



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**APLICACIONES PRÁCTICAS DE LA QUÍMICA
ANALÍTICA: EL CASO DE LA CARACTERIZACIÓN
DE LAS AGUAS RESIDUALES DE SISTEMAS DE
DEPURACIÓN NO ALCANTARILLADOS**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA

YESENIA GUADALUPE TÉLLEZ VEGA



CDMX

2024



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: **Profesor: José Luz González Chávez**
VOCAL: **Profesor: Norma Ruth López Santiago**
SECRETARIO: **Profesora: Silvia Citlalli Gama González**
1er. SUPLENTE: **Profesora: Alma Delia Rojas Rodríguez**
2° SUPLENTE: **Profesora: Mayte Saraí Valverde Labastida**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

FACULTAD DE QUÍMICA

ASESOR DEL TEMA

DRA. NORMA RUTH LÓPEZ SANTIAGO

SUSTENTANTE

YESENIA GUADALUPE TÉLLEZ VEGA

Contenido

Listado de tablas.....	V
Listado de figuras.....	vi
Resumen.....	x
Introducción.....	xi
Objetivos.....	xii
Objetivo general.....	xii
Objetivos específicos.....	xii
I. Marco teórico.....	1
1. La Química Analítica.....	1
1.1 Técnicas analíticas.....	1
1.2 Proceso analítico.....	3
1.3 Aplicaciones de la química analítica.....	6
2. Aplicación práctica de la química analítica: caracterización de las aguas residuales de sistemas de depuración no alcantarillados.....	9
2.1 Aguas residuales.....	9
2.2 Historia de los sistemas de depuración.....	12
2.3 Sistemas sanitarios alcantarillados.....	15
2.4 Sistemas sanitarios alcantarillados no convencionales.....	17
2.5 Sistemas sanitarios no alcantarillados.....	19
2.6 Marco normativo en materia de agua y aguas residuales.....	31
II. Metodología.....	33
3. Evaluación técnica de la clasificación de los efluentes.....	33
3.1 Análisis de las metodologías analíticas indicadas en PROY-NOM-006-CONAGUA-2022.....	33

3.2 Identificación de los conocimientos teóricos y prácticos de Química Analítica involucrados.....	34
III. Análisis de las metodologías analíticas.....	35
4. Nitrógeno Total Kjeldahl (NT).....	36
5. Demanda Bioquímica de Oxígeno Total (DBO₅).....	40
6. Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	45
7. Coliformes Fecales y Totales.....	49
8. Nitratos.....	54
9. Potencial de hidrógeno (pH).....	59
10. Conocimientos teóricos y metodológicos.....	64
Conclusiones.....	69
Objetivos específicos.....	69
Objetivo general.....	70
Referencias.....	71

Listado de tablas

Tabla 1. Etapas del análisis químico.....	6
Tabla 2. Proyecciones del agua renovable per cápita en México (2021-2030)	10
Tabla 3. Descarga de aguas residuales municipales 2020.....	11
Tabla 4. Parámetros para la caracterización del agua.....	11
Tabla 5. Clasificación y componentes de un sistema de alcantarillado.....	16
Tabla 6. Tipos de alcantarillados sanitarios no convencionales.....	18
Tabla 7. Clasificación de los sistemas de depuración.....	30
Tabla 8. Normatividad Mexicana.....	32
Tabla 9. Referencias de Normas Mexicanas para la determinación de calidad y límites máximos en aguas residuales.....	32
Tabla 10. Límites permisibles de nitrógeno total.....	36
Tabla 11. Volumen de muestra necesaria de acuerdo con la concentración de nitrógeno total presente en la muestra.....	38
Tabla 12. Límites permisibles de sólidos totales.....	46
Tabla 13. Límites permisibles de coliformes.....	50
Tabla 14. Límites permisibles de nitratos y nitritos.....	55
Tabla 15. Límites permisibles de pH.....	60

Listado de figuras

Figura 1. Técnicas analíticas, clasificación y ejemplos.....	3
Figura 2. Diagrama de proceso analítico.....	5
Figura 3. Relación de la química analítica, otras ramas de la química y demás ciencias.....	6
Figura 4. Perfil de alcantarillado principal, Hamburgo Alemania 1857.....	13
Figura 5. A. Ductos de piedra con tapa procedentes de San Lorenzo Tenochtitlán Veracruz y B. Desagües en la antigua ciudad de Cempoala, Veracruz, 1890-1891.....	14
Figura 6. Esquema de un sistema sanitario.....	17
Figura 7. Diseño clásico de un sistema de alcantarillado de pequeño diámetro por gravedad.....	18
Figura 8. Arreglo general de un sistema de alcantarillado por presión.....	19
Figura 9. Diseño clásico de un sistema de alcantarillado por vacío.....	19
Figura 10. Diagrama de flujo del proceso a diseñar.....	22
Figura 11. Diferentes humedales artificiales de tipo familiar.....	24
Figura 12. Proceso de biofiltración sobre materiales orgánicos.....	25
Figura 13. Esquema de un biodigestor.....	26
Figura 14. Esquema de una fosa séptica.....	29
Figura 15. Alternativas para la instalación de un sistema de depuración.....	31
Figura 16. Ejemplo experimental de una muestra de agua residual: A) Digestión, B) Destilación y C) Valoración.....	38
Figura 17. Diagrama experimental de método Kjeldahl.....	39
Figura 18. Diagrama experimental para determinación de DBO_5	43
Figura 19. Secuencia experimental para determinación de DBO_5	44
Figura 20. Secuencia experimental para determinación de sólidos suspendidos totales.....	48
Figura 21. Diagrama experimental para determinación de SST.....	47
Figura 22. Diagrama experimental para determinación de coliformes totales y fecales, prueba presuntiva.....	51

Figura 23. Diagrama experimental para determinación de coliformes totales y fecales, prueba confirmativa.....	52
Figura 24. Secuencia experimental para determinación de coliformes totales y fecales, pruebas presuntivas y confirmativas.....	53
Figura 25. Columna para reducción de nitratos.....	56
Figura 26. Diagrama experimental para determinación de nitratos por método de cadmio cuperizado.....	57
Figura 27. Diagrama experimental para determinación de pH, calibración.....	61
Figura 28. Diagrama experimental para determinación de pH, muestreo.....	62
Figura 29. Determinación de pH con equipo Schott.....	63

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Norma Ruth López Santiago por su constante apoyo, orientación, dirección, tiempo, paciencia y su atención durante la realización de este trabajo, y los ánimos para concluirlo.

Al Dr. José Luz González Chávez por su tiempo y disposición para la revisión de este trabajo.

M. en C. Silvia Citlalli Gama González por su tiempo y disposición para la revisión de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por los años que me brindo educación de alto nivel.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM por la beca otorgada para la realización de esta investigación a través del proyecto ***PE201022 Propuestas didácticas basadas en metodologías activas para la enseñanza-aprendizaje de la Química Analítica.***

Resumen

La presente investigación tuvo por objetivo, hacer una investigación de las metodologías analíticas empleadas para la caracterización de los efluentes de sistemas de saneamiento no alcantarillado de acuerdo con lo indicado en la normatividad vigente. Se trata de una revisión sistemática de los parámetros físicos, químicos y biológicos esenciales que deben de estar garantizados para el cuidado de la salud humana y el cuidado ecológico.

La estrategia seguida constó de tres etapas, en la primera fase se indagó sobre la conceptualización de la química analítica en el margen aplicativo de las aguas residuales, además de la definición de los sistemas sanitarios y su marco normativo en México. En la segunda fase se llevó a cabo la evaluación teórica-técnica de los efluentes de interés, los parámetros a analizar, las metodologías a efectuar para la revisión del estándar remitido y los conocimientos aplicados en el mismo. En la tercera etapa se describieron los conocimientos sobre los contenidos curriculares de las diversas unidades de las asignaturas de Química Analítica impartidas en la Facultad de Química.

A partir de los resultados obtenidos se concluye que los conocimientos de química analítica en la actualidad van más allá del aula, implicando así que los estudiantes de las diversas licenciaturas cuentan con las herramientas necesarias para formar parte en la toma de decisiones de los diversos entornos profesionales de los que pueden ser partícipes.

Palabras clave: *método analítico, agua residual, parámetros fisicoquímicos*

Introducción

Emitir un resultado confiable de análisis que impactará en la toma de decisiones, requiere de altos conocimientos de química analítica, sin embargo, es común que mientras cursan las materias de esta área los estudiantes no se percaten de su importancia en la vida cotidiana (López-Santiago & Orta-Pérez, 2012; López-Santiago N. R., 2021).

La química analítica tiene un aporte importante en distintas áreas, por ejemplo, en la determinación de la concentración de un contaminante en agua, las pruebas antidopaje, el contenido de azúcar en los alimentos, para conocer el contenido es necesario efectuar análisis.

En nuestro país la mayoría de las regulaciones se indican en las normas oficiales mexicanas (NOM), en muchos de los casos las NOM remiten a los estándares (antes normas mexicanas, NMX), que describen con mayor detalle especificaciones de los métodos de ensayo (Congreso de la Unión, 2020).

El proyecto de norma "Sistemas de depuración de aguas residuales domésticas que no estén conectadas a un sistema de alcantarillado sanitario-Especificaciones y métodos de prueba", contiene 2 pautas importantes: la primera tiene que ver con la ingeniería del diseño civil, mecánico e hidráulico del sistema de depuración, y la segunda corresponde a los métodos de ensayo o prueba.

