, de tal manera que se admite la reducción del tamaño de los sedimentadores.
2009	En el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, se logra operar un sistema de producción automatizado para la producción de polihidroxicanoatos (biopolímeros precursores de los plásticos) usando lodos activados y biorreactores discontinuos.
2010	En la Universidad de Stanford se desarrolla el proceso CANDO® (Coupled Aerobic-anoxic Nitrous Decomposition Operation), que convierte la forma más común del nitrógeno (NH ₄ ⁺) en nitrógeno gas, mientras que simultáneamente se genera energía y se recupera fosforo.
2011	En el laboratorio de Ingeniería Química Ambiental y Química ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México, inicia el desarrollo de una tecnología para la producción de electricidad a partir del tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales.

Nota: Fuente: CONAGUA (2021) Manual de Agua Potable, Alcantarillado, y Saneamiento "Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales" (p. 16 y 17). México, Ciudad de México).

Las plantas de tratamiento se presentan como una serie de operaciones y procesos unitarios que incluyen cambios físicos, químicos y biológicos que además de separar contaminantes del agua, permite la producción de energía o también la recuperación de nutrientes, obteniendo subproductos de utilidad para diferentes actividades económicas. (CONAGUA, 2021).



A.2 Plantas de tratamiento de agua residual en la Ciudad de México.

El crecimiento mundial de la demanda de agua dulce, así como el aumento de la contaminación y deterioro de la calidad del agua, se debió al escaso e inadecuado tratamiento de aguas y de los depósitos de basura que han reducido notablemente la disponibilidad de este líquido en el planeta. (SEDEMA, 2015).

Actualmente, en la Ciudad de México (CDMX) habitan 9.2 millones de habitantes, además de contar con un gran número de población flotante, es una de las ciudades más pobladas de la República Mexicana, por lo que abastecer de agua a la población para satisfacer sus actividades domésticas, áreas productivas de la industria, comercio y servicios representa grandes esfuerzos humanos, económicos, ambientales y de infraestructura (INEGI, 2020). Por ello, una alternativa política e hídrica en la Ciudad de México es la depuración del agua usada que es enviada al drenaje, o bien llamado tratamiento de aguas residuales.

Las PTAR's surgieron en la CDMX en los años 50's con la construcción de la primer PTAR en Chapultepec (1956), posteriormente se construyeron las plantas de Coyoacán (1958) y Ciudad Deportiva (1959) con una capacidad de diseño de 1190 L/s; la principal función de estas fue mantener el nivel de los lagos, canales y riego de áreas verdes (SACMEX, 2018).

Del año 1960 a 1979, se construyeron seis plantas más: San Juan de Aragón (1964), Tlatelolco (1965), Iztacalco y Cerro de la Estrella (1971), Bosques de las Lomas (1973) y Acueducto de Guadalupe (1975) con el objetivo de del regado de áreas verdes, riego agrícola, etc. En los años 1980 al 2000 se construyeron 12 plantas más en diferentes zonas de la ciudad: H. Colegio Militar, Reclusorio, San Luis Tlaxialtemalco (1989), Abasolo y Parres (1993), Abasolo y Parres (1993), Campo Militar 1, La Lupita, PEMEX, y San Miguel Xicalco (1994), San Andrés Mixquic y San Pedro Actopan (1997), con tan solo 413 L/s de capacidad de diseño conjunta. En el mismo periodo también se construyó la planta Santa Fe y Tetelco para el riego de áreas verdes e infiltración y para el saneamiento de los cauces de la zona Oriente respectivamente. En el año 2005, con



recursos del Fondo de Seguridad del Gobierno del Distrito Federal (FOSEGDF), se construyó la PTAR Santa Martha Acatitla con una capacidad de 14 L/s para el servicio del Complejo Penitenciario de Santa Martha Acatitla, siendo la primera planta a nivel gobierno local para reusó en mingitorios, muebles sanitarios, además del riego de áreas verdes y el lavado de aceras SACMEX (2018).

Actualmente el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) cuenta con una infraestructura de 25 instalaciones de este tipo con una capacidad instalada de 5583.4 L/s . Estas son administradas, a través de la Dirección de Operación, la cual tiene a su cargo la gestión del drenaje (drenaje profundo, desazolve y tratamiento de aguas residuales) y agua potable (plantas potabilizadoras y manejo de redes). En la Tabla A.2.1 se muestran las principales plantas por delegación que operan en la CDMX:

Tabla A.2.1 Plantas Municipales de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación en la Ciudad de México.

Municipio	Nombre de la planta	Proceso	Caudal Tratado (L/s)
Álvaro Obregón	Santa Fe	Lodos Activados con remoción de N	54.2
Azcapotzalco	El Rosario	Lodos activados (Convencional)	11.3
Coyoacán	Coyoacán	Lodos Activados (Convencional)	126.9
Coyoacán	Ciudad Unversitaria	Lodos activados (MBR)	12
Cuauhtémoc	Tlatelolco	Lodos Activados (Convencional)	12.1
Gustavo A. Madero	San Juan de Aragón	Lodos Activados (Convencional)	150.1
Gustavo A. Madero	Acueducto de Guadalupe	Lodos Activados (Convencional)	59.3
Iztacalco	Ciudad Deportiva	Lodos Activados (Convencional)	94.6



Tabla A.2.1 Continuación.

Iztacalco	Iztacalco	Lodos Activados (Convencional)	6.7
Iztapalapa	Cerro de la Estrella	Lodos Activados con remoción de N	1496.0
Magdalena Contreras	Magdalena Contreras	Lodos Activados	19.9
Miguel Hidalgo	Chapultepec	Lodos activados (MBR)	42.8
Miguel Hidalgo	Bosques de las lomas	Lodos Activados (Aereación extendida)	20.3
Miguel Hidalgo	Campo militar No. 1-A	Lodos Activados (Convencional)	30
Milpa Alta	San Pedro Atocpan	Lodos Activados	19
Tláhuac	El llano	Lodos Activados	64.1
Tláhuac	San Juan Ixtayopan (La Lupita)	Lodos Activados (Convencional)	12.2
Tláhuac	Tetelco	Lodos Activados (Convencional)	12.3
Tláhuac	San Lorenzo	Otro	51.1
Tláhuac	San Andres Mixquic	Lodos Activados con remoción de N	18.2
Tlalpan	Honorable Colegio Militar	Lodos Activados (Convencional)	26
Tlalpan	Parres	Lodos Activados (Convencional)	3.0
Xochimilco	San Luis Tlaxialtemalco	Lodos Activados (Convencional)	52.3

Nota: Fuente: CONAGUA (2020) Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación (p. 116 y 117). México, Ciudad de México).



La demanda de consumo de agua en la CDMX aumenta año con año, por lo que las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales tienen como finalidad que las descargas de aguas residuales de las fuentes fijas puedan cumplir con la normatividad ambiental (SEDEMA, 2015).

A.3 Calidad y Normatividad.

➤ Calidad del agua.

Para la determinación del tratamiento, es necesario conocer la cantidad y calidad de las aguas crudas a ser tratadas, y las normas de calidad para el cumplimiento del efluente de la planta de tratamiento. Una vez que se cuenta con esa información, es posible la determinación de los distintos conjuntos de procesos, para el ajuste de las características del afluente a las características deseadas (CONAGUA, 2021).

A principio de los años 60, ante la necesidad de encontrar un método para dar a conocer la calidad del agua a la población, se desarrolló un sistema estimativo de calidad del agua que requirió de la medición física de los parámetros de contaminación del agua y el uso de una escala estandarizada de medición para expresar la relación entre la existencia de varios contaminantes en el agua y el grado de impacto en sus diferentes usos.(SEMARNAT, 2022).

Este sistema se conoce cómo el Índice de Calidad del Agua (ICA) lo que permitía hacer comparaciones de niveles de contaminación. El ICA se define como el grado de contaminación existente en el agua a la fecha de un muestreo expresado como un porcentaje de agua pura. Si el agua se encuentra altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual a 0%, por otro lado para el agua que se encuentra en excelentes condiciones su ICA será del 100%. Este índice consideró 18 parámetros para su cálculo con distintos pesos relativos (W_i). En la Tabla A.3.1 se pueden observar los parámetros considerados.



Tabla A.3.1 Parámetros establecidos para el Índice de Calidad del Agua.

Parámetro	Peso (Wi)	Parámetro	Peso (Wi)
Demanda bioquímica de oxígeno	5.0	Nitrógeno en nitratos	2.0
Oxígeno disuelto	5.0	Alcalinidad	1.0
Coliformes fecales	4.0	Color	1.0
Coliformes totales	3.0	Dureza total	1.0
Sustancias activas al azul de metileno (Detergentes)	3.0	Potencial de hidrógeno (pH)	1.0
Conductividad eléctrica	2.0	Sólidos suspendidos	1.0
Fosfatos totales	2.0	Cloruros	0.5
Grasas y aceites	2.0	Sólidos disueltos	0.5
Nitrógeno amoniacal	2.0	Turbiedad	0.5

FUENTE: Elaboración propia. Adaptado de "Compendio de Estadísticas ambientales" SEMARNAT, CONAGUA, Estadísticas del Agua en México, 1ª edición, CNA. México 2011.

En los últimos años, el crecimiento poblacional e industrial ha impactado los cuerpos de aguas y sus descargas, las cuales vierten una serie de contaminantes tóxicos tales como metales pesados y compuestos orgánicos. La calidad de las aguas residuales depende del tamaño de la población (SEMARNAT, 2011). La Tabla A.3.2 muestra el promedio de aguas residuales municipales por tamaño de población.



Tabla A.3.2 Promedio de aguas residuales municipales por tamaño de población.

Parámetro	Tamaño de la población (Número de habitantes)				
	2,500 a 10,000	10,000 a 20,000	20,000 a 50,000	50,000 a 100,000	Promedio
PH	7.4	6.9	6.9	7.3	7.1
Temperatura (°C)	25	20	23	22	23
DBO₅	264	299	254	301	280
DQO	698	719	609	430	614
SS (mL/L)	9	5	8	3	6
Grasas y aceites	56	44	65	96	65
N-NH₃	24	28	14	12	20
N-Orgánico	18	23	23	9	18
N-Total	37	44	30	24	34
Fosfatos Totales	20	24	16	29	22
Coliformes Totales NMP/100mL	7	773	14	107	225
Sólidos:					
Totales	1552	1141	1391	932	1254
Suspendidos Totales	286	309	233	167	249
Dispersos Totales	1266	832	1158	765	1005
Vol. Totales	737	871	449	349	602
Volátiles Suspendidos	223	192	151	139	176
Volátiles Dispersos	514	379	298	210	350
Fijos Totales	815	570	942	583	728
Fijos Suspendidos	116	145	183	58	126
Fijos Dispersos	699	425	759	525	602

Nota: Fuente: CONAGUA (2021) Manual de Agua Potable, Alcantarillado, y Saneamiento "Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales" (p. 16 y 17). México, Ciudad de México.



El ICA ha sido sustituido y se ha decidido utilizar algunos parámetros como indicadores para evaluar la calidad del agua, entre estos parámetros se encuentra la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST). En las Tablas A.3.3, A.3.4 y A.3.5 se muestran las escalas de clasificación de la calidad del agua por parámetro.

Tabla A.3.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO_5).