En el caso específico de los sistemas de depuración para aguas residuales domésticas, debe de cumplir con los parámetros físicos, químicos y biológicos esenciales, los cuales son: Coliformes totales, Demanda bioquímica de oxígeno total (DBO₅), Nitrógeno total Kjeldahl y Sólidos suspendidos totales.

La finalidad del presente trabajo es realizar una revisión de las metodologías analíticas empleadas para la caracterización de los efluentes de sistemas de saneamiento no alcantarillado propuestas en el proyecto de norma, de acuerdo con normatividad vigente, así como los conocimientos teóricos y metodológicos necesarios para su aplicación.

Objetivos

Objetivo general

Analizar las metodologías analíticas empleadas para la caracterización de los efluentes de sistemas de saneamiento no alcantarillado de acuerdo con lo indicado en la normatividad vigente.

Objetivos específicos

- Revisar las metodologías analíticas propuestas en el proyecto de norma "Sistemas de depuración de aguas residuales domésticas que no estén conectadas a un sistema de alcantarillado sanitario-Especificaciones y métodos de prueba.
- Identificar los conocimientos teóricos y prácticos de Química Analítica involucrados.
- Valorar la importancia actual de la química analítica para la resolución de problemáticas reales.

I. Marco teórico

1. La Química Analítica

La definición de la química analítica es tan variada según sea la fuente de consulta, aunque la mayoría coinciden en que es la ciencia de la medición, identificación y determinación, y que se ocupa de la separación, identificación y determinación de la composición relativa de una muestra de materia (Skoog, 2014).

Una definición más completa es la que ofrece el Depto. de Química Analítica de la Facultad de Química de la UNAM "es el conjunto de estrategias y tácticas de las mediciones químicas" (Facultad de Química UNAM, 2023).

La Química Analítica se interrelaciona con muchos campos del conocimiento de la química: como la orgánica, inorgánica, bioquímica, etc., ... su aplicación se extiende a otras áreas como la medicina, farmacia, forense, entre otras.

Una clasificación usual de la Química Analítica es en cualitativa y cuantitativa. En los análisis cualitativos se efectúa la identificación química de las especies que se encuentran presentes en la muestra. En los análisis cuantitativos se cuantifica la cantidad de analitos presentes en una muestra, en términos numéricos. Para poder llevar a cabo un análisis cuantitativo, es necesario disponer de información cualitativa con anterioridad. Tanto el análisis cualitativo como el cuantitativo precisan de ordinario una fase de separación (Skoog, 2014).

1.1 Técnicas analíticas

Es importante distinguir entre los términos "técnica analítica" y "método analítico". Una técnica es un proceso científico fundamental que se ha demostrado útil para proporcionar información sobre la composición de las sustancias. Un método es una forma particular de abordar un problema analítico (Gomis Yagües, 2008).

Los términos "procedimiento" y "protocolo" también se utilizan en el análisis químico. Las instrucciones escritas para aplicar un método son un procedimiento; un procedimiento requiere que el usuario tenga un conocimiento

previo de la metodología analítica, por lo que no proporciona mucho detalle sino sólo un resumen general de los pasos que deben seguirse. Por otro lado, un protocolo es la descripción más detallada de un método. Si los resultados analíticos deben aceptarse para un propósito específico, deben seguirse sin excepción las instrucciones detalladas (Gomis Yagües, 2008).

Las técnicas y métodos analíticos se clasifican acorde con varios criterios, uno de los principales es en torno a la naturaleza del analito de interés. Esta clasificación es considerada histórica o antigua ya que es de los primeros años de la química, en la que se consideraban las propiedades químicas clásicas, y las propiedades fisicoquímicas. Mas adelante se consideraron las interferencias en la separación del analito, formando las 3 clasificaciones de técnicas y métodos analíticos (Universidad de Murcia, 2011; Baeza Baeza, 2016):

- Técnicas y métodos clásicos: se consideran sólo mediciones de masa o volumen para el análisis del analito.
- Técnicas y métodos instrumentales: se consideran mediciones de alguna propiedad fisicoquímica que se convierte en una señal que no puede ser detectada por el ojo humano y requiere de un instrumento para su detección y cuantificación, por ejemplo, la radiación electromagnética, radiación térmica, óptica UV o infrarrojo, etc.
- Técnicas y métodos de separación: Permiten la separación entre el analito y las interferencias para realizar las medidas en condiciones adecuadas antes de proceder a aplicar la técnica analítica seleccionada. En la actualidad, existen métodos de separación que son métodos de análisis en sí mismos.

En la Figura 1 se enlistan algunas de las técnicas más comunes, así como su clasificación.

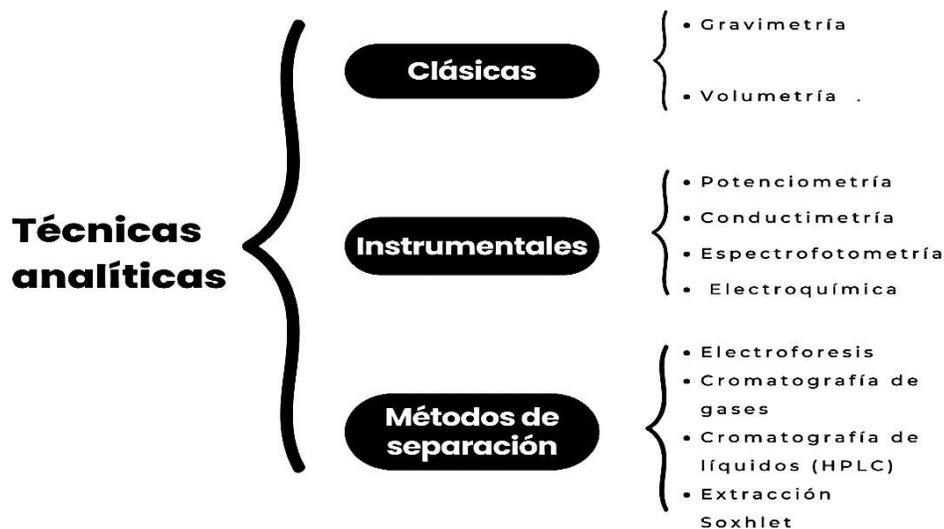


Figura 1. Técnicas analíticas, clasificación y ejemplos
Elaboración propia

1.2 Proceso analítico

El análisis químico es el estudio químico de la composición y estructura de una sustancia. Se puede definir en términos más generales como la recopilación de todos los procesos para obtener datos químicos precisos. El análisis analítico se divide en dos categorías: cualitativo y cuantitativo (Study Smarter, 2023).

Independientemente del método o técnica utilizada, el análisis químico generalmente tiene los siguientes pasos, cabe destacar que cada paso puede presentar pasos adicionales (Baeza Baeza, 2016; Study Smarter, 2023).

1. *Recolección de una muestra de interés:* Ésta es la definición del problema y debe resolverse una serie de preguntas y cuestiones, como el tipo de análisis requerido, la naturaleza de la muestra, el método analítico, la importancia de las propiedades analíticas requeridas y otras cuestiones como el tiempo de análisis, la toxicidad de la muestra, el impacto ambiental, etc.
2. *Escoger el método analítico apropiado para analizar la muestra:* Este paso es esencial para el éxito del proceso analítico. Se requiere una definición

precisa del problema para lograr las propiedades analíticas establecidas y tener en cuenta los factores complementarios como la disponibilidad de equipo, el tiempo, el costo, la seguridad y los desechos producidos.

3. *Preparación de la muestra:* es el paso más largo y requiere una comprensión de las reacciones químicas. Las siguientes operaciones son reconocibles. La preparación puede incluir procesos como homogeneización, reducción de tamaño, calcinación, disolución, disgregación o evaporación o convertir el analito en otra sustancia química a través de una reacción, generalmente con un reactivo orgánico.
4. *Analizar la muestra utilizando el método, la prueba o la técnica elegida:* proporcionará una o varias señales relacionadas con alguna propiedad del analito o analitos, que deben traducirse en información química sobre la concentración de las especies en estudio después de un tratamiento adecuado de los datos. Incluye dos pasos: Normalización o calibración: Este paso garantiza la confiabilidad de los resultados mediante la recopilación de datos de patrones (muestras o disoluciones de concentración conocidas). Determinación: recopilar información de las muestras de concentración desconocida. La información obtenida con los patrones en la etapa anterior se utiliza como referencia para la determinación.
5. *Interpretación de los resultados del análisis, esto incluye cálculos o más pruebas:*
 - Tratamiento y evaluación de datos: Al relacionar la señal con la concentración del analito, el tratamiento de los datos de calibración permite dar validez a los resultados.
 - Validación de los resultados: Los resultados analíticos deben incluir una estimación de su confiabilidad mediante el cálculo de la incertidumbre de la medida y la valoración de los resultados con relación al objetivo del análisis.

- Presentación de los resultados: El informe debe indicar las limitaciones específicas del método de análisis empleado para asegurarse de que las conclusiones que se extraigan sean coherentes con los resultados obtenidos, además de comunicar los resultados obtenidos y su incertidumbre con las cifras significativas adecuadas.

El proceso analítico puede resumirse en el siguiente diagrama de proceso presentado en la Figura 2.

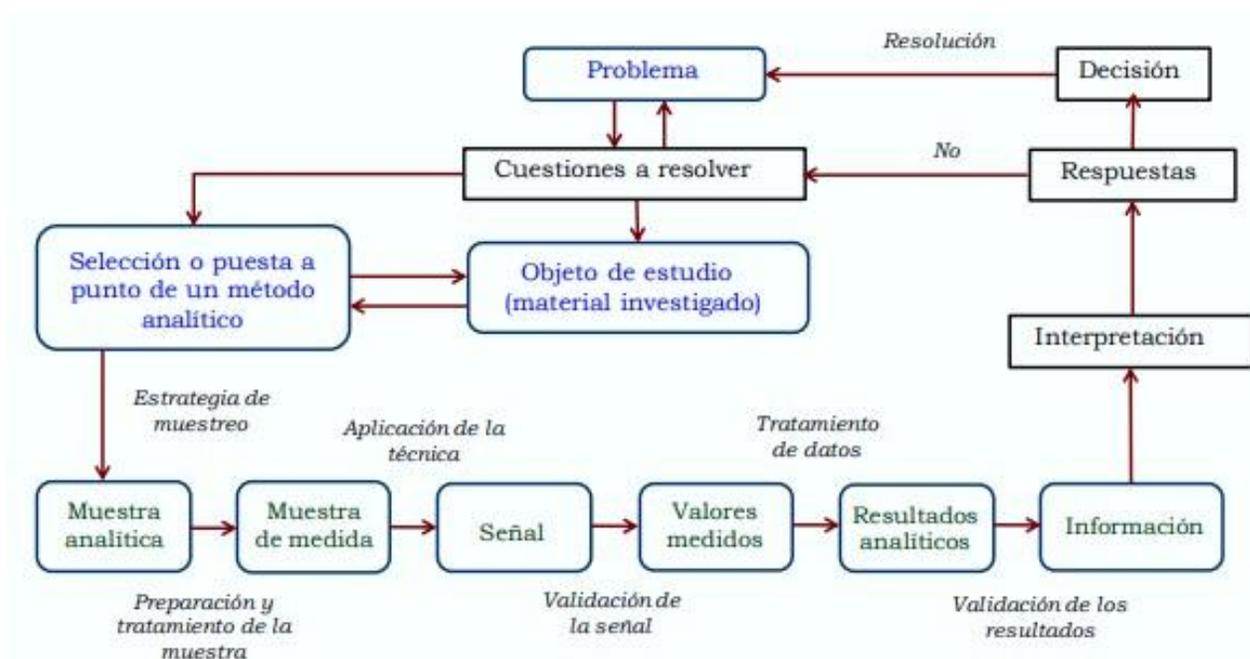


Figura 2. Diagrama de proceso analítico
Tomado de (Baeza Baeza, 2016).

Para poder realizar el análisis cuantitativo es necesario contar primero con información cualitativa. Tanto el análisis cualitativo como el cuantitativo precisan de una fase de separación, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Etapas del análisis químico

Etapa	Fases de la etapa	Análisis químico	Habilidades necesarias
Pre analítica	Definición del problema	Información requerida	Conocimiento de los análisis
	Toma y preparación de la muestra	<ul style="list-style-type: none"> Selección del método analítico Obtención de la muestra representativa Preparación de muestra Definición de replicados Disolución de muestras Eliminación de interferencias 	<ul style="list-style-type: none"> Métodos de muestreo Estadística Química descriptiva
Analítica	Procesos de medida	Medición de la propiedad del analito	Métodos de análisis
	Tratamiento de datos	Cálculo de resultados	
Post analítica	Tratamiento estadístico de datos	Estimación de fiabilidad de los resultados	Estadística
	Obtener la solución al problema planteado	Interpretación para obtener la solución al problema	Habilidad y juicio personal

Readaptación tomada de (Caballero, 2018)

1.3 Aplicaciones de la química analítica

Se considera una de las ramas más modernas de la Química pues es muy aplicada, al ser una ciencia multidisciplinaria, ya que cualquier tipo de producto debe tener un análisis detrás. Se utiliza en ámbitos muy variados y está relacionada con muchas otras ramas científicas como se muestra en la Figura 3.

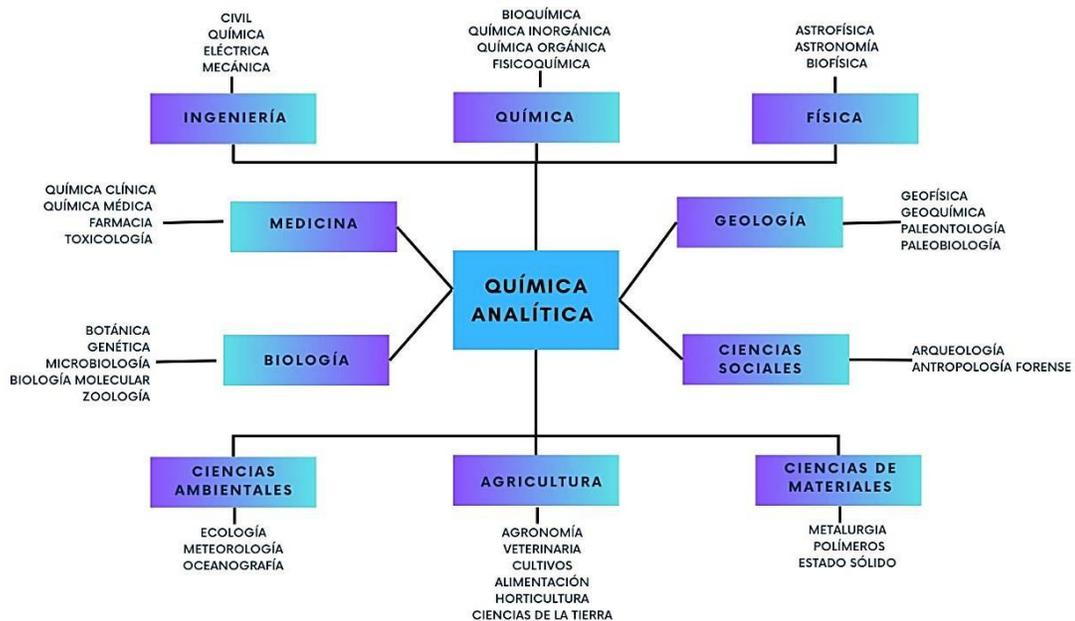


Figura 3. Relación de la Química analítica, otras ramas de la química y demás ciencias
Readaptación tomada de (Skoog, 2014).

Al principio el análisis químico se estudiaba principalmente como un arte que consistía en la aplicación con destreza y habilidad de algunos métodos que se habían deducido empíricamente. A medida que la química analítica ha avanzado como ciencia se ha demostrado que todos esos métodos prácticamente se apoyan en principios científicos que fundamentan toda la gama de las técnicas analíticas que se aplican en los laboratorios para identificar y cuantificar diferentes especies químicas. Con el avance de la tecnología ha sido necesario desarrollar técnicas cada vez más sofisticadas para satisfacer los diversos requerimientos analíticos, principalmente en los sectores de transformación e investigación (López Torres, 2010).

En la industria de transformación la química analítica tiene su aplicación, por ejemplo, en el control de la calidad de los productos que se procesan en áreas tales como la metalurgia, la petroquímica, la industria de alimentos y bebidas, farmacéutica, cosméticos y muchas otras más (López Torres, 2010).

Alternativamente, en el área de investigación, la química analítica es una herramienta fundamental en la identificación y caracterización de nuevos compuestos que tienen aplicación tanto en la industria de transformación como en el ramo de la salud (López Torres, 2010).

En el ámbito medioambiental, en el control de contaminantes presentes en agua, suelo y aire, en el tratamiento de aguas residuales usando tecnologías no convencionales, la validación de utilización de tecnologías limpias, en el manejo y control de los procesos aerobios y anaerobios de producción de gases a partir de material biodegradable, en la evaluación y monitoreo de emisiones gaseosas, evaluación de riesgos ambientales, entre otras (Arazari Saldivar, 2021).

La química analítica también entra en el terreno de la legislación, colaborando en la elaboración de leyes que permiten proteger al consumidor, al medio ambiente, etc. Estableciendo normas de calidad, límites tolerables de tóxicos; otra función es el desarrollo de técnicas y métodos de análisis que permitan la ejecución de esas leyes (Arazari Saldivar, 2021).

Todo lo anterior da una idea del amplio espectro de aplicación de la química analítica y de la necesidad de que el estudiante de algunas de las licenciaturas

relacionadas con la química se documente en los conceptos que le permitan manejar e instrumentar técnicas analíticas y hacer una interpretación lógica y correcta de los resultados (López Torres, 2010).

“El Departamento de Química Analítica de la Facultad de Química de la UNAM, tiene como misión, formar profesionales químicos con amplios conocimientos analíticos (teóricos y prácticos) capaces de generar, aplicar, modificar y transmitir información de calidad que sirva de herramienta estratégica para la identificación y solución de problemas científicos y técnicos, la gestión tecnológica, la preservación y manejo de recursos, y promover el desarrollo sustentable del país. Se espera que al término de sus estudios los egresados puedan incorporarse en diversos sectores económicos del país, en una amplia variedad de ramas industriales y del sector productivo, en la academia o en dependencias privadas o gubernamentales. El departamento aborda la investigación pura y aplicada de los métodos analíticos, haciéndola extensiva a los programas de licenciatura y posgrado (maestría y doctorado)” (Facultad de Química UNAM, 2023).

El sitio estadounidense Zippia, menciona que los químicos analíticos determinan, examinan e identifican la naturaleza de diversos elementos, compuestos o sustancias.