Criterio (mg/L)	Clasificación	Color
$DBO_5 \leq 3$	EXCELENTE No contaminada	Azul
$3 < DBO_5 \leq 6$	BUENA CALIDAD Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable	Verde
$6 < DBO_5 \leq 30$	ACEPTABLE Con indicio de contaminación de aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente	Amarillo
$30 < DBO_5 \leq 120$	CONTAMINADA Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.	Naranja
$DBO_5 > 120$	FUERTEMENTE CONTAMINADA Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.	Rojo

FUENTE: Elaboración propia. Adaptado de "Compendio de Estadísticas ambientales" SEMARNAT, CONAGUA, Estadísticas del Agua en México, 1ª edición, CNA. México 2011

Tabla A.3.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Criterio (mg/L)	Clasificación	Color
$DQO \leq 10$	EXCELENTE No contaminada	Azul
$10 < DQO \leq 20$	BUENA CALIDAD Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable.	Verde



Tabla A.3.4 Continuación.

20 < DQO ≤ 40	ACEPTABLE Con indicio de contaminación de aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente	Amarillo
40 < DQO ≤ 200	CONTAMINADA Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.	Naranja
DQO > 200	FUERTEMENTE CONTAMINADA Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.	Rojo

FUENTE: Elaboración propia. Adaptado de "Compendio de Estadísticas ambientales" SEMARNAT, CONAGUA, Estadísticas del Agua en México, 1ª edición, CNA. México 2011

Tabla A.3.5 Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Criterio (mg/L)	Clasificación	Color
SST ≤ 25	EXCELENTE Clase de excepción, muy buena calidad.	Azul
25 < SST ≤ 75	BUENA CALIDAD Aguas superficiales con bajo contenido de sólidos suspendidos, generalmente condiciones naturales. Favorece la conservación de comunidades acuáticas y el riego agrícola irrestricto.	Verde
75 < SST ≤ 150	ACEPTABLE Aguas residuales con indicios de contaminación. Con descarga de aguas residuales tratadas biológicamente. Condición regular para peces. Riego agrícola restringido.	Amarillo
150 < SST ≤ 400	CONTAMINADA Aguas superficiales con mala calidad con descargas de aguas residuales crudas. Aguas con alto contenido de material suspendido.	Naranja



Tabla A.3.5 Continuación.

SST > 400	FUERTEMENTE CONTAMINADA Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales con alta carga contaminante. Mala condición para peces.	Rojo
---------------------	--	------

FUENTE: Elaboración propia. Adaptado de "Compendio de Estadísticas ambientales" SEMARNAT, CONAGUA, Estadísticas del Agua en México, 1ª edición, CNA. México 2011

Es importante señalar que estos parámetros no impiden llevar a cabo evaluaciones de calidad del agua de manera específica, no se incluyen parámetros como la presencia de metales pesados o compuestos orgánicos.

➤ **Normatividad en materia de aguas residuales.**

La normatividad en materia del agua se refiere al conjunto de leyes, reglamentos, normas y disposiciones legales que regulan y establecen las condiciones para el uso, aprovechamiento, gestión, conservación y aprovechamiento del agua. Esta normatividad esta diseñada para garantizar un manejo sostenible y equitativo del agua (CONAGUA, 2023). En México la normatividad incluye la Ley de Aguas Nacionales y otras disposiciones legales relacionadas que establecen las reglas para la concesión y asignación de derechos del agua, la regulación de descargas, la protección de cuerpos de agua, entre otros aspectos. Estas normas son administradas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2023).

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) tiene como objetivo el regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable (CONAGUA, 2021). Es una legislación mexicana que establece el marco legal para la administración y uso de las aguas nacionales, incluyendo las aguas superficiales y subterráneas.



Dentro del alcance que tiene la legislación se encuentran:

Control de descargas: Establece límites y regulaciones para la descarga de aguas residuales industriales y municipales, con el objetivo de proteger la calidad del agua.

Autorizaciones y Permisos: Define los procedimientos para obtener autorizaciones y permisos para el vertido de aguas residuales, estableciendo requisitos técnicos y condiciones.

Sanciones y Responsabilidades: Establece sanciones para aquellos que incumplen las regulaciones, con el propósito de garantizar el cumplimiento y la responsabilidad ambiental.

Para los procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, la corriente concentrada está constituida por lodos biológicos. En México los servicios públicos relacionados con los servicios de agua se presentan en el artículo 115 constitucional y éstos mencionan lo siguiente:

III. Los municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos siguientes:

A) agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales; [...]

Esta facultad se ejerce en el marco de las leyes federales y estatales, con el objetivo de regular la calidad del agua para los distintos usos se crearon distintas Normas Oficiales Mexicanas (NOM's) las cuales son regulaciones técnicas de observancia obligatoria expendidas por las dependencias competentes, éstas tienen como finalidad establecer las características que deben reunir los procesos o servicios cuando estos puedan constituir un riesgo para la seguridad de la población o tanto dañar la vida humana como el medio ambiente; así como aquellas relativas a terminología y las que se refieran a su cumplimiento y aplicación. Las primeras están contenidas en el Reglamento de Aguas Nacionales. Por su parte, las normas técnicas están contenidas en un conjunto de Normas Mexicanas Oficiales, las normas que regulan las descargas de aguas residuales para



el caso específico de las plantas de tratamiento de aguas se encuentran en la Tabla A.3.2.6.

Tabla A.3.6 Normas Oficiales Mexicanas relacionadas con el tratamiento de las aguas residuales.

NOM-001-SEMARNAT-2021: Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.
NOM-002-SEMARNAT-1996: Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
NOM-003-SEMARNAT-1997: Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

FUENTE: Elaboración propia. Adaptado de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1997, NOM-002-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997 publicadas en el Diario Oficial de la Federación.

A.4 Clasificación, composición y características de las aguas residuales

- **Clasificación**

Se define a las aguas residuales como las aguas de composición variada provenientes de las descargas de uso público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento, y en general de cualquier uso, así como la mezcla de ellas (Ley de Aguas Nacionales, 2020).

- **Aguas residuales municipales**

Son aquellas procedentes de zonas residenciales, instalaciones públicas o de recreo e instalaciones comerciales o similares. El agua residual municipal fresca y recién generada presenta un color gris y olor a queroseno, pero al pasar el tiempo de ser generada se vuelve séptica y pestífera con un olor a sulfhídrico y un característico color negro (Noyola, 2012).



➤ Aguas residuales industriales

Son aquellas generadas por la industria, lo cual significa que en muchas ocasiones deben ser tratadas por las mismas fuentes que las generan antes de poder ser descargadas al alcantarillado municipal, esto debido a la posible presencia de metales pesados o compuestos tóxicos y peligrosos, como fenoles y compuestos orgánicos tóxicos que no pueden ser removidos mediante los tratamientos convencionales de aguas residuales municipales, aunque en algunos casos donde las aguas industriales poseen características compatibles con las municipales es posible descargarlas directamente al alcantarillado y tratarlas con los mismos procesos que a las aguas municipales (Noyola, 2013).

• Composición

El agua residual contiene componentes físicos, químicos y biológicos. Es una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos, suspendidos o disueltos en el agua. La mayor parte de la materia orgánica consiste en residuos de alimentos, heces, material vegetal, sales minerales, materiales orgánicos y materiales diversos como jabones y detergentes sintéticos (Rojas, 2002). En la Tabla A.4.1 se muestran parámetros individuales presentes en las aguas residuales de origen doméstico o municipal.

Tabla A.4.1 Composición de las aguas crudas de origen doméstico.

Parámetro	Concentración		
	Alta	Media	Baja
Sólidos Totales (ST)	1200	720	350
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	850	500	250
Fijos	525	300	145
Volátiles	325	200	105
Suspendidos Totales	350	220	100
Fijos	75	55	20
Volátiles	275	165	80
Sólidos Sedimentables (mL/L)	20	10	5



Tabla A.4.1 Continuación.

DBO₅ (a 5 días)	400	220	110
COT	290	160	80
DQO	1000	500	250
Nitrógeno	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoniaco	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fosfatos	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
Clorados	100	50	30
Alcalinidad (CaCO)	200	100	50
Grasas	150	100	50

Nota: Fuente: CONAGUA (2021) Manual de Agua Potable, Alcantarillado, y Saneamiento "Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales" (Pp. 156). México, Ciudad de México).

Siendo unidades en mg/L, excepto los sólidos sedimentables.

➤ **Características Físicas**

Las características físicas de las aguas residuales comprenden propiedades que se pueden observar y medir directamente sin cambiar la composición de los residuos sólidos presentes en el agua (Díaz, 2013). La característica física más importante de las aguas residuales es su contenido de sólidos totales, el cual está compuesto por materia flotante y materia en suspensión, en dispersión coloidal y en disolución. Otras características físicas son la temperatura, el color y el olor (Ferrer, 2008).

- *Temperatura*

La temperatura del agua residual puede variar según su origen. Las aguas residuales industriales, en particular, pueden tener temperaturas elevadas debido a los procesos de fabricación (Hernández, 2015). La medición de este parámetro físico importante ya que los principales procesos biológicos para el tratamiento de las aguas residuales dependen de la temperatura, ésta afecta directamente las reacciones químicas y las velocidades de reacción (Rodríguez, 2006).



- *Color*

El color del agua residual puede estar influenciado por la presencia de sustancias orgánicas e inorgánicas. La descarga de ciertos compuestos puede proporcionar colores característicos al agua (Burton, 2003). En general, el color es un parámetro para estimar la condición de las aguas residuales. Un color gris claro es característico de aguas que han sufrido algún grado de descomposición o que llevan poco tiempo en los sistemas de recolección. Si el color es gris oscuro o negro, se trata de aguas sépticas que han sufrido una fuerte descomposición bacteriana bajo condiciones anaerobias. Dicho oscurecimiento ocurre con frecuencia debido a la formación de sulfuros, en particular sulfuro ferroso (Noyola, 2013).

- *Olor*

El olor del agua residual puede ser indicativo de la presencia de ciertos compuestos, como productos químicos o materia orgánica en descomposición (Rojas, 2002).

- *Apariencia*

La apariencia general del agua residual puede variar, desde aguas limpias hasta aguas con sólidos en suspensión, espumas, etc (Vázquez, 2003).

➤ **Características Químicas**

Son propiedades que definen la potencialidad de la materia contenida en todo tipo de residuo para transformarse, cambiar de energía o alterar su estado. Los parámetros más empleados son carbono orgánico total (COT), fósforo total, nitrógeno total, relación de carbono-nitrógeno, cenizas, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), azufre, sales, ácidos, bases y metales pesados.

La DBO₅ y la DQO se utilizan para determinar la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua proveniente principalmente de las descargas de aguas residuales, de origen municipal y no municipal.



Por otro lado, el aumento de la DQO indica presencia de sustancias provenientes de descargas no municipales (SEMARNAT, 2011).

La DBO_5 determina la cantidad de materia orgánica biodegradable y la DQO mide la cantidad total de materia orgánica. El incremento de la concentración de estos parámetros incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua con la consecuente afectación a los ecosistemas acuáticos.

Los SST tienen su origen en las aguas residuales y erosión del suelo. El incremento de los niveles de SST hace que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática. Estos parámetros permiten reconocer gradientes que van desde una condición relativamente natural o sin influencia de la actividad humana; hasta agua que muestra indicios o aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipal, así como áreas con deforestación severa (SEMARNAT, 2011).