El especialista químico tiene una amplia gama de aplicaciones laborales, por ejemplo, en la seguridad alimentaria, producción farmacéutica, control de contaminantes, etc. Los químicos analíticos tienen trabajos relacionados con el servicio, empleándose en la industria, la academia y el sector gubernamental, por ello deben tener conocimiento profundo de instrumentación, computadoras y estadística, además de tener una mente lógica e independiente, así como la capacidad de resolver problemas complejos. Algunas otras tareas que se le pueden pedir que realice incluyen la realización de investigaciones de laboratorio básicas, el desarrollo de procesos y productos, el diseño de instrumentos utilizados en el análisis analítico y la preparación de la documentación de licencia del producto (Zippia, 2023).

El sitio mexicano Indeed, indica las habilidades necesarias esenciales para que un profesional obtenga empleo como analista químico, las habilidades esenciales son las siguientes: capacidad de análisis y orientación al detalle, capacidad para la organización, objetividad e imparcialidad, habilidad para el liderazgo, investigación básica, resolución de problemas, manejo de tecnologías de información (Indeed, 2023).

2. Aplicación práctica de la química analítica: caracterización de las aguas residuales de sistemas de depuración no alcantarillados.

Como se mencionó en la sección anterior la química analítica tiene una gran y amplia aplicación en diversos ámbitos, en el caso de la caracterización de las aguas residuales de sistemas de depuración no alcantarillados, los ámbitos de aplicación son en torno a la legislación ambiental y la conservación del medio ambiente. En los siguientes apartados se hará la revisión y clasificación de los conocimientos, metodologías, técnicas analíticas, mostrando la importancia de la química analítica en los profesionales químicos, demostrando que es una herramienta básica y necesaria en la resolución de problemáticas actuales en el mundo moderno.

2.1 Aguas residuales

El agua es un recurso renovable limitado, y cada vez menos disponible; la necesidad de satisfacer la demanda hídrica de la población y el sector industrial con el volumen actual de este recurso llega a provocar escasez, problemática que, si bien se manifiesta mayoritariamente en las zonas urbanas, no es ajeno a las zonas agrícolas.

Según estadísticas proyectadas por CONAGUA, el agua *per cápita* disminuirá considerablemente en el periodo de 2021 a 2030, Tabla 2.

Tabla 2. Proyecciones del agua renovable per cápita en México (2021-2030)

Año	Población (millones de habitantes)	Agua renovable per cápita (m ³ /hab/año)
2021	128 231	3 600
2025	132 584	3 482
2030	137 481	3 358

Tomada de (CONAGUA, 2022)

Ante la emergencia de disminución del agua renovable *per cápita* surge la necesidad de generar tratamientos para las aguas residuales a fin de tratar de reintegrarlas, ya sea en reuso o para recarga de acuíferos.

Se entiende como aguas residuales aquellas aguas que son generadas después de su uso por el ser humano, las cuales pueden contener microorganismos, patógenos, metales, contaminantes sólidos, etc., estos representan un peligro a la salud humana y la salud ambiental, por tanto, es necesario que sean tratadas y depositadas de acuerdo con la normatividad ambiental aplicable en cada nación (López, 1985).

La generación de las aguas residuales está relacionada directamente con el número de pobladores, así como con el tipo de actividades que realiza la población, las cuales según SEMARNAT las cataloga en la NOM-002-SEMARNAT-1996 de la siguiente manera:

- a) Aguas residuales domésticas. Las provenientes del uso particular de las personas y del hogar.
- b) Aguas residuales de proceso. Las resultantes de la producción de un bien o servicio comercializable.
- c) Aguas pluviales. Aquellas que provienen de las lluvias, se incluyen las que provienen de la nieve y el granizo.

Otra clasificación es de acuerdo con quien las maneja y emite, siendo los siguientes (CONAGUA, 2022):

1. Municipales: corresponden a las que son manejadas por los sistemas de alcantarillado, ya sea urbano o rural.
2. Industriales: descargadas directamente a los cuerpos receptores de propiedad nacional, como es el caso de la industria autoabastecida.

En 2020 la CONAGUA reportó los niveles de descarga de aguas municipales mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Descarga de aguas residuales municipales 2020

Centros urbanos (descargas municipales)		
Rubro	Volumen	Unidades
Aguas residuales	8.82	Miles de hm ³ /año (279.80 m ³ /s)
Se recolectan en alcantarillado	6.79	Miles de hm ³ /año (215.40 m ³ /s)
Se tratan	4.56	Miles de hm ³ /año (144.70 m ³ /s)
Carga contaminante		
Se generan	2.24	Millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se recolectan en alcantarillado	1.84	Millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se remueven en los sistemas de tratamiento	0.96	Millones de toneladas de DBO ₅ al año

Tomado de (CONAGUA, 2022).

Las aguas residuales también pueden clasificarse en función de los contaminantes que contengan, estos pueden ser físicos, químicos y biológicos, Tabla 4. Regidos por parámetros, los que determinan cuantitativa o cualitativamente la calidad del agua, de acuerdo con los límites permisibles establecidos en la normatividad, según el propósito que tendrán, por ejemplo: agua para consumo humano, agua para riego, agua para uso industrial, etc. (Jiménez, 2001).

Tabla 4. Parámetros para la caracterización del agua

Contaminantes	Parámetro
Físicos	<ul style="list-style-type: none"> • Olor • Temperatura • Turbidez • Conductividad • Sólidos suspendidos • Sólidos disueltos • Sólidos totales
Químicos	<ul style="list-style-type: none"> • Alcalinidad • Oxígeno disuelto • pH • No metales • Metales • Nutrientes (N y P) • Dureza • Cloro residual
Materia Orgánica	<ul style="list-style-type: none"> • Demanda química de oxígeno (DQO) • Demanda biológica de oxígeno (DBO) <ul style="list-style-type: none"> • Carbono orgánico total (COT) • Grasas y aceites • Fenoles
Biológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Bacteriológico • Parasitológicos • Viroológicos

(Jiménez Cisneros, 2001) Adaptación propia.

2.2 Historia de los sistemas de depuración

La historia de los sistemas de alcantarillado y drenaje es tan antigua, remontándose a las ciudades de antiguas civilizaciones, por ejemplo, se han encontrado instalaciones de alcantarillado en lugares prehistóricos de Creta y en las ciudades asirias.

En la antigua Grecia hay catalogados restos de letrinas agrupadas en habitaciones subterráneas, de planta cuadrada o circular, con unos orificios en el techo para conseguir ventilación e iluminación, que desaguaban sobre las cloacas principales, situadas a mayor profundidad. Hacia finales de la edad media empezaron a usarse los pozos negros, cuyo contenido se empleaba como fertilizante, o era vertido en los cursos de agua en tierras no explotadas. En el renacimiento, se recuperó la costumbre antigua de construir desagües, normalmente en forma de canales y zanjas a los lados de la calle, cuya función era conducir las aguas naturales (AN) y de lluvia. Otra solución adoptada cuando la población se asentaba en la confluencia de varias cuencas pluviales era la desviación de los cauces de AN de menor tamaño en varios ramales o "esguevas" que recogían todos los aportes de inmundicias de la ciudad, vertiendo luego al cauce principal en distintas desembocaduras (Rosell Campos, 2009).

A finales del siglo XIX, prácticamente todas las ciudades contaban con drenajes combinados que desembocaban en cuerpos de agua (ríos, lagos, estuarios), este fue el modo inicial de contaminar los recursos hidráulicos. El primer sistema moderno de drenaje fue construido en 1840 por Lindley en Hamburgo, Alemania, Figura 4, el cual, a la fecha, no ha cambiado esencialmente. Las innovaciones en los últimos 100 años se limitan al empleo de otros materiales, la introducción de pozos de visita, estaciones de bombeo y otras construcciones auxiliares (Jiménez, 2001).

El tratamiento del agua residual se inició con su desarenación para evitar el azolvamiento de las conducciones, pasando al nivel de tratamiento secundario cuando la capacidad de autodepuración fue sobrepasada. Entre los primeros procesos aplicados destacó el filtro percolador que se creía realizaba la

separación física de contaminantes y, posteriormente, se descubrió, en Inglaterra, su acción biológica. El bosquejo de los sistemas de tratamiento fue un procedimiento empírico hasta la mitad del siglo XX, cuando aparecen varias teorías científicas para su explicación y diseño (Jiménez, 2001).



Figura 4. Perfil de alcantarillado principal, Hamburgo Alemania 1857
Tomado de (We Are Water Foundation , 2022)

La depuración en México

La mayoría de las antiguas ciudades mesoamericanas contaba con desagües subterráneos que corrían por sus edificios y patios, en ocasiones, se conectaban con redes de acequias externas en las orillas y más allá, para irrigar parcelas agrícolas. Entre los casos más antiguos están San Lorenzo Tenochtitlan (Veracruz) y La Venta (Tabasco) que contaron con desagües. San Lorenzo Tenochtitlan floreció entre 1500 y 500 a.C., ahí se emplearon alcantarillas, tuberías de barro hechas de piezas ensambladas, así como acueductos subterráneos de piedra basáltica labrada, cuyos tramos se unieron con chapopote o mezcla. Estas instalaciones hidráulicas se combinaron con pozos, cisternas, estanques y otros depósitos de agua, superficiales y subterráneos, tal como se muestra en la Figura 5A. En La Venta, por su lado, hubo canales y alcantarillas de piedra, como se muestra en la Figura 5B (CONAGUA, Semblanza Histórica del Agua en México, 2009).

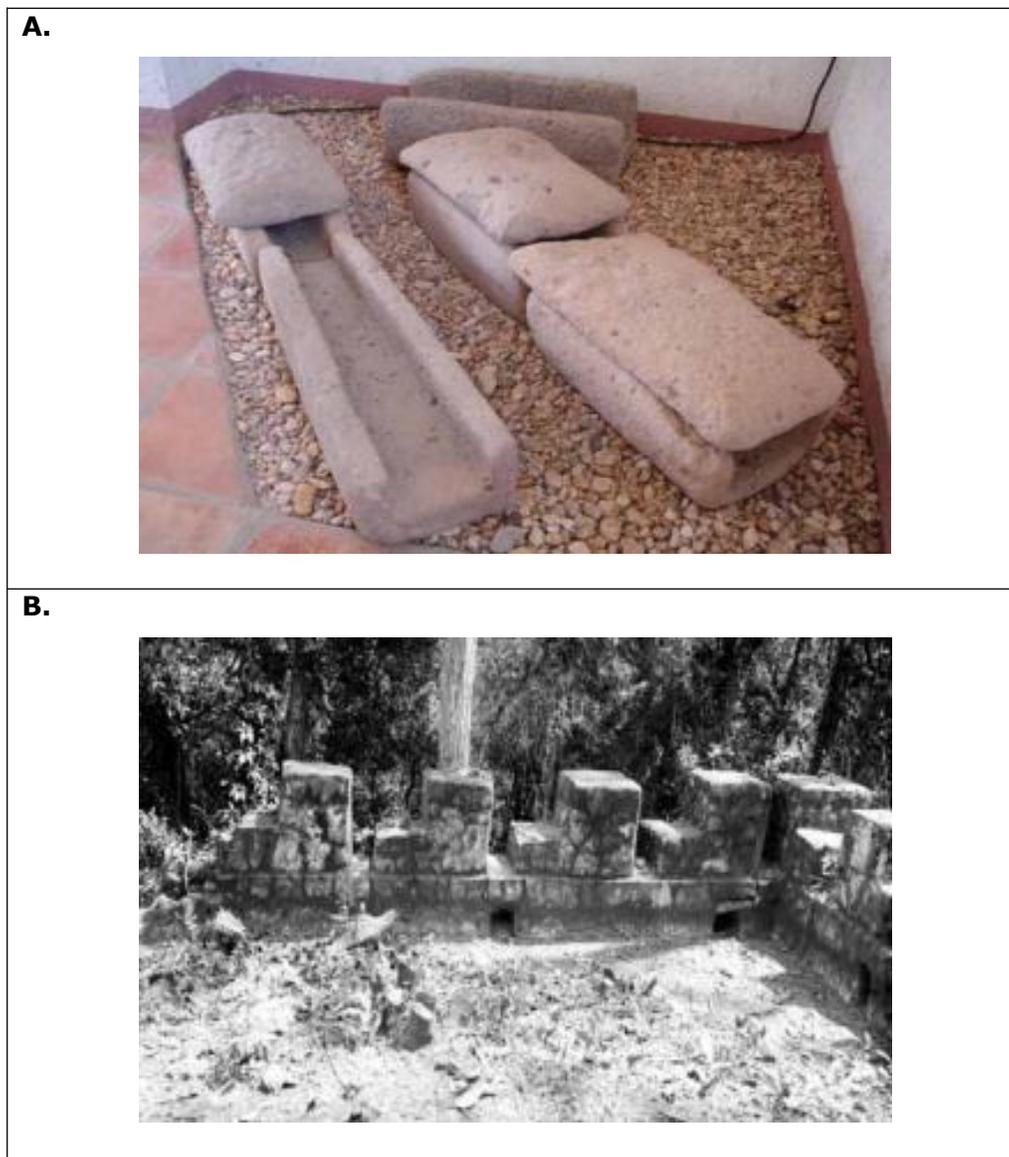


Figura 5. A. Ductos de piedra con tapa procedentes de San Lorenzo Tenochtitlán Veracruz y B. Desagües en la antigua ciudad de Cempoala, Veracruz, 1890-1891 Tomado de (CONAGUA, Semblanza Histórica del Agua en México, 2009)

A mediados del siglo XVI en la Nueva España comenzó la preocupación por realizar un proyecto de desagüe que sirviera como protecciones a las inundaciones que aquejaban a lo que fue la antigua Tenochtitlan. En noviembre de 1555 Francisco Goudiel presentó el proyecto "Tajo Nochistongo y túnel de Huehuetoca", la obra fue considerada la más importante de toda América en la época colonial; en ella proponía desviar el río Cuautitlán por medio de un tajo abierto que atravesaba las montañas de Huehuetoca y conectaba con el río Tepeji (Legorreta, 2006).

Enrico Martínez mejoró esa idea 50 años después, tras otras dos inundaciones, al sacar el agua del nivel más bajo del lago de Texcoco hasta el río Tula y sus afluentes, conduciéndola a más de 300 kilómetros; la grandiosa obra fue conocida como Tajo de Nochistongo y dio renombre a México (Legorreta, 2006). A finales del siglo XVIII se continúa el esfuerzo por reducir las zonas lacustres, hacia 1794 el arquitecto neoclásico Ignacio Casters construyó un canal para recoger las aguas provenientes del tramo San Cristóbal-Xaltocán, que se conectó con los tramos del tajo Nochistongo y el lago de Zumpango, con el paso de los años este antiguo tajo y el canal de Huehuetoca en su tramo final se convertiría en el Interceptor Oriente.

Los intentos por desaguar el valle de México continuaron hacia el siglo XIX, en 1865 Maximiliano de Habsburgo autorizó el comienzo de las obras de la construcción de un canal de 50 kilómetros desde San Lázaro hasta Zumpango, esta obra sería conocida como el Gran Canal de desagüe y el primer túnel de Tequixquiac, concluyó en 1895 y fue inaugurada por Porfirio Díaz (Legorreta, 2006). A mediados del siglo XX la densidad poblacional sobrepasaba los desagües de la ciudad y obligó a construir el tercer sistema de desalojo de agua, el drenaje profundo (Legorreta, 2006).

2.3 Sistemas sanitarios alcantarillados

Los sistemas sanitarios son sistemas con tuberías de grandes diámetros que permiten una gran flexibilidad en la operación del sistema debida en muchos casos a la incertidumbre en los parámetros que definen el caudal: densidad poblacional y su estimación futura, mantenimiento inadecuado o nulo. Los sistemas de alcantarillado pueden ser de dos tipos: convencionales o no convencionales (CONAGUA, 2019). Los sistemas convencionales de alcantarillado se clasifican en (CONAGUA, 2019):

- Alcantarillado separado: es aquel en el cual se independiza la evacuación de aguas residuales y las aguas pluviales.
- Alcantarillado sanitario: sistema diseñado para recolectar exclusivamente las aguas residuales domésticas e industriales.

- Alcantarillado pluvial: sistema diseñado para la evacuación de la escorrentía superficial producida por la precipitación.
- Alcantarillado combinado: conduce simultáneamente las aguas residuales, domésticas, industriales y de lluvia.

Los componentes principales de un sistema de alcantarillado se agrupan según para la función para la cual son empleados. Así un sistema de alcantarillado sanitario, pluvial o combinado se integra de las partes siguientes (CONAGUA, Libro 20. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Alcantarillado sanitario, 2019), Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación y componentes de un sistema de alcantarillado

Clasificación de estructuras	Objetivo	Componentes
De captación	Recolectar las aguas a transportar	<ul style="list-style-type: none"> • Albañales • Coladeras
De conducción	Transportar las aguas recolectadas y dirigir hacia el sitio de tratamiento o vertido.	Se clasifican de acuerdo con la importancia del conducto dentro del sistema de drenaje o según el material y método de construcción del conducto que se utilice: atarjeas, subcolectores, colectores, emisores
De conexión y mantenimiento	Facilitar la conexión y mantenimiento de los conductos tales como limpieza e inspección de los conductos.	<ul style="list-style-type: none"> • Pozos de visita
De vertido	Proteger y mantener libre de obstáculos, evitar posibles daños al último tramo de tubería.	<ul style="list-style-type: none"> • Conductos cerrados • Canal abierto
Instalaciones complementarias	Instalaciones no primordiales, pero en ciertos casos resultan importantes para su correcto funcionamiento.	<ul style="list-style-type: none"> • Plantas de bombeo • Plantas de tratamiento • Cruces • Vasos de regulación y de detención • Disipadores de energía
Disposición final	No es una estructura en sí, pero es fundamental ya que de no considerarse se pueden provocar graves daños al medio ambiente e incluso a la población	

Elaboración propia con información de (CONAGUA, 2019) (Pérez, 2014)

Un ejemplo de un arreglo de sistema sanitario se muestra en la Figura 6.