➤ **Características Biológicas**

Para Jacinto (2019), el agua es un medio en el cual habitan especies biológicas. El rango de organismos es un parámetro de la calidad del agua, debido a que su presencia o su ausencia indican la situación en la cual se encuentra un cuerpo de agua. Ciertos organismos se pueden utilizar como indicadores de la presencia de algún contaminante, algunos de estos organismos son:

- *Bacterias*

Las bacterias se clasifican como eubacterias procariotas unicelulares, debido a su forma, las bacterias se pueden clasificar en cuatro grupos:

- 1) Esferoidales.
- 2) Bastón.
- 3) Bastón curvado.
- 4) Filamentosas.



La función de las bacterias en los procesos de descomposición y estabilización de la materia orgánica resulta de gran importancia en los procesos de tratamiento de aguas residuales.

- *Virus*

Los virus son partículas parasíticas formadas por un cordón de material genético ácido desoxirribonucleico (ADN) o ácido ribonucleico (RNA) con una capa de recubrimiento proteínico. Los virus excretados por los seres humanos representan un importante peligro para la salud pública, se ha atribuido al agua de abastecimiento ciertos brotes de hepatitis infecciosa.

- *Protozoarios*

Los protozoarios son microorganismos eucariotas cuya estructura está formada por una sola célula abierta, se alimentan de bacterias y otros microorganismos microscópicos. Tienen una importancia capital, tanto en el funcionamiento de los tratamientos biológicos como en la purificación de cursos de agua ya que son capaces de mantener el equilibrio natural entre los diferentes tipos de microorganismos.

B. Planta de tratamiento de agua residual “Cerro de la Estrella”

B.1 Historia de la PTAR “Cerro de la Estrella”

Su construcción inició en el año 1968, con la finalidad de tratar las aguas residuales de las Delegaciones Coyoacán, Benito Juárez e Iztacalco bajo el esquema de un proceso biológico a nivel secundario de lodos activados convencional, para una capacidad de diseño de 2000 lps, quedando inicialmente construidos dos módulos para una capacidad nominal de 1,000 lps cada uno, iniciando la producción de agua tratada en 1971; posteriormente, se llevó a cabo una primera ampliación en el año 1984, con otra unidad de 1000 lps y en el año 1994, se concluye con la construcción del cuarto módulo de 1000 L/s para sumar 4000 L/s (Riveros, 2013).



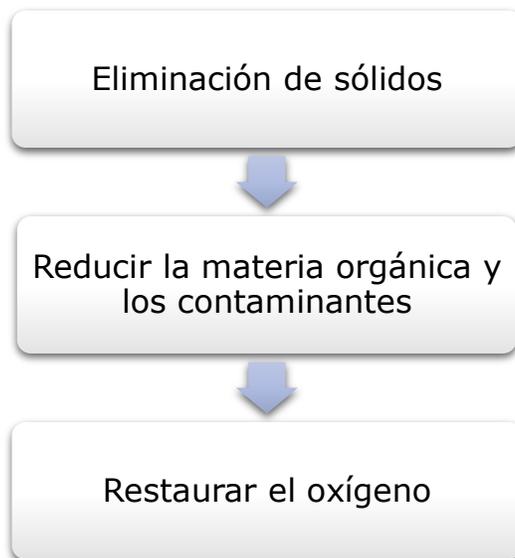
Debido al mal estado de las instalaciones, a partir de los años 2007 y 2008, fue necesario modificar el proceso de tratamiento para adecuarlo a los estándares necesarios que son requeridos por parte de los productores agrícolas y prestadores de servicios turísticos debido a que solicitaban mejorar la calidad del agua en los canales. En el diseño inicial de la planta solo se contempló la remoción de DBO_5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno), por lo que se adicionaron celdas anóxicas para la eliminación de nitrógeno y fósforo, disminuyendo su capacidad de diseño a 300 Lps (Hernández, 2015).

B.2 Especificaciones del funcionamiento de la PTAR “Cerro de la Estrella”.

La PTAR “Cerro de la Estrella” opera dentro de la delegación Iztapalapa en el oriente de la Ciudad de México y forma parte de las 25 instalaciones de este tipo que el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX). Estas son administradas, a través de la Dirección de Operación, la cual tiene a su cargo la gestión del drenaje (drenaje profundo, desazolve y tratamiento de aguas residuales) y agua potable (plantas potabilizadoras y manejo de redes) (Riveros, 2013).

La planta está conformada por 4 unidades de proceso en donde su principal insumo proviene del agua combinada (doméstica, lluvia y de servicios), misma que es conducida por el colector Río Churubusco. El agua que recibe proviene de la Planta de Bombeo Aculco, también cuenta con 14 trenes de tratamiento, 8 Km de conducción de agua residual y 93 Km de línea de conducción de agua residual tratada, almacén general, tanques de sedimentación, 4 rebombes de agua residual tratada; entre otros, también cuenta con instalaciones necesarias para servicios administrativos y laboratorios.

En esta planta se realiza la limpieza del agua residual combinada (doméstica, pluvial y de servicios) para que pueda ser nuevamente reutilizada y devuelta de forma segura a nuestro medio ambiente, los principales objetivos de esta planta son:



FUENTE: Elaboración propia.

B.3 Usos del agua residual tratada en PTAR “Cerro de la Estrella”.

La planta fue concebida para beneficiar las zonas agrícolas de la Ciudad de México, principalmente a las Delegaciones de Xochimilco y Tláhuac, ya que estaban amenazadas con desaparecer debido al crecimiento poblacional con la delegación Iztapalapa.

El agua residual tratada, es bombeada a la red de distribución de efluente para su posterior reutilización en servicios al público con contacto directo, como son el llenado de lagos y canales artificiales, remo, canotaje, fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines. En servicios al público con contacto indirecto, el riego de jardines y camellones, en autopistas, avenidas, campos de golf, y panteones.

La gran mayoría del agua tratada en la PTAR “Cerro de la Estrella” sirve para sostener el sistema lacustre de Xochimilco, este permite que los canales sean navegables y sean utilizados como medio de transporte para sacar la producción agrícola, en el caso de Xochimilco se estima en 7422 productores directos que generan fuentes de empleo. Esta depende de manera casi total de las aportaciones de agua tratada, principalmente de la PTAR “Cerro de la Estrella”; en consecuencia, si se vieran suspendido



su aportación de agua tratada se generaría un efecto adverso en el ecosistema; por lo tanto, las especies endémicas de la zona se quedarían sin el hábitat que es proporcionada por los canales. Igualmente, la zona lacustre de Xochimilco regula la temperatura en las temporadas de frío y calor, por lo que su efecto sería de fuerte impacto en la CDMX (SACMEX, 2019).

C. Aprendizaje autogestivo.

Para Crispín (2011), el aprendizaje es “un proceso multifactorial que el sujeto realiza cotidianamente más allá del ámbito académico escolar en la relación entre persona y ambiente, lo que involucra las experiencias vividas y los factores externos”. Es decir, que muchas cosas las aprendemos de manera tácita e inconsciente, con ellos y los demás conocimientos las persona resuelven sus problemas en la vida cotidiana.

Para que el aprendizaje sea significativo es importante que sea **funcional**, es decir que los conocimientos que son adquiridos sean utilizados en circunstancias que los estudiantes lo requieran; por otro lado, se requiere de un **proceso activo** en donde las personas no se limiten a memorizar los conocimientos adquiridos, sino que realicen una serie de actividades para comprenderlos y asimilarlos significativamente en sus estructuras cognitivas organizadas. Finalmente es necesario un **proceso constructivo**, es decir, que las actividades de aprendizaje estén orientadas a la construcción de significados para el propio sujeto (Doria, 2011). Por ello, es necesario que los estudiantes relacionen los nuevos conocimientos con los previos, y que estén **motivados** al considerar los nuevos aprendizajes como relevantes y útiles (Torre, 2007).

La autogestión se enfoca a la elección de estrategias para construir nuevos conocimientos o cumplir con algún objetivo de aprendizaje, permite tener una referencia del nivel de conocimiento adquirido de acuerdo a las necesidades de los estudiantes.

Para Rosales, C., et al. 2019, el aprendizaje autogestivo se entiende como la capacidad que posee el estudiante por administrar su proceso de aprendizaje, donde no sólo implica el proceso de autonomía y autorregulación, sino que además monitorea el alcance de sus objetivos



académicos, sus estrategias cognitivas, motivacionales y de apoyo para construir su conocimiento.

Se considera indispensable de acuerdo con las características y la forma en la que aprenden los estudiantes, que el aprendizaje autogestivo puede apoyar a reconocer qué, cómo y para qué estudiar, esto con la finalidad de orientar la forma de aprender (Martínez, 2004). Por lo cual, se requiere que los estudiantes reconozcan que ellos pueden seguir enriqueciendo sus conocimientos mediante la colaboración con otros compañeros, la retroalimentación mediante actividades propuestas por parte de los docentes y automotivarse para seguir aprendiendo.

C.1 Importancia de las Tecnologías de Información y comunicación (TIC) en la educación y la autogestión.

Cercas, et al. 2022 señala que desde hace años se han desarrollado diversos estudios sobre como integrar las nuevas Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) en las instituciones educativas. Las TIC son herramientas digitales que tienen como propósito proporcionar el acceso a la información disponible en la red y proveer de aplicaciones que permitan la comunicación entre las personas a cualquier hora y en cualquier lugar (Cabero, 2013). El acceso a la comunicación y la información en escenarios interactivos de aprendizaje tiene como objetivo la creación de nuevo conocimiento, por lo que se busca conjuntar la tecnología y las metodologías pedagógicas (Lara, 2016).

Por otro lado, el internet se ha convertido en un medio de información y comunicación que se ha transformado en uno de los principales medios de comunicación e interacción por parte de la sociedad, permitiendo el acceso en tiempo real a la información. El desarrollo de nuevas herramientas digitales se ha incrementado continuamente, por lo que se han diversificado en cuanto a funciones y tipos de dispositivos en donde puedan operar.

Con la llegada de las TIC, el campo educativo se vio mayormente beneficiado, debido a que con su aplicación se mejora la calidad de la educación, ya que se integra el acceso a la información para los docentes y estudiantes. También, permiten actualizar los sistemas educativos con



el objetivo que la educación se desarrolle de tal modo que se cubran las necesidades para la formación de estudiantes capacitados.

Con respecto a las necesidades educativas que existen actualmente y las posibilidades que brindan las TIC, su integración como apoyo a la educación de acuerdo a los diferentes sistemas educativos (presencial, en línea, híbrido) se vuelven fundamentales para llevar a cabo el proceso de enseñanza aprendizaje (Maldonado, 2019).

El incorporar al ámbito educativo el uso de herramientas digitales es parte de un proceso continuo de innovación en el proceso de enseñanza aprendizaje las instituciones educativas, facilitando la adquisición y absorción del conocimiento. De hecho, permiten que los docentes actúen como un instrumento para asegurar un proceso integral a través de las tecnologías.

D. Escenario Interactivo de Aprendizaje (EIA)

Un Escenario Interactivo de Aprendizaje es un espacio en donde existen distintas interacciones que hacen posible el proceso de aprendizaje. Estos están presentes en las interacciones multidisciplinares que son posibles gracias a las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC), las cuales consideran elementos constitutivos que presentan estos espacios como el contexto, la interfaz gráfica, contenidos, actividades y canales de comunicación (Sapién, 2020).

De acuerdo con Gutiérrez, et al. 2010 en los últimos años, los EIA han adquirido gran relevancia en los sistemas educativos debido a que proporcionan información para proponer objetivos pedagógicos adecuados para crear interfaces gráficas según el ambiente de aprendizaje necesario para los estudiantes y considera los siguientes niveles de estudio:

➤ Contexto:

Comprende los rasgos particulares de acuerdo con el perfil de cada estudiante, las características según la asignatura, así como el ambiente que establece el docente para fomentar la búsqueda de información y un



análisis crítico de los temas tratados gracias a la participación activa del grupo para fomentar el aprendizaje.

➤ Recursos:

Son aquellos materiales o herramientas que disponen los estudiantes en los entornos virtuales (canales de comunicación, foros, mensajería privada o grupal, acceso a la información mediante hipervínculos a documentos digitales, sitios web y actividades) para establecer interacciones.

➤ Interacciones:

Son aquellas que se producen en el proceso de aprendizaje como la interacción entre docentes y estudiantes o también las interacciones entre estudiantes. La interacción entre estudiantes y docentes resulta crucial en los EIA para facilitar un aprendizaje efectivo, por que se deben de considerar aspectos como la comunicación efectiva, la cual debe de ser clara y accesible. Por otro lado, se requiere de una retroalimentación constante para poder proporcionar información a los estudiantes sobre su desempeño académico con el objetivo de mejorar su aprendizaje. También es indispensable la colaboración entre estudiantes y la adaptabilidad de los docentes para diseñar escenarios que se adapten a las necesidades y estilos de aprendizaje de cada estudiante.

La comprensión de la virtualización en los procesos educativos demanda profundizar en la naturaleza de los entornos alternos de aprendizaje y dimensionar la contribución de lo virtual con la innovación educativa. Estos son cada vez más comunes en el ámbito educativo y cumplen con la finalidad de ofrecer flexibilidad a los estudiantes en su formación, por lo cual se propicia el desarrollo de competencias en los estudiantes.

Las propuestas metodológicas para operar adecuadamente los EIA se debe fundamentar pedagógicamente y didacticamente de acuerdo a los sistemas de enseñanza, es decir, si se utilizan este tipo de herramientas digitales no significa que la docencia se traslada a un espacio virtual, por lo que se requiere conocer los recursos tecnológicos disponibles, así como las ventajas y limitaciones.



En la actualidad no solo los textos representan una herramienta válida para simular situaciones con fines educativos, la era digital provee nuevos y diversos medios para mejorar el aprovechamiento por parte de los estudiantes (Cercas, 2022).

D.1 Software´s para la implementación de Escenarios Interactivos de Aprendizaje Autogestivo.

El desarrollo de un EIA como si fuera un video no es novedosa, en la educación básica se ha vuelto fundamental, dado que en las instituciones de educación superior, el acceso que tienen los estudiantes a equipos de cómputo brindan estas opciones indispensables (Delgado, 2020).

Existen una gran variedad de recursos tecnológicos, los software´s que han tenido más aceptación son los que tienen características lúdicas que se asocian a los juegos populares de hoy en día, de los cuales se han diseñado incorporando elementos para aprendizajes en diversas disciplinas basado en juegos, GBL por sus siglas en inglés utilizando ambientes atractivos como las denominadas Realidad Virtual (VR) y Realidad Aumentada (AR), así como los juegos de Realidad Alternativa , las vistas 2D y 3D o las versiones para dispositivos móviles (Lara, 2016).

El modelado en 3D es "el proceso de desarrollo de algún objeto tridimensional, representado matemáticamente a través de un software especializado". Basicamente consiste en la capacidad de producir una imagen, modificarla, alterarla y reformularla mediante un entorno computacional adecuado. El desarrollo de modelos 3D en la actualidad resulta más accesible ya que se cuenta con motores libres y completos, con funciones que van desde la más básicas hasta las más avanzadas, además que se están disponibles cursos en internet por diferentes plataformas. Uno de los softwares más utilizados y de libre acceso es Blender 3D.

Blender es una suite de creación 3D gratuita y de código abierto, con este software es posible crea visualizaciones 3D, así como imágenes fijas, animaciones 3D y tomas VFX. Se adapta bien a las personas que se benefician de su canalización y su proceso receptivo. Al ser una aplicación multiplataforma, Blender se ejecuta en diferentes sistemas operativos.



Cuenta con una variedad de herramientas que lo hacen adecuado para todo tipo de producción de medios.

En general, los estudiantes se mantienen expectantes y entretenidos por los retos que se presentan en este tipo de herramientas digitales y despierta su curiosidad.

➤ **D.2 Realidad virtual (VR)**

El modelado en 3D en realidad virtual permite explotar la imaginación aprendiendo a utilizarla para llevar a construir escenarios imposibles para darle solución a los diversos problemas que nos afectan como sociedad abarcando diversos sectores.

La síntesis de imágenes por computadora ha sido una herramienta que científicos, ingenieros y humanistas han utilizado para representar sus datos e ideas visualmente. También ha sido empleada como una forma de interactuar con las computadoras a través de metáforas y de representaciones de mundos o espacios concebidos por ellos, aún no construidos, imposibles de construir en el mundo real, pero que al existir en el mundo virtual adquiere un significado o valor especial.

La realidad virtual es una tecnología que integra señales captadas del mundo real (típicamente video y audio) con señales generadas por computadores (objetos gráficos tridimensionales); las hace corresponder para construir nuevos mundos coherentes, complementados y enriquecidos hace coexistir objetos del mundo real y objetos del mundo virtual en el ciberespacio. Para lograr la inclusión de estos activos del tipo gráfico se emplea un formato FBX el cual es un estándar en la industria del entretenimiento digital y es usado como archivo de transferencia de contenido de los softwares más utilizados.

Existen motores gráficos para videojuegos de acceso gratuito como comerciales que emplean gráficas de OpenGL y de DirectX que permite generar animaciones tridimensionales interactivas de tipo serio o de tipo lúdico. Las aplicaciones tridimensionales en tiempo real hacen uso de contenido gráfico optimizado y contenido audiovisual estandarizado de cámara, textura para que sea en su ejecución sea de lo más fluido.



OBJETIVOS

Objetivo General

- Diseñar un proyecto estratégico educativo a partir de una planta de tratamiento de agua residual, mediante herramientas digitales de acceso libre que fomenten el aprendizaje autogestivo en la Ingeniería Química.

Objetivos particulares

- Establecer las condiciones del proceso con el uso de herramientas de software y hardware ideales para la implementación del modelo educativo de aprendizaje autogestivo enfocado al tratamiento de agua residual, que permita establecer las condiciones del proceso.
- Seleccionar una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales instalada en la Ciudad de México.
- Diseñar una planta de tratamiento de agua residual seleccionada en la plataforma virtual conocida como Blender de acceso libre.
- Renderizar el modelo en 3D diseñado con el programa Blender a una plataforma de metaverso mediante la creación de un aula virtual con el programa VR Chat.



METODOLOGÍA

ETAPA 1: Realizar una investigación y revisión bibliográfica del funcionamiento de las diferentes plantas de tratamiento de agua residual en la Ciudad de México.

Para esta etapa, se recabó información realizando una revisión bibliográfica acerca del funcionamiento y operación de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual en la Ciudad de México, así como la normatividad correspondiente en materia de agua; esto con el objetivo de tener conocimiento de las operaciones unitarias aplicando los criterios correspondientes para resolver problemas e incluso visualizar áreas de oportunidad y mejora.

ETAPA 2: Realizar una ficha técnica en donde se especifique el funcionamiento y la ubicación de una planta de tratamiento de agua residual.

Se recopiló información de la Planta de Tratamiento de Agua Residual PTAR "Cerro de la Estrella" y se realizó una ficha técnica donde se especifica la historia de la planta, su ubicación geográfica, las especificaciones de su funcionamiento, los diferentes tipos de procesos que existen para el tratamiento de las aguas residuales, las diferentes aplicaciones que tiene el agua residual posterior al tratamiento que recibe y el marco normativo que debe cumplir con las disposiciones establecidas por los órganos regulatorios.

Así mismo, la ficha técnica permitió conocer y seleccionar aquellos equipos que fueran altamente contaminantes dentro de su proceso para ser considerados en el escenario interactivo de aprendizaje.

ETAPA 3: Realizar el diagrama de flujo para ubicar cada uno de los equipos que conforma una Planta de Tratamiento de Agua Residual.

Una vez recopilada la información acerca del funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Agua Residual "Cerro de la Estrella", se procedió a realizar un diagrama de flujo con el fin de representar de forma



esquemática todos los pasos involucrados dentro del proceso de aguas residuales, así como la descripción a detalle del funcionamiento de cada uno de los equipos que conforman la planta y de esta forma determinar la normatividad aplicable para realizar la descarga correspondiente.

ETAPA 4: Se generará un modelo 3D con apoyo del software “Blender” de acceso libre para desarrollar un aula virtual mediante la aplicación de una planta de tratamiento de agua residual.

Para la etapa 4, se logró concretar una visita de forma presencial a las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Agua Residual “**Cerro de la Estrella**” para realizar un levantamiento técnico de su proceso y poder visualizar y comprender de manera más específica el funcionamiento de la planta con el objetivo de cumplir de abarcar los puntos a desarrollar en este proyecto.

Posteriormente, fue necesario tomar un curso de introducción al software “**Blender**” de acceso libre para poder generar el modelo en 3D para una mejor comprensión y manipulación de este; con ello, se modeló cada elemento que conforma la planta de tratamiento con base en la información técnica recopilada mediante la visita a las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Agua Residual con la finalidad de que el modelo fuera lo más semejante posible a la realidad.

ETAPA 5: Renderizado del modelo en 3D generado con el software Blender por medio de un motor gráfico a la plataforma de metaverso VR Chat de acceso libre.

Con ayuda del motor gráfico “**Unity**” y del programa “**VR Chat**” de acceso libre se realizó la transición del modelado en 3D producido con el programa “Blender” de acceso libre para generar un aula virtual.



RESULTADOS

ETAPA 1

Con base a la investigación que se realizó, en la Tabla 1 se puede observar las principales plantas por alcaldía que operan en la Ciudad de México.

Tabla 1. Principales Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación en la Ciudad de México por Alcaldía.

Municipio	Nombre de la planta	Proceso	Caudal Tratado (L/s)	Cuerpo Receptor o Reusó
Álvaro Obregón	Santa Fe	Lodos Activados	54.2	Riego de áreas verdes de la ZEDEC y saneamiento de la Barranca Tlapizahuaya.
Coyoacán	Coyoacán	Lodos Activados	126.9	Riego de áreas verdes, abasto a zonas comerciales.
Cuauhtémoc	Tlatelolco	Lodos Activados	12.1	Riego de áreas verdes.
Gustavo A. Madero	San Juan de Aragón	Lodos Activados	150.1	Lago de San Juan de Aragón y riego de áreas verdes.
Iztacalco	Ciudad Deportiva	Lodos Activados	94.6	Riego de áreas verdes y uso industrial.
Iztapalapa	Cerro de la Estrella	Lodos Activados	1496.0	Canales de Xochimilco y Tláhuac, riego agrícola, industria y comercios y riego de áreas verdes.
Magdalena Contreras	Magdalena Contreras	Lodos Activados	19.9	Río Magdalena y Eslava
Miguel Hidalgo	Chapultepec	Lodos Activados	42.8	Llenado de Lagos de Chapultepec y riego de áreas verdes.
Milpa Alta	San Pedro Atocpan	Lodos Activados	19	Riego agrícola y llenado de canales.
Tláhuac	El Llano	Lodos Activados	64.1	Riego agrícola.
Tlalpan	Honorable Colegio Militar	Lodos Activados	26	Riego de áreas verdes.
Xochimilco	San Luis Tlaxialtemalco	Lodos Activados	52.3	Canales de Xochimilco.