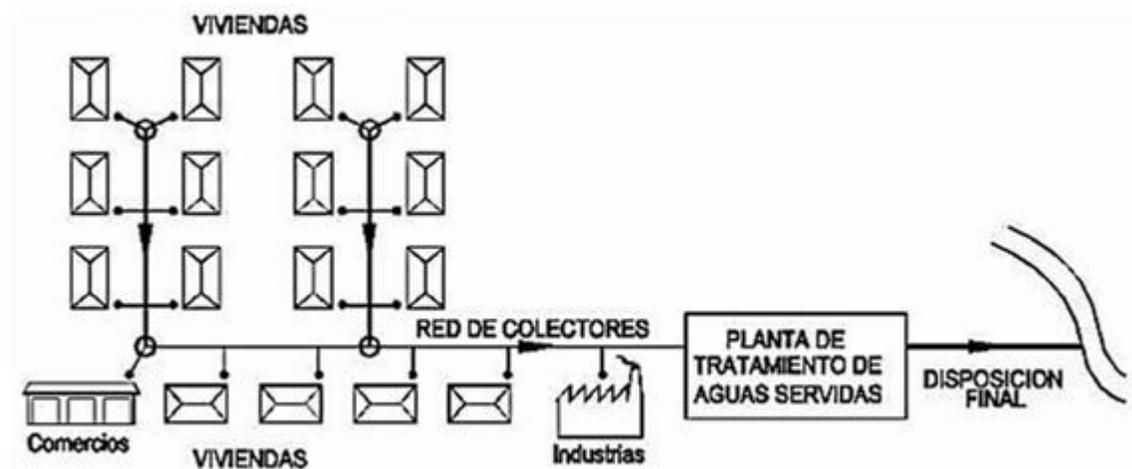


Figura 6. Esquema de un sistema sanitario
Tomado de (Lorenzetti, 2012)

2.4 Sistemas sanitarios alcantarillados no convencionales

Los sistemas de alcantarillado no convencionales surgen como una respuesta de saneamiento básico de poblaciones de bajos recursos económicos, son sistemas poco flexibles, que requieren de mayor definición y control de los parámetros de diseño, en especial del caudal, mantenimiento intensivo y, en gran medida, de la cultura en la comunidad que acepte y controle el sistema dentro de las limitaciones que éste pueda tener (CONAGUA, Libro 21. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Sistemas Alternativos de Alcantarillado Sanitario, 2019). En la Tabla 6 se describen los diferentes tipos existentes, así como sus principios, componentes y las condiciones en que se recomiendan.

En las Figuras 7-9 se muestran ejemplos de los tipos de alcantarillados indicados en la Tabla 6: Redes de alcantarillado sin arrastre de sólidos (RASAS), Sistema de alcantarillado por presión (SAP) y Sistema de alcantarillado por vacío (SAV), respectivamente.

Tabla 6. Tipos de alcantarillados sanitarios no convencionales

Tipo de alcantarillado	Principio	Componentes	Adecuado para las siguientes condiciones
Redes de alcantarillado sin arrastre de sólidos (RASAS)	<p>Conducen el agua residual por gravedad desde un tanque séptico hasta el sitio para su tratamiento o a un cárcamo de bombeo para su desalajo a otra red de alcantarillado o a una planta de tratamiento.</p> <p>La mayoría de los sólidos del agua residual son removidos por el tanque séptico, lo cual reduce el potencial de obstrucción del sistema.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Conexión domiciliaria Tanque séptico • Red de alcantarillado • Registros de limpieza e inspección o caja de visita 	<ul style="list-style-type: none"> • Terrenos con nivel freático alto • Áreas inundables • Terrenos con irregularidades de magnitud moderada • Desarrollos urbanos en el área rural • Zonas de baja densidad poblacional • Infraestructuras como puertos, aeropuertos, estaciones de ferrocarril • Zonas con obstáculos (cruce de ríos, canales, etc.)
Sistema de alcantarillado por presión (SAP)	<p>Utiliza la fuerza suministrada por bombas que conducen las aguas residuales desde cárcamos ubicados en cada vivienda hasta el sitio para su tratamiento por medio de una red de tuberías. Debido a su funcionamiento por presión se pueden ajustar a la topografía del terreno, lo que reduce los volúmenes en excavación.</p>	<p>Existen dos tipos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bomba demolidora constituidos por un tanque o cárcamo contenedor y una bomba con alabes demolidores • Alcantarillado por presión a paso constituido por un tanque séptico, unidad de pretratamiento y cámara de la bomba 	<ul style="list-style-type: none"> • Terrenos con nivel freático alto • Áreas inundables • Terrenos rocosos, arenosos, pantanosos, inestables o material de relleno • Terrenos con pendiente negativa • Sistemas ecológicos sensibles • Zonas con obstáculos
Sistema de alcantarillado por vacío (SAV)	<p>Las aguas residuales de una o más viviendas fluyen por gravedad por medio de un albañal hasta una cámara colectora, la cual está provista de una válvula de vacío, cuando la cámara colectora llega a almacenar un cierto volumen, la válvula se abre y mediante presión diferencial impulsa el contenido hacía la red, la cual cuenta con bombas de vacío que mantienen un nivel constante de presión en todo el sistema.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Red de alcantarillado por gravedad • Cámara colectora • Red de alcantarillado por vacío • Estación de vacío 	<ul style="list-style-type: none"> • Terrenos con nivel freático alto, rocosos, arenosos, pantanosos, inestables o con material de relleno • Áreas inundables • Sistemas ecológicos sensibles • Infraestructuras como puertos, aeropuertos, estaciones de ferrocarril • Zonas con obstáculos

Elaboración propia con información de (CONAGUA, 2019)

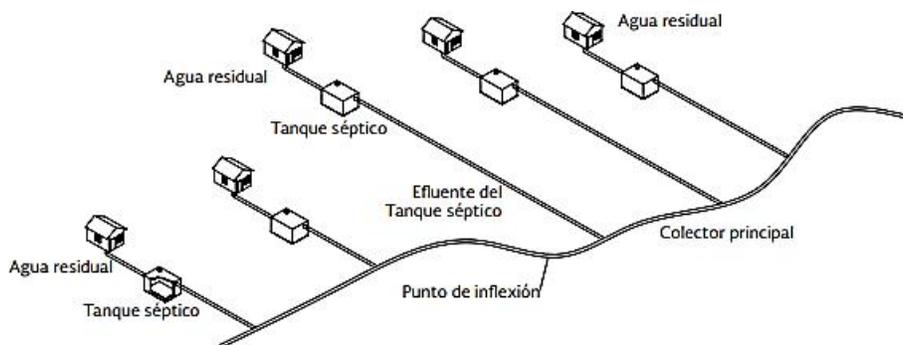


Figura 7. Diseño clásico de un sistema de alcantarillado de pequeño diámetro por gravedad
Tomado de (CONAGUA, Libro 21. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Sistemas Alternativos de Alcantarillado Sanitario, 2019)

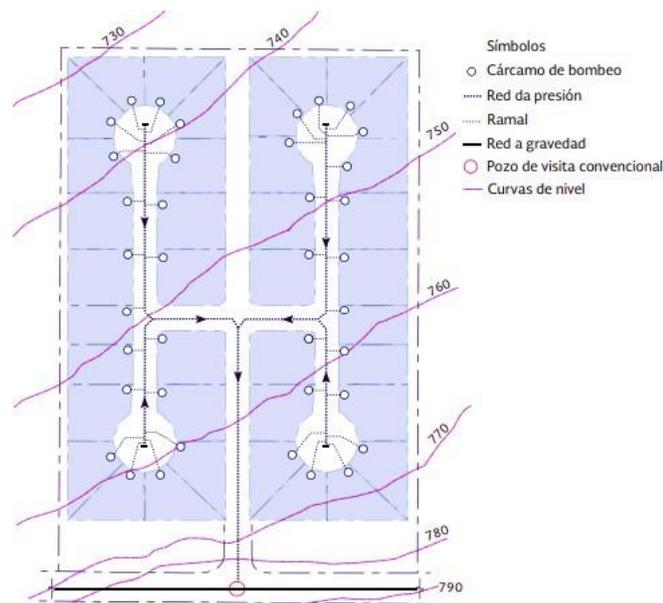


Figura 8. Arreglo general de un sistema de alcantarillado por presión
 Tomado de (CONAGUA, Libro 21. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento:
 Sistemas Alternativos de Alcantarillado Sanitario, 2019)



Figura 9. Diseño clásico de un sistema de alcantarillado por vacío
 Tomado de (CONAGUA, Libro 21. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento:
 Sistemas Alternativos de Alcantarillado Sanitario, 2019)

2.5 Sistemas sanitarios no alcantarillados

Los sistemas centralizados de tratamiento y recolección de agua residual son costosos para construir y operar, especialmente en áreas con una densidad de población baja y dispersa, por lo que se deben considerar estrategias y tecnologías alternativas como las descentralizadas. Además, se debe tener en cuenta la reutilización y aprovechamiento de los subproductos generados como el lodo y el agua residual. Para decidir cuándo es necesario aplicar estos sistemas

descentralizados se debe considerar la definición de los conceptos de estrategias y tecnologías centralizadas, descentralizadas y sustentables (CONAGUA, 2019). Los sistemas descentralizados incluyen tecnologías con las cuales el agua residual es manejada, recolectada, tratada y dispuesta o reusada en o cerca del punto de generación, es decir, son sistemas de manejo *in situ*. Estos sistemas eran los más comunes hasta que los centralizados se volvieron populares a finales del siglo XIX. Las letrinas y fosas sépticas eran usadas en el exterior de las casas habitación o en instalaciones públicas. En Europa y Asia los sistemas secos eran más comunes y los residuos tenían un uso potencial en la agricultura (CONAGUA, Libro 31. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos, 2019).

Los sistemas descentralizados se diseñan para diferentes escalas: casas habitación, condominios, vecindarios, edificios públicos, áreas comerciales, parques industriales, pequeñas porciones de grandes comunidades, desarrollos ecoturísticos y algunas zonas periurbanas que no cuenten con programas de saneamiento.