FUENTE: Elaboración propia. Adaptado de "Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación por CONAGUA (p. 116 y 117). México, Ciudad de México.



Es importante resaltar que algunos de los parámetros principales para las descargas de las aguas residuales a cuerpos receptores no debe exceder el valor indicado como límite permisible de acuerdo al tipo receptor conforme. En la Tabla 2 se encuentran los límites permisibles que establece la **NOM-001-SEMARNAT-2021**:

Tabla 2. Límites Permisibles con base en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Parámetros (*) (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Riego de áreas verdes		
	P.M	P. D	V.I	P.M	P. D	V.I	P.M	P. D	V.I
<i>Temperatura (°C)</i>	35	35	35	35	35	35	35	35	35
<i>Grasas y Aceites</i>	15	18	21	15	18	21	15	18	21
<i>Sólidos Suspendidos Totales</i>	60	72	84	20	24	28	30	36	42
<i>Demanda Química de Oxígeno</i>	150	180	210	100	120	140	60	72	84
<i>Carbono Orgánico Total*</i>	38	45	53	25	30	35	15	18	21
<i>Nitrógeno Total</i>	25	30	35	15	25	30	N. A		
<i>Fósforo Total</i>	15	18	21	5	10	15	N. A		
<i>Huevos de Helminetos (huevos/litro)</i>	N. A						1		
<i>Escherichia coli, (NMP/100 ml)</i>	250	500	600	250	500	600	250	500	600
<i>Enterococos fecales* (NMP/100 ml)</i>	250	400	500	250	400	500	250	400	500
<i>pH (UpH)</i>	6-9								

FUENTE: Tomado de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1997 publicado en el Diario Oficial de la Federación.



Donde:

N. A: No Aplica

P. M: Promedio Mensual

P. D: Promedio Diario

V. I: Valor Instantáneo

En la Tabla 3 se encuentran los parámetros de la Norma Oficial Mexicana **NOM-002-SEMARNAT-1996** que establece los límites máximos permisibles para contaminantes de las aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, los cuales no deben de sobrepasar los siguientes valores:

Tabla 3. Límites Máximos Permisibles con base en la NOM-002-SEMARNAT-1996.

Parámetros (*) (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Promedio Mensual P. M	Promedio Diario P. D	Valor Instantáneo V. I
<i>Grasas y Aceites</i>	50	75	100
<i>Sólidos Sedimentables ml/L</i>	5	7.5	10
<i>Arsénico Total</i>	0.5	0.75	1
<i>Cadmio Total</i>	0.5	0.75	1
<i>Cianuro Total</i>	1	1.5	2
<i>Cobre Total</i>	10	15	20
<i>Cromo hexaverante</i>	0.5	0.75	1
<i>Mercurio Total</i>	0.01	0.015	0.02
<i>Níquel Total</i>	4	6	8
<i>Plomo Total</i>	1	1.5	2
<i>Zinc Total</i>	6	9	12

FUENTE: Tomado de la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996 publicado en el Diario Oficial de la Federación.



Finalmente, en la Tabla 4 se encuentran los límites máximos permisibles de contaminantes de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana **NOM-003-SEMARNAT-1997**, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales que son tratadas y que son reutilizadas en servicios al público con el objetivo de proteger el medio ambiente y la salud de la población.

Tabla 4. Límites máximos permisibles de contaminantes con base en la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Tipo de reúso	Promedio Mensual				
	Coliformes fecales NMP/100 mL	Huevos de Helmintos (huevos/litro)	Grasas y Aceites mg/L	DBO ₅ mg/L	SST mg/L
Servicios al público con contacto directo	240	≤1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1000	≤5	15	30	30

FUENTE: Tomado de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1997 publicado en el Diario Oficial de la Federación.

Los órganos administrativos responsables del tratamiento de las aguas residuales que sean reutilizadas en servicios al público, tienen la obligación de realizar un monitoreo de las aguas tratadas y de conservar al menos durante los últimos tres años los registros de la información resultante del muestreo y análisis, al momento en que la información sea requerida por la autoridad competente.



ETAPA 2

El desarrollo de este trabajo se realizó sobre la planta de tratamiento de agua residual “Cerro de la Estrella” ya que es una de las plantas más importantes no solo de la Ciudad de México, sino a nivel federal por el caudal que trata a diario ya que proviene del sector doméstico e industrial.

En las figuras 1 y 2 se muestra el mapa y ubicación satelital de la planta antes mencionada.



Figura 1. La P.T.A.R “Cerro de la Estrella” está ubicada en la CDMX en el centro de México.



Figura 2. Vista satelital de la P.T.A.R “Cerro de la Estrella”.

Actualmente la planta se encuentra ubicada en la Avenida San Lorenzo No. 312, colonia San Juan Xalpa, Alcaldía Iztapalapa al oriente de la Ciudad de México.

La CONAGUA mediante la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua lleva a cabo el monitoreo de los principales cuerpos de agua en el país, la red está conformada por cuerpos de agua lóticos, lénticos costeros y subterráneos, para la medición se incluyen parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de acuerdo con el tipo de cuerpo de agua.

Esta información está disponible en la página de la CONAGUA y se encuentra integrada en un solo archivo clasificada por cuerpo de agua y estado (CONAGUA, 2021).



En la Tablas 5 y 6 se presentan algunos resultados de los parámetros reportados del 2 de diciembre del 2012 al 24 de agosto del 2020 a la llegada del influente como a la salida del efluente de la planta para su distribución.

Tabla 5. Parámetros medidos en el influente que llega a la PTAR "Cerro de la Estrella" del año 2012 al 2020.

Fecha	Conductividad $\mu\text{S/cm}$	DQO mg/L	Dureza mg CaCO_3/L	pH UpH	SDT mg/L	SST mg/L	T $^{\circ}\text{C}$
02/12/12	941	322.63	162.66	7.33	602.24	60	-
09/04/13	993	428.41	291.62	7.04	635.52	56	21.7
13/02/14	715	341.69	283.1	7.1	457.6	100	19.2
17/02/15	848	16.94	223.1	6.9	542.72	64	19.2
10/03/16	518	233.21	284.88	7.9	331.52	120	15
05/04/17	549.7	239.11	150.01	7.9	351.81	24	15.8
20/02/18	1030.7	279.84	101.63	7.5	659.65	92	19.9
07/02/19	974	426.08	158.01	6.9	623.36	116	19.8
26/08/20	707	407.26	193.41	7.7	452.48	80	21

FUENTE: Elaboración propia. Adaptado de "Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua" por CONAGUA. México.

Tabla 6. Parámetros medidos en el efluente que llega a la PTAR "Cerro de la Estrella" del año 2012 al 2020.

Fecha	Conductividad $\mu\text{S/cm}$	DQO mg/L	Dureza mg CaCO_3/L	pH UpH	SDT mg/L	SST mg/L	T $^{\circ}\text{C}$
02/12/12	785	<10	785	7.42	502.5	<10	-
09/04/13	746	27.53	746	6.42	477.44	<10	22.2
13/02/14	856	29.48	856	7.1	547.84	<10	20
17/02/15	817	148.4	817	7.1	522.88	<10	20
10/03/16	595	182.82	595	7.6	380.8	<10	17.6
05/04/17	566.3	558.58	566.3	7.4	362.43	16	16.2
20/02/18	869.3	60.02	869.3	7.1	556.35	16	20.9
07/02/19	820	37.44	820	7.1	524.8	28	21.5
26/08/20	665	35.82	665	7.5	425.6	24	23

FUENTE: Elaboración propia. Adaptado de "Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua" por CONAGUA. México.



Para comparar los resultados publicados por la CONAGUA se realizaron muestreos del agua residual antes de ingresar al sedimentador primario y después de salir del sedimentador secundario con la finalidad de conocer la calidad del agua residual generada. El análisis de estos muestreos se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Química en la Facultad de Química, los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 7 y 8.

Tabla 7. Características de las aguas residuales en la PTAR "Cerro de la Estrella".

Parámetro	Unidades	NOM-001-SEMARNAT-2021	PTAR "Cerro de la Estrella" (Influente)	PTAR "Cerro de la Estrella" (Efluente)
<i>Demanda Química de Oxígeno (DQO).</i>	mg/L	210	126.33	114.11
<i>Potencial de Hidrogeno (pH)</i>	U pH	6-9	7.53	7.39
<i>Sólidos Disueltos Totales (SDT)</i>	mg/L	-	0.31	0.38
<i>Sólidos Suspendidos Totales (SST)</i>	mg/L	84	0.19	0.057
<i>Temperatura (T)</i>	°C	35	24	22.07

FUENTE: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de este análisis muestran que el agua residual cumple con los parámetros según en lo establecido en la Norma Oficial Mexicana **NOM-001-SEMARNAT-2021**, esto debido a que los resultados están por debajo de los límites permisibles.

Por otro lado, no fue posible realizar pruebas para la determinación de los parámetros que se establecen en las **NOM-002-SEMARNAT-1996** y la **NOM-003-SEMARNAT-1997**, sin embargo, se compararon los



resultados reportados de la PTAR "Cerro de la Estrella" para determinar si la planta de tratamiento cumple con la normatividad correspondiente en materia de agua.

Se elaboró la ficha técnica de la PTAR "Cerro de la Estrella" la cual contiene especificaciones de la planta de tratamiento, métodos de tratamiento de agua residual que existen en México, el proceso implementado en la planta y el marco normativo (Ver Anexo 1).

ETAPA 3

Las etapas del proceso de tratamiento que se utiliza actualmente en la planta de tratamiento de agua residual "Cerro de la Estrella" se puede observar de manera general en la Figura 3.

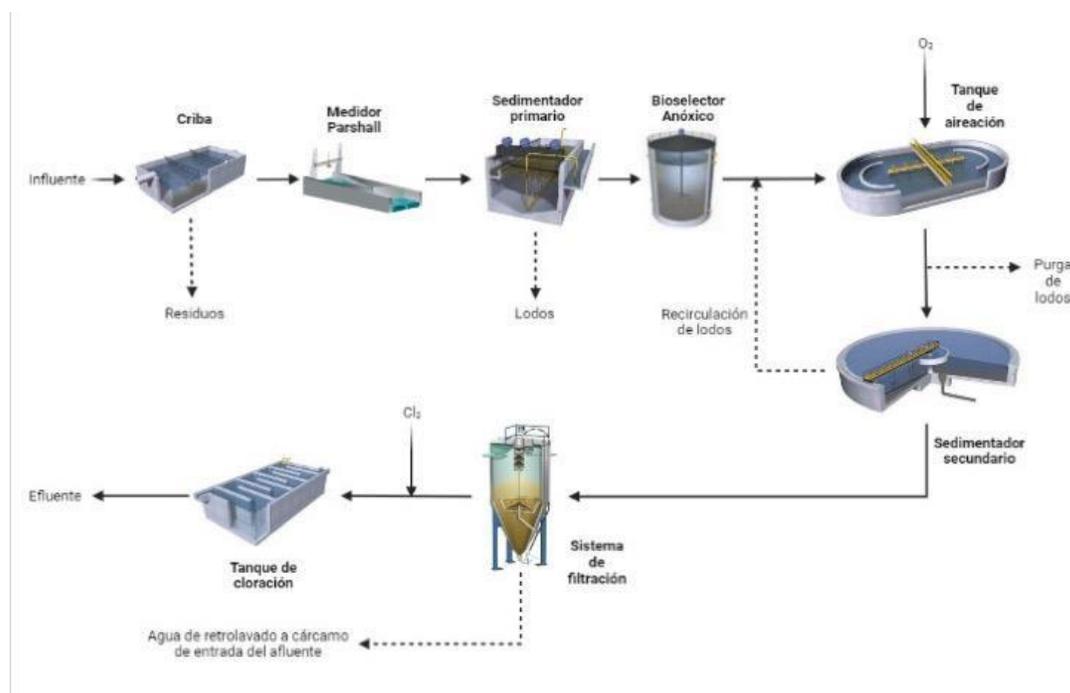


Figura 3. Etapas del tratamiento de Aguas Residuales en la PTAR "Cerro de la Estrella"

Se realizó una visita a las instalaciones de la PTAR "Cerro de la Estrella". Durante la visita guiada se fueron recorriendo cada una de las etapas, las cuales se detallan a continuación:



El proceso de tratamiento inicia cuando el influente entra a la caja de llegada donde recibe de 2500 a 3000 L/s de agua residual provenientes de la planta de bombeo Aculco, estas llegan a dos canales abiertos que se localizan en los extremos laterales de la caja de llegada (Figuras 4 y 5).



Figura 4. Caja de llegada del influente.



Figura 5. Canales abiertos.

El agua residual pasa por una criba tamiz que se encuentra del lado sur, cuya función consiste en remover el material grueso (generalmente flotante) contenido en las aguas residuales crudas, que puedan dañar bombas o tuberías y equipos de la planta de tratamiento. Al final de cada canal abierto se encuentra una caja distribuidora, cada una distribuye el influente a su unidad de tratamiento de lodos activados convencional. Se utiliza un medidor Parshall para medir el caudal del influente en cada canal se registra el gasto de agua en L/s (Figuras 6 y 7).



Figura 6. Criba Tamiz.



Figura 7. Canal Parshall.



Tratamiento Primario.

El agua residual pasa al tratamiento primario con la finalidad de eliminar y separar los sólidos sedimentables, al igual que la separación de grasas, aceites y material flotante. Esto se logra manteniendo una velocidad del agua constante, para ello se cuenta con una pantalla deflectora a la entrada del tanque de sedimentación (Figura 8).



Figura 8. Sedimentador Primario.

El tratamiento primario consta para cada unidad de un tanque de forma rectangular dividido en cuatro trenes modulares que cuentan con alimentación independiente, flujo horizontal y remoción mecánica e hidráulica de lodos sedimentables.

La recolección de lodos sedimentables se realiza por medio de rastras las cuales están sujetas a una cadena sinfín asociada por un motorreductor. El movimiento horizontal de estas rastras permite el arrastre de las grasas, aceites y sólidos flotantes hacia una canaleta superficial para poder disponerlas finalmente hacia el drenaje. Por otra parte, este movimiento barre del fondo del tanque y los lodos sedimentados son enviados hacia las tolvas donde son eliminados del proceso por medio de una purga.



Tratamiento secundario

➤ Bioselector Anóxico

Una vez que el agua sale del tratamiento primario pasa por una zona anóxica antes de ser ingresado al proceso biológico. Su principal función es estresar a los microorganismos generando una falta de oxígeno y al mismo tiempo elimina microorganismos filamentosos, obteniendo una mezcla homogénea. En esta etapa se seleccionan los mejores microorganismos para poder llevar a cabo el proceso biológico (Figura 9).



Figura 9. Bioselector anóxico.

Reactor Biológico

Su propósito es proveer de oxígeno, nutrientes y mezclado, entre otras condiciones ambientales para que los microorganismos existentes en el agua degraden la materia orgánica presente. El reactor está conformado por tanques de aireación, sopladores, aspersor para el rompimiento de espuma, tanque de sedimentación secundaria y un sistema de recirculación de lodos y un sistema Clariback (Figuras 10 y 11).



Figura 10. Reactor Biológico.



Figura 11. Sistema Clariback.

El suministro de aire a la planta proviene de dos salas de sopladores (Figura 12). Cada unidad cuenta con un tanque de aireación dividido en cuatro módulos con una alimentación independiente y una canaleta de recolección de efluente. En la parte central de cada tanque se encuentra localizado un canal, a través del cual son conducidos los lodos de recirculación.



Figura 12. Sala de sopladores.



El lodo se estabiliza de manera biológica junto con el agua residual, oxidando la materia orgánica y tratando de mantener la masa bacteriológica en condiciones 100% aerobias. En este proceso, a medida que la población de microorganismos aumenta, se agrupan y forman flóculos que producen una masa activa llamada lodos activados.

El proceso de lodos activados tiene como objetivo remover la materia orgánica, en términos de DBO_5 de las aguas residuales.

Una vez que la materia orgánica ha sido oxidada, se requiere un tiempo de retención del agua en el reactor, debido a que el mezclado pasa al sedimentador secundario o clarificador, donde los lodos floculados se sedimentan, consiguiendo separar el agua clarificada de los lodos. Los lodos sedimentados son recirculados de nuevo al reactor biológico para mantener la concentración suficiente de microorganismos y poder seguir llevando a cabo el proceso.

Sedimentador Secundario

Se efectúa la separación de los lodos activados presentes en el mezclado produciendo un influente clarificado. Cada unidad de tratamiento cuenta con un tanque sedimentador. Los lodos son recolectados mediante un sistema Clariback, este es un equipo que tiene boquillas en la parte inferior mediante la cual succiona los lodos del fondo de los sedimentadores secundarios y los envía a una canaleta que se encuentra a un costado del sedimentador secundario para que sean enviados nuevamente a los reactores biológicos (Figura 13).



Figura 13. Sensores del sistema Clariback.



Cuando los microorganismos han estado el tiempo requerido en el mezclado (mezcla de lodo, aire y materia prima) pasa a una segunda sedimentación con la finalidad de separar las mezclas obtenidas, recuperando la biomasa y dejando fluir el agua hacia los vertederos, la biomasa se recupera a través de un sistema de rastreo que está ubicado en la parte media y en el fondo del tanque.

Filtración

El sistema de filtración (Figura 14) está integrado por 2 capas de material filtrante que son de arena y grava sílica soportados por una placa de metal que da más capacidad filtrante, la función de este filtro es seguir eliminando sólidos suspendidos y coloides que no lograron ser retenidos en las etapas anteriores y obtener la calidad deseada del líquido filtrado que puede definirse en términos de turbidez. Una vez que el medio filtrante se satura, se lleva a cabo un retrolavado automático con la intención de limpiar el filtro (Figura 15).



Figura 14. Sistema de filtros.



Figura 15. Sistema de retrolavado.



Desinfección

Tiene como propósito la eliminación de la mayor cantidad posible de bacterias patógenas, lo cual se logra adicionando una solución de cloro gas al efluente del sedimentador secundario. La inyección de la solución de cloro se lleva a cabo en la entrada del tanque y las mediciones del cloro residual y organismos coliformes se llevan a cabo a la salida de este.

En el caso de esta planta, se utiliza cloro gas, este se mezcla directamente con agua tratada y se inyecta en el tanque de contacto (Figura 16).



Figura 16. Tanque de contacto de cloro.

Cárcamo de Bombeo de Agua Residual Tratada

El agua tratada es conducida de la estación de cárcamo de bombeo a la red de distribución (Figura 17) a través de diversas bombas que distribuyen la mayoría del agua tratada hacia los canales de Xochimilco.



Figura 17. Cárcamo de Bombeo.



ETAPA 4

Con base a las imágenes presentadas previamente, se realizó el modelado 3D de la planta de tratamiento de agua residual mediante el software Blender de acceso libre con el fin de cumplir el objetivo general de este proyecto extrapolando la información recabada en un espacio virtual para el desarrollo de habilidades de aprendizaje y cognitivas de la Ingeniería Química como método de innovación para la enseñanza a través de un equipo electrónico.

El software Blender contiene figuras geométricas básicas, como un plano, un cubo, un círculo, una esfera o un cilindro los cuales se utilizaron para ir moldeando la forma del elemento que conforma la planta de tratamiento de agua residual. Dependiendo de la complejidad del elemento, fue necesario crearlos desde una vista frontal, lateral, inferior y de área, estos fungen como guía para el modelado de cada vista.

En este modelado en 3D se trabajó con texturas complejas para optimizar los elementos al igual que los colores y materiales para que fueran más realistas para tener una mejor calidad en la imagen y así enriquecer el escenario. Por otra parte, se buscó contar con un bajo conteo poligonal para no hacer tan pesado el archivo.

La Figura 18 representa lo realizado mediante el programa "Blender" de libre acceso y corresponde a la caja de llegada del influente incluyendo todos los componentes que la conforman como la caja tamiz, los canales abiertos y el medidor Parshall.

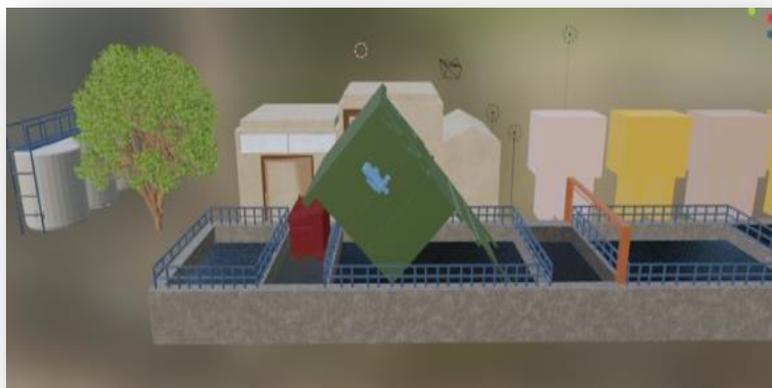


Figura 18. Caja de llegada del influente representada en el modelo 3D con Blender.



La Figura 19 muestra los sedimentadores primarios correspondientes al tratamiento primario previamente explicado al igual que en fondo se observa la sala de sopladores y diversos componentes que conforman el mismo como las rastras y tolvas.

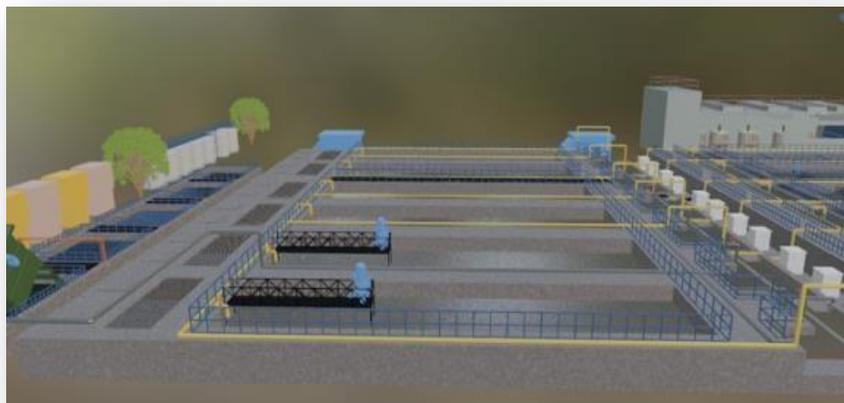


Figura 19. Sedimentadores Primarios representados en modelo 3D con Blender.

En la Figura 20 se puede observar el sistema Clariback en el tratamiento secundario cuya función ha sido descrita previamente, también se puede observar la tubería con sus respectivas válvulas por donde recirculan los lodos activados.



Figura 20. Sedimentadores secundarios con sistema Clariback en modelo 3D con Blender.