Las tecnologías descentralizadas son de un costo relativamente bajo, por lo que pueden ser construidas y operadas por las propias comunidades, además de que permiten reducir los problemas de salud relacionados con el agua residual.

Las tecnologías descentralizadas más comunes son tanques sépticos, letrinas, baños composteros y letrinas húmedas (CONAGUA, Libro 31. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos, 2019). A continuación, se describirán algunas de estas tecnologías:

- Lagunas de estabilización. En México son el proceso de tratamiento más utilizado, de acuerdo con los datos del inventario nacional de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (CONAGUA, 2013) con 732 sistemas de lagunas, lo cual representa el 31.2 % del total de plantas instaladas para el tratamiento de aguas residuales (CONAGUA, 2019).

Los sistemas lagunares tienen tres objetivos básicos: a) remoción de la materia orgánica de las aguas residuales, b) remoción de nutrientes: nitrógeno y fósforo, y c) eliminación de microorganismos patógenos (Martínez, Cansino, & Ortiz., 2017).

La profundidad de las lagunas usadas para el tratamiento de aguas residuales es variable y se clasifican teniendo en cuenta los niveles de concentración del oxígeno disuelto y la fuente de suministro para la asimilación bacteriana de compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales, (aerobias, anaerobias, facultativas y aireadas con mezcla parcial) (Cervantes, 2009).

También pueden clasificarse respecto a su arreglo (en serie o paralelo), con base al contenido de oxígeno, si reciben el agua residual sin tratamiento previo, se conocen como lagunas de descarga directa o primarias, pero si tienen un tratamiento previo se conocen como lagunas secundarias, con respecto al tipo de operación se consideran como intermitentes o de flujo continuo (CONAGUA, Libro 31. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos, 2019).

Pueden tratar una diversa variedad de aguas residuales como lo son las aguas municipales, aguas residuales de procesos agroindustriales o vertederos industriales fácilmente biodegradables (CONAGUA, Libro 21. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Sistemas Alternativos de Alcantarillado Sanitario, 2019).

Los pasos para el diseño del sistema de tratamiento mediante lagunas de estabilización son: conocer la normatividad de carácter obligatorio, proyecciones de la población a futuro, calidad de agua y tipo de agua residual que se suministra, caudal del afluente y diseño del tren de tratamiento (Martínez, Cansino, & Ortiz., 2017).

Un diagrama que ejemplifica el diseño de una laguna de estabilización se muestra en la Figura 10.

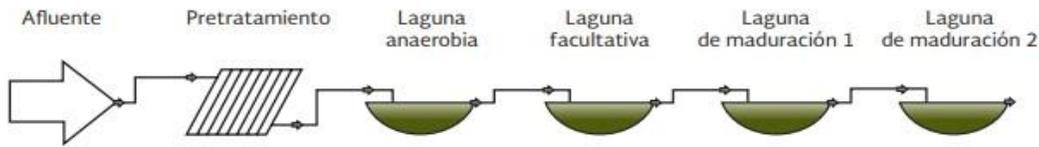


Figura 10. Diagrama de flujo del proceso a diseñar
 Tomado de (CONAGUA Libro 21. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Sistemas Alternativos de Alcantarillado Sanitario, 2019)

- Humedales. Requieren para su funcionamiento energía solar proveniente de la fotosíntesis de las plantas, lo que reduce considerablemente los costos de operación y permite el incremento de manera importante de la factibilidad de su uso en zonas rurales, zonas periurbanas, en desarrollos ecoturísticos, así como para unidades familiares (CONAGUA, Libro 31. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos, 2019).

El proceso de depuración en estos sistemas utiliza conceptos hidráulicos, microbiológicos o biológicos para simular y controlar los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los humedales naturales. Su diseño se basa principalmente en el uso de plantas macrófitas emergentes, flotantes o sumergidas dispuestas en lagunas, canales o zanjas a una profundidad inferior a 1 m, el sustrato (suelo, tierra o grava) constituye un material de soporte para el crecimiento de las plantas y la formación de biopelículas (Vidal & etal.).

El agua residual fluye a través del estanque, donde los contaminantes son transformados en gases, minerales y biomasa bacteriana y macrófitas. También se reduce hasta un 99 por ciento la población de patógenos, e inclusive el cien por ciento de huevos de helmintos (CONAGUA, Libro 31. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos, 2019).

Los principales procesos biológicos desarrollados en un humedal son: nitrificación, desnitrificación, metanogénesis y sulfato reducción (Vidal & etal.).

La información requerida para el diseño de los humedales es la siguiente:

- Existencia o no de aguas residuales industriales
- Disponibilidad de terreno
- Tipo de suelo (arcilloso, arenoso, entre otros.) del sitio donde se construirá el humedal
- Accesibilidad del área donde se planea construir el humedal
- Porcentaje y edad del sistema de alcantarillado
- Distancia del sitio de descarga al sitio asignado para el humedal y tipo de suelo por donde se conducirán las aguas residuales (rocoso, arenoso, arcillosos)
- Existencia de un tratamiento previo (ejemplo: tanque séptico, rejillas)
- Tipos de macrófitas de la región que puedan aprovecharse en los humedales (ejemplo: tule, carrizo, entre otros)
- Disponibilidad y costos de tezontle o de grava (CONAGUA, 2019)

Algunos ejemplos de humedales se muestran en la Figura 11.

- Biofiltración sobre materiales filtrantes orgánicos. El proceso de biofiltración está basado en el principio de un filtro rociador. No se trata de un reactor inundado, sino de uno empacado con un medio que sirve de soporte a una biopelícula, en el cual el agua residual se alimenta (rocía) por la parte superior y ésta escurre por gravedad hacia el fondo filtrándose en su camino hacia la salida. Los contaminantes disueltos presentes en el agua residual son retenidos por procesos de adsorción, absorción e intercambio iónico sobre la superficie de los materiales orgánicos filtrantes (CONAGUA, Libro 31. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas rurales,

periurbanas y desarrollos ecoturísticos, 2019). Los filtros que utilizan materiales orgánicos como empaque (p.e. turba, paja, pasto, madera, fibras vegetales, etc.) son conocidos como biofiltros sobre materiales o lecho orgánico (CONAGUA, Libro 21. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Sistemas Alternativos de Alcantarillado Sanitario, 2019)



*Figura 11. Diferentes humedales artificiales de tipo familiar
Tomado de (CONAGUA, Libro 31. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos, 2019)*

La biofiltración sobre lecho orgánico se basa en la capacidad de ciertos materiales orgánicos de actuar como una resina natural, que fija las sustancias contaminantes por mecanismos fisicoquímicos y favoreciendo la implantación de microorganismos capaces de degradar contaminantes (Mazari, 2012).

La biofiltración es un sistema de tratamiento *in situ*, el cual se caracteriza por aplicar una tasa de filtración muy lenta de agua residual sobre un lecho orgánico, el cual dura cinco años aproximadamente, y puede ser reutilizado como composta para suelos agrícolas (CONAGUA, 2019). La Figura 12 muestra el principio del proceso de biofiltración.

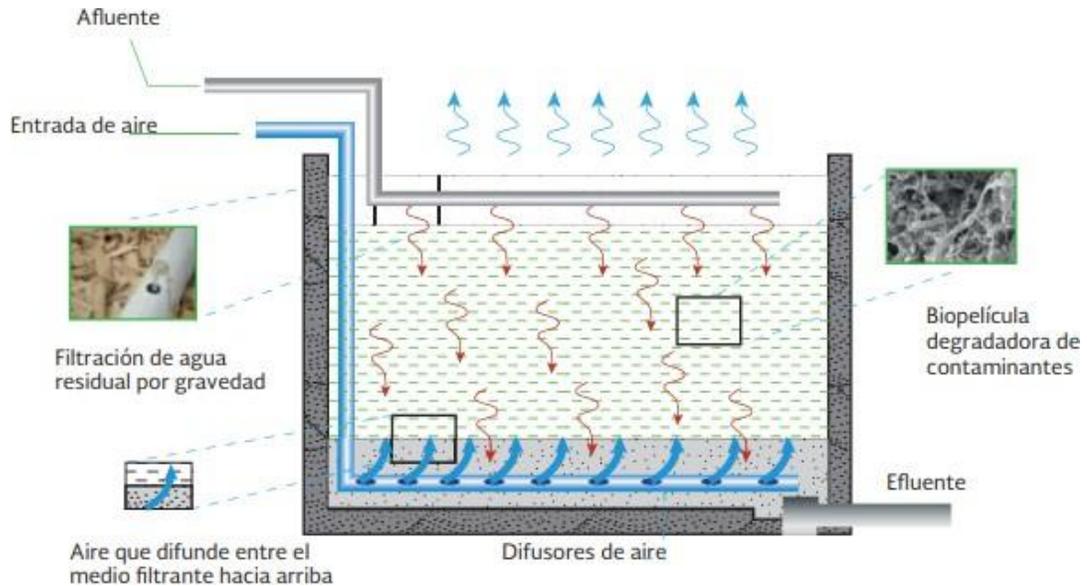


Figura 12. Proceso de biofiltración sobre materiales orgánicos.
 Tomada de (Garzón et al., 2005) (CONAGUA, Libro 31. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos, 2019)

- Los elementos constitutivos de los sistemas de biofiltración son: reactor, cama y el medio filtrante. Los biofiltros con material de empaque orgánico deben estar colocados en un tren de tratamiento para asegurar la remoción de todos los contaminantes. La selección dependerá de las características del efluente a tratar (CONAGUA, Libro 21. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Sistemas Alternativos de Alcantarillado Sanitario, 2019).