Finalmente, la Figura 21 corresponde al sistema de filtración que está compuesto por un sistema de filtros, un sistema de retrolavado y tanques de contacto del agua residual con cloro gas. Al fondo de la imagen se observa la estación de cárcamo de bombeo en donde es distribuido el efluente a los canales de Xochimilco y las zonas industriales aledañas para su reusó.



Figura 21. Sistema de Filtración y Estación de Cárcamo de Bombeo.

La Figura 22 muestra una vista general de la PTAR "Cerro de la Estrella" diseñada en la plataforma Blender de acceso libre.

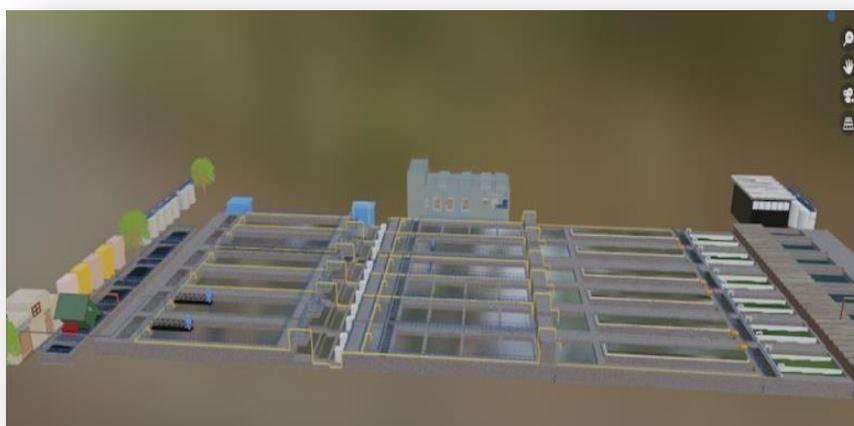


Figura 22. Vista general del modelo en 3D de la PTAR "Cerro de la Estrella" en programa Blender



ETAPA 5

Una vez que se contó con el modelo en 3D, fue necesario seleccionar un motor gráfico y se procedió a trasladar mediante el motor gráfico Unity todos los componentes que están presentes en el mismo, con la finalidad de poder generar un espacio virtual con ayuda del programa "VR Chat", para desarrollar el aula virtual.

La finalidad de este espacio virtual es que los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química que tengan interés en el tema de agua desarrollen habilidades respecto al funcionamiento de una Planta de Tratamiento de Agua Residual utilizando herramientas de inmersión en el metaverso.

Una vez entrando al metaverso, se puede observar cómo cada elemento que conforma la planta de tratamiento de agua residual "Cerro de la Estrella" las cuales fueron reconstruidas a través del modelo en 3D para poder mostrar los elementos que la conforman, mediante los controles de desplazamiento (A,W,S,D) se puede recorrer el aula virtual con la finalidad de conocer el proceso, las instalaciones y todos los equipos que conforman una PTAR.

Las Figuras 23 y 24 muestran imágenes del renderizado de la caja de llegada, la criba tamiz, los tanques de HClO_3 mediante el software "VR Chat" de la planta "Cerro de la Estrella" con todos los componentes que la integran para el aula virtual.



Figura 23. Vista de la caja de llegada y criba tamiz en el modelo 3D de la PTAR "Cerro de la Estrella" representada en aula virtual.



Figura 24. Vista de tanques de almacenamiento de HClO_3 del modelo en 3D de la PTAR "Cerro de la Estrella" en el aula virtual.

Las figuras 25 y 26 muestran cómo se observan los sedimentadores primarios dentro del aula virtual, se puede observar la tubería correspondiente a la recirculación de los lodos activados con sus respectivas válvulas de control al igual que los barandales de seguridad que rodean los sedimentadores.



Figura 25. Vista general sedimentación primaria en 3D de la PTAR "Cerro de la Estrella" en el aula virtual con tuberías de lodos.

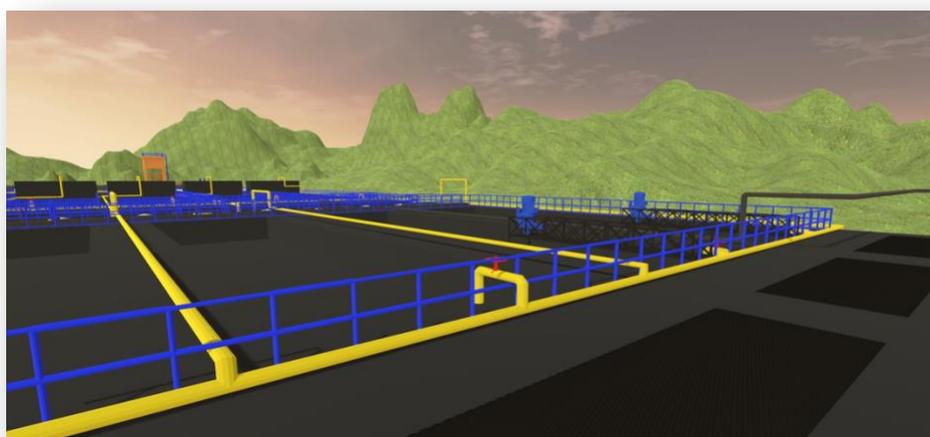


Figura 26. Vista principal de uno de los sedimentadores primarios con modelo en 3D de la PTAR "Cerro de la Estrella" en el aula virtual.



En la figura 27 se muestra la sala de máquinas que se utiliza dentro de la planta de tratamiento de agua residual con sus sistemas de operación y sus aireadores.

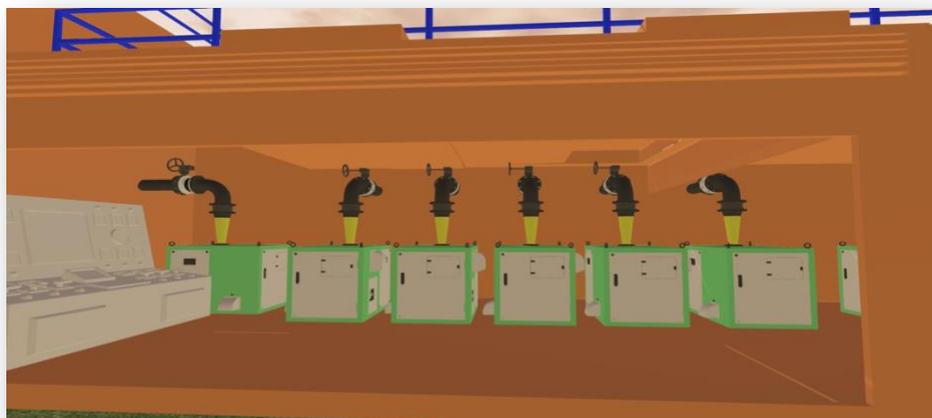


Figura 27. Vista de Sala de máquinas y sopladores representados en el modelo en 3D de la PTAR "Cerro de la Estrella" en el aula virtual.

En la figura 28 se muestra al fondo el sistema Clariback al igual que la parte de filtración que conforma el tratamiento en la planta de tratamiento.

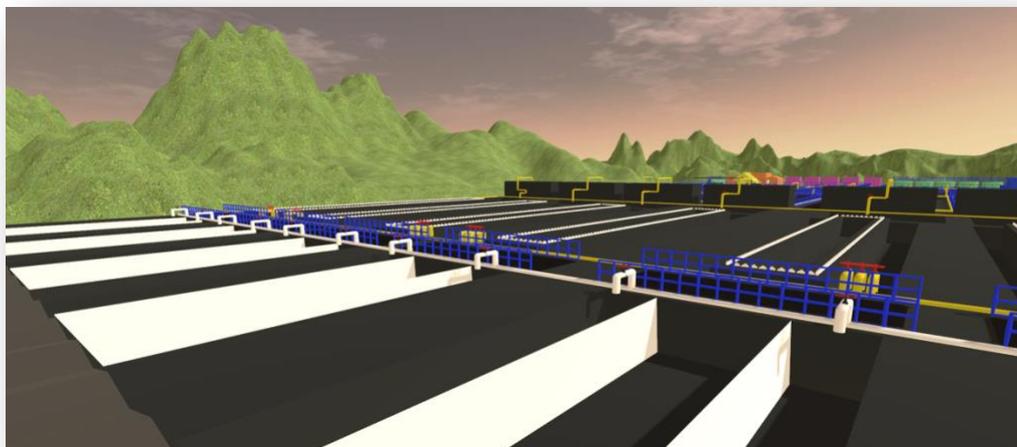


Figura 28. Vista general de los filtros utilizados en la PTAR "Cerro de la Estrella" al igual que los tanques en contacto con cloro gas dentro del aula virtual.



Finalmente, en la figura 29 se muestra la Estación de Cárcamo de Bombeo representada dentro del aula virtual.



Figura 29. Estación de Cárcamo de Bombeo representada en el aula virtual de la Planta de tratamiento de agua residual "Cerro de la Estrella".



Análisis de Resultados

Para llegar a los resultados obtenidos se tuvo que partir de una revisión bibliográfica exhaustiva para conocer el número de plantas de tratamiento de agua residual que operan en la Ciudad de México, también se buscó comprender la complejidad y el funcionamiento de una planta de tratamiento de agua residual, al igual que los estándares de calidad necesarios de acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas para su reúso.

Se seleccionó la PTAR "Cerro de la Estrella" debido a que es la planta con el mayor caudal tratado de la Ciudad de México, además de la importancia que tiene el agua residual tratada para su reutilización en servicios públicos y para el sistema lacustre de Xochimilco. Para ello, fue necesario concretar una visita a la PTAR "Cerro de la Estrella" para fortalecer los conocimientos teórico-prácticos que implica el plan de estudios de la rama ambiental de la carrera de Ingeniería Química. Asimismo, se recabaron muestras de agua residual antes de entrar al sedimentador primario y después del sedimentador secundario para poder comparar los resultados que reporta SACMEX mediante la CONAGUA. En los resultados obtenidos se puede observar que la calidad del agua de la PTAR "Cerro de la Estrella" cumplen con la normatividad correspondiente referente a los límites permisibles requeridos.

Por otro lado, la visita permitió conocer los equipos involucrados dentro del proceso que se utiliza en la PTAR y las instalaciones de esta. Por ello, fue necesario tomar fotos durante el recorrido de la planta para crear cada elemento del modelo en 3D con el programa Blender de acceso libre con el objetivo de desarrollar el aula virtual en el metaverso para que los estudiantes mediante sus computadoras y/o utilizando equipos inmersivos, puedan prepararse mejor si es que quieren especializarse en la rama ambiental en materia de agua.

A lo largo del desarrollo del proyecto se tuvieron que adquirir nuevas habilidades en el uso de herramientas digitales como el software Blender de libre acceso para complementar el desarrollo del aula virtual.



Gracias al trabajo realizado en conjunto con la Facultad de Ingeniería, fue posible renderizar el modelo en 3D por medio del motor gráfico **Unity** y el software **VR Chat** que se generó previamente en **Blender** y se tuvo como resultado la creación del aula virtual dentro del metaverso.

Se cuidaron mucho los detalles representados dentro del modelo con la finalidad de que el aula virtual cuente con la mejor calidad posible de cada elemento y los estudiantes tengan acceso a material que les permita visualizar el proceso de una planta de tratamiento de aguas residuales.

Para utilizar el programa "VR Chat" que fue necesario descargarlo de la página oficial de Steam.

Finalmente, se recomienda contar con un equipo que cuente con las siguientes características: Memoria RAM de 4 GB, Gráficos NVIDIA GeForce® GTX 970 / AMD Radeon™ R9 290 equivalente o superior, Procesador Intel® i5-4590 / AMD FX 8350 equivalente o superior, esto para poder tener un mejor desempeño del programa.



CONCLUSIONES

A partir de los objetivos planteados al inicio de este proyecto se puede concluir que con la información obtenida mediante una revisión bibliográfica sobre el funcionamiento de la planta de tratamiento de agua residual (PTAR) "Cerro de la Estrella" fue posible diseñar y desarrollar un EIA para fomentar el aprendizaje autogestivo en la carrera de Ingeniería Química, ofreciendo una nueva e innovadora forma de aprovechar las herramientas digitales a las cuales tenemos un fácil acceso como softwares.

Por otro lado, la utilización de los Escenarios Interactivos de Aprendizaje en el marco educativo crea un nuevo paradigma pedagógico donde docentes y estudiantes se enfrentan a nuevos desafíos para mejorar la calidad del proceso de enseñanza-aprendizaje. La integración de estos métodos para el aprendizaje como los EIA permite presentar los materiales de estudio con una buena calidad a través de los múltiples canales y medios electrónicos; asimismo, motiva e involucra a los estudiantes en las actividades dentro del aprendizaje significativo.

Finalmente, proporciona representaciones de conceptos y modelos abstractos para mejorar el pensamiento crítico, las habilidades y los procesos cognitivos que posibilitan el uso de la información adquirida para resolver problemas y para explicar los problemas propuestos de acuerdo a la materia que se imparta, facilitando el acceso a la información e investigación científica mediante el uso de datos reales generados dentro del espacio virtual.

En los tiempos actuales, es importante adquirir nuevas aptitudes y destrezas que nos permitan poder complementar de una mejor forma el aprendizaje adquirido a lo largo de la carrera, pero lo más importante es que este tipo de herramientas permiten no solo tener un panorama más amplio acerca del funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua, sino que también despierta el interés y promueve la imaginación para poder resolver problemas que se presentan en esta rama de la ingeniería química de una forma más dinámica, dada la problemática actual que está atravesando el mundo en materia de salud y recursos hídricos.



*UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA*



En definitiva, los sistemas educativos están aprovechando los softwares de libre acceso para fomentar el aprendizaje autogestivo mediante la creación de espacios virtuales por medio de metodologías de enseñanza que permiten a los estudiantes ser los principales actores en la construcción de sus conocimientos con base a situaciones diseñadas por los docentes con la finalidad de que existan un mejor proceso de enseñanza-aprendizaje y los estudiantes sean autogestivos, profundizando de acuerdo al interés que tengan por la Ingeniería Ambiental.



REFERENCIAS

1. Cabero, J. (2013). Nuevos modelos, recursos y diseño de programas en la práctica docente (1a ed.). Madrid, España: Centros de Estudios Financieros.
2. Cercas, C.A. (2022). Análisis documental de las estrategias de aprendizaje autogestivo con el uso de las TIC y las TAC dirigidas a estudiantes de educación media superior en México, desde investigaciones académicas de 2009 a 2020. Tesis de Licenciatura de Pedagogía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. Pp. 33-36
3. Cerón J.C., Moreno L.M. y Olías A.M. (2005). Contaminación y Tratamiento de Aguas. Módulo III. Máster Universitario de Ingeniería Ambiental. 2da Edición. Universidad de Huelva.
4. Cheremisinoff N.P. (2002). Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies. Editorial Butterworth Heinemann.
5. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018). Estadísticas del agua en México, edición 2018. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 31 de Enero de 2022, de http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/AAM_2018.pdf
6. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. Recuperado el 31 de enero de 2022, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/611037/Inventario_2019.pdf
7. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales. Recuperado el 31 de enero de 2022, de <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>.



8. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). Calidad del Agua en México. Recuperado el 17 de enero del 2023, de <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>.
10. Crispín B.M.L., Peña, M.E. y Loyola H.M. (2011). Capítulo 1 ¿Qué es el aprendizaje y cómo aprendemos? En M. L. Crispín Bernardo (comp.) Aprendizaje Autónomo para la docencia Pp. 10-28. Universidad Iberoamericana.
11. Delgado, P. (2020). Aprendizaje sincrónico y asincrónico: ventajas y desventajas. Observatorio de Innovación Educativa Tec.mx Observatorio de Innovación Educativa. Recuperado el 21 de junio del 2023 de: <https://observatorio.tec.mx/edu-news/aprendizaje-sincronico-y-asincronico-definicion>.
12. Díaz, R.R. (2013). "Causas y soluciones del problema de olores en plantas de tratamiento de aguas residuales" Tesis de Licenciatura de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería UNAM Pp. 21-55
13. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Secretaría de Obras y Servicios. Manual de Operación Planta de Tratamiento de Aguas Residuales "Cerro de la Estrella". México, Ciudad de México. Tomos I y II.
14. Eddy, M. Y. (1996). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. México: McGrawHill.
15. Ferrer J.S.A. (2008). Tratamiento biológicos de aguas residuales, Ed Alfa omega. 1a edición. Valencia.
16. Freeman, H. M. (1998). Manual de prevención de la contaminación industrial (No. P01 83). McGraw-Hill/Interamericana.
17. Garduño E.Y., García S.P. y Manchado P.J.P. (2021). La educación en tiempos de pandemia. N. Y. Cortés(Ed.), *La pandemia de la inactividad física contra la pandemia de la COVID-19 (147-154). Ciencias de la salud*.



18. Gutiérrez M.A., Palacios P.A. y Torrego E.L. (2010). Tribus digitales en las aulas universitarias. *Comunicar*, 17(34), 173-81.
19. Hernández, S.C. (2015). Propuesta de tratamiento de lodos generados en la planta de tratamiento de agua residual "Cerro de la Estrella". Tesis de Licenciatura de Ingeniería Química, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza UNAM Pp. 5-17.
20. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Censo de Población y Vivienda. Recuperado el 16 de junio del 2023, de: https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/?ps=microdatos#Resultados_generales.
21. Jacinto, Q.P. (2019). Compilación de material didáctico para las asignaturas del Área Ambiental impartidos en la Facultad de Química. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM. Pp. 57-58.
22. Jairo A. (1999). Tratamiento de agua residual Ed. Alfa omega. Ejemplar 3, México.
23. Jiménez, B. E. (2001). La contaminación ambiental en México. Limusa.
24. Lara, L. R., Gutierrez, L. I. y Jalil, L. (2016). El Escenario Interactivo de Aprendizaje (EIA), su inclusión a un aula virtual. (Ed.), *Tecnología, innovación e investigación en los procesos de enseñanza-aprendizaje* (1-15). Octaedro.
25. López, P. M. (2015). El profesor y la innovación educativa. Recuperado el 18 de Julio de 2023 de <https://biblat.unam.mx/hevila/Didac/2015/no65/1.pdf>
26. Limón, M.J.G. (2013). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales ¿Problema o Recurso?. Recuperado el 14 de Abril de 2022 de http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_qualberto_limon_trabajo_de_ingreso.pdf.



27. Lomelí E.A. (2011). Tratamiento de aguas residuales provenientes de rastro mediante un sistema de reactores anaerobio y aerobio con aereación intermitente. Tesis de Maestría en Ingeniería. Facultad de Ingeniería, UNAM Pp. 5-10.
28. Maldonado, G.A., García G.J. y Sampedro, B.E. (2019). El efecto de las TIC y redes sociales en estudiantes universitarios. RIED Rev Iberoam Educación a Distancia.
29. Martínez Fernández, J.R. (2004). *Concepción del aprendizaje, metacognición y cambio conceptual en estudiantes universitarios de Psicología*. Tesis doctoral, Universidad de Barcelona.
30. Nolasco, D. A. (2010). Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de plantas de tratamiento de aguas residuales. Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado el 27 de Marzo de 2022 de <https://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=35521814>
31. Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEMARNAT-2021). Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación Publicado en el Diario Oficial de la Federación, 11 de marzo del 2022. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
32. Norma Oficial Mexicana (NOM-002-SEMARNAT-1996). Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Publicado en el Diario Oficial de la Federación, 3 de junio de 1998. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998#gsc.tab=0
33. Norma Oficial Mexicana (NOM-003-SEMARNAT-1997). Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Publicado en el Diario Oficial de la Federación, 21 de septiembre de 1998.



https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/311363/NOM_003_SEMARNAT.pdf

34. Noyola A., Padilla R.A., Morgan S.J.M., Güereca L.P. y Hernández P.F. (2012). Typology of wastewater treatment technologies in Latin America. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 40 (9): 926-932.
35. Ojeda, L. C. (2000). Procesos anaerobios de tratamiento biológico, utilizados en el tratamiento de aguas residuales. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM Pp 25-33.
36. Riveros, O, B. (2013). Tratamiento de aguas residuales municipales en México. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, UNAM Pp 18-35.
37. Rodríguez F.A.A., Letón G.P., Rosal G.R., Dorado V.M., Villar F.S., Sanz G.J.M. (2006). Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales Industriales. Informe de Vigilancia Tecnológica. Editorial Confederación Empresarial de Madrid-CEOE.
38. Rojas R. (2002) Gestión integral de tratamiento de aguas residuales, Ed Cepis,OMS,OPS México.
39. Rosales, C., Sánchez, R. & Muñoz, S. (2019). Escala de aprendizaje autogestivo en estudiantes universitarios de la carrera de psicología de un sistema en línea. *Hamut'ay*, 6(2), Pp 102-125. Recuperado el 15 de febrero de 2023, de <http://revistas.uap.edu.pe/ojs/index.php/HAMUT/article/view/1778/1821>
40. Sapién, A.L., Piñón, L.C., Gutiérrez, M.D.C. y Bordas J.L. (2020). Higher Education During the Health Contingency COVID-19: Use of ICTs as Learning Tools. Case Study: Students of the Faculty of Accounting and Administration. *Rev Lat Comun Soc* (78), 309-28.



41. Sandoval P.J., Melchor J.N. y Fimbres A.Y.E. (2021). La educación en tiempos de pandemia. N. Y. Cortés(Ed.), *La pandemia de la COVID-19 y sus efectos colaterales (161-189)*. Ciencias de la salud.
42. Secretaria del Medio Ambiente (SEDEMA). (2015). Reporte de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Recuperado el 16 de junio del 2023, de <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/RPTAR%202015%20OP%202.pdf>
43. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).(2022). Calidad del Agua. Recuperado el 27 de enero de 2023, de http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AGUA05_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce.
44. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2011). Compendio de Estadísticas Ambientales. Recuperado el 19 de octubre de 2022, de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2013/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet28b9.html
45. Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX). (2018). Diagnóstico, Logros y Desafíos. Recuperado el 18 de septiembre de 2022, de <https://aplicaciones.sacmex.cdmx.gob.mx/libreria/biblioteca/libros/2018/diagnostico-logros-y-desafios-2018.pdf>
46. Torre P.J.C. (2007). *Una triple alianza para un aprendizaje universitario de calidad*. Madrid: Universidad Pontificia ICAI ICADE Comillas Madrid.
47. Vargas, J.M. (2020). Una reflexión sobre la escuela en tiempos de COVID desde la mirada de Arendt, Meirieu, Simons y Masschelein. *Rev Latinoam Estud Educ*, 50(especial), 195-216.
48. Vázquez A.C. (2003). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales fundación Ica. México.