El biofiltro se compone de tres capas: en el fondo, una capa de grava gruesa seguida de una capa del material de soporte y, finalmente en la parte superior, una capa de trozos de madera. La capa de grava retiene la cama orgánica, y la capa de trozos de madera ayuda a distribuir homogéneamente el influente sobre la superficie de la cama orgánica (Cervantes, 2009).

Dependiendo de las restricciones que debe cumplir la descarga, el efluente del biofiltro deberá o no pasar por un sistema de desinfección. Si el agua residual tratada se quiere reutilizar en riego de áreas verdes o en usos urbanos con contacto directo, es preferente instalar una unidad de desinfección (cloración, radiación UV, entre otros) y disposición final, descarga al medio ambiente o reúso (CONAGUA, Libro 31. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos, 2019).

- Biodigestores anaerobios. En comunidades rurales se han utilizado biodigestores para el manejo de los residuos tanto humanos como animales. Un biodigestor, en su forma más sencilla, es un tanque cerrado, hermético e impermeable, comúnmente llamado reactor, dentro del cual se deposita el material orgánico a tratar (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales-no cítricos, entre otros), está conformado por el tanque hermético y un depósito de almacenamiento para el biogás, generado en la degradación de la materia orgánica (CONAGUA, 2019).

De manera general un biodigestor consta de una cámara donde se ingresa la materia para ser degradada y una campana donde se colecta el biogás producido por las bacterias que podrá ser conducido a través de un sistema de tuberías para lograr su máximo aprovechamiento (García, 2014), un ejemplo de esquema se muestra en la Figura 13.

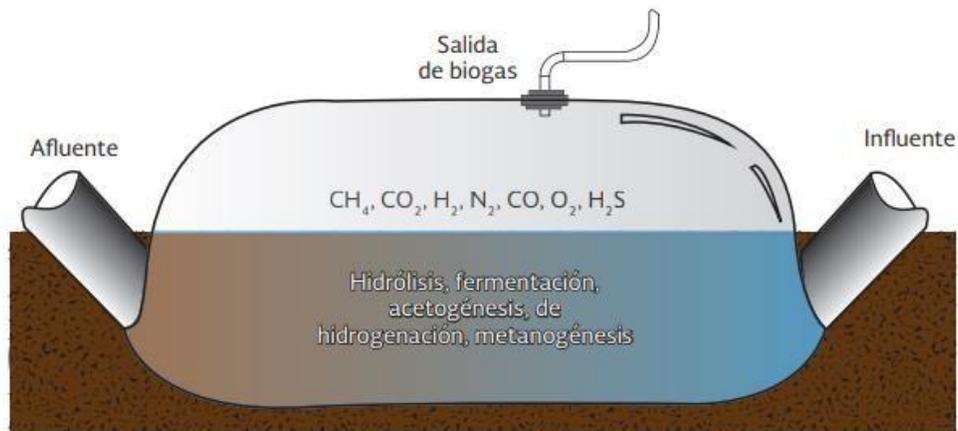


Figura 13. Esquema de un biodigestor

Tomado de (CONAGUA Libro 31. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos, 2019)

El proceso se lleva a cabo en ausencia de aire, oxígeno y nitratos; así mismo, la degradación de los compuestos complejos (proteínas, carbohidratos, grasas) hasta la generación de biogás, lodos y un efluente tratado (CONAGUA, 2019).

La digestión anaerobia es un proceso complejo debido a las reacciones bioquímicas que tienen lugar en ella y la diversidad de microorganismos que se involucran en el proceso. El proceso puede ser dividido en 4 fases o etapas de descomposición de la materia orgánica que son: Hidrólisis, Etapa fermentativa o acidogénica, Etapa acetogénica, Etapa metanogénica (García, 2014).

Se clasifican en tres tipos de reactores según su apariencia física: Plantas de globo, Plantas de domo fijo y Plantas de tambor flotante (Corona, 2007) y según su operación: Biodigestores de flujo estacionario, Biodigestores de flujo semicontinuo y Biodigestores de flujo continuo (CONAGUA, Libro 31. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos, 2019).

- Fosas sépticas. Son estructuras sencillas para el tratamiento primario de las aguas residuales de una vivienda, conjuntos habitacionales, escuelas, comercios, hospitales y servicios sanitarios de algunas industrias ubicados en zonas urbanas o rurales, con abastecimiento de agua domiciliario, pero carencia de alcantarillado, el efluente se descarga al subsuelo mediante un sistema de absorción (González, 2003).

La fosa séptica es un recipiente estanco e impermeable destinada a la recepción de aguas residuales provenientes de los inodoros, lavabos, etcétera, y transformación de las mismas en compuestos minerales inodoros e inofensivos mediante una decantación y solubilización por acción de bacterias anaerobias; Está compuesta por dos cámaras integradas dentro de la fosa, en la primera cámara se produce la decantación y la sedimentación, así como el descenso de la velocidad de la entrada de las aguas residuales, la segunda cámara proporciona la

sedimentación secundaria de gestión, descomposición y almacenamiento de los hongos producidos en el anterior cámara (SEMARNAT, 2002).

Los sólidos sedimentables se van acumulando en el fondo del tanque formando los lodos sépticos o anaerobios, donde una fracción se transforma en gases, reduciendo la cantidad de lodo acumulado. Los lodos deben permanecer en el fondo dos o tres años para que se lleve a cabo la degradación completa, donde las bacterias facultativas o anaerobias degradan la materia orgánica tal como proteínas, carbohidratos y grasas de los lodos, convirtiéndolas en compuestos y sustancias más estables, como nitritos y nitratos, metano, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y otras sustancias que generan olores (González, 2003).

Existen tres tipos principales de fosas sépticas para el tratamiento de aguas negras en sistemas individuales (Rivera, 2009): 1. Fosass sépticas de concreto, son las más comunes. 2. Fosass de Resinas de poliéster reforzados de fibra de vidrio, usan con mayor frecuencia ya que son fáciles de llevar a los lugares "de acceso difícil", por ser livianas. 3. Fosass plásticas o de polietileno, se venden en muchos tamaños y figuras diferentes, son livianas, de una sola unidad y pueden llevarse a los lugares de acceso difícil.

Los sistemas sépticos están constituidos básicamente de tres partes: 1) trampa de grasas, 2) fosa séptica y 3) campo de oxidación e infiltración o pozo de absorción (González, 2003). En la Figura 14 se muestra un esquema de los componentes de una fosa séptica.

- Sistemas de depuración. Son un conjunto de módulos compuesto por un tratamiento primario, es decir, son las operaciones de separación física, destinadas a la remoción de contaminantes como sólidos suspendidos totales (SST), sólidos sedimentables, grasas y aceites (SEMARNAT, 2022).

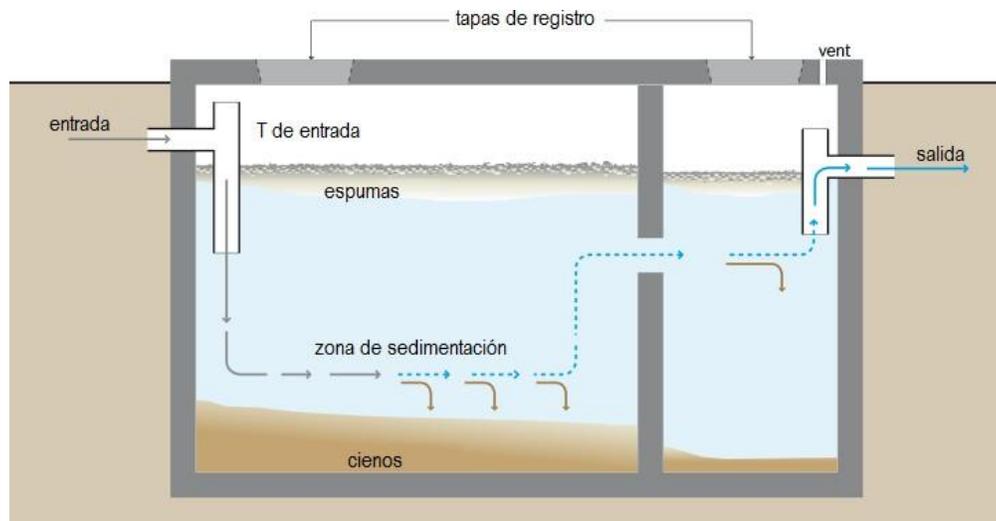


Figura 14. Esquema de una fosa séptica
Tomado de (Tilley, 2017)

Se ubica previo al tratamiento biológico, un tratamiento secundario que consiste en la remoción, estabilización o conversión biológica de compuestos orgánicos disueltos y coloidales y de manera opcional se complementa con un filtro de percolación que realizan la remoción de contaminantes en las aguas residuales domésticas. Se clasifican en dos tipos y a su vez por tipo de material de fabricación (SEMARNAT, 2022), Tabla 7.

Elementos que constituyen los sistemas de depuración según recomendaciones de (SEMARNAT, 2022):

- Tanque séptico. Puede ser un módulo de tratamiento primario o un producto independiente, el cual inicia la depuración de las aguas residuales domésticas, que al proporcionar un tiempo de permanencia adecuado (tiempo de retención) es capaz de separar parcialmente los sólidos suspendidos, digerir una fracción de la materia orgánica presente y retener temporalmente los lodos, natas y espumas generadas. Puede incluir un tratamiento secundario con el fin de alcanzar las eficiencias mínimas de depuración.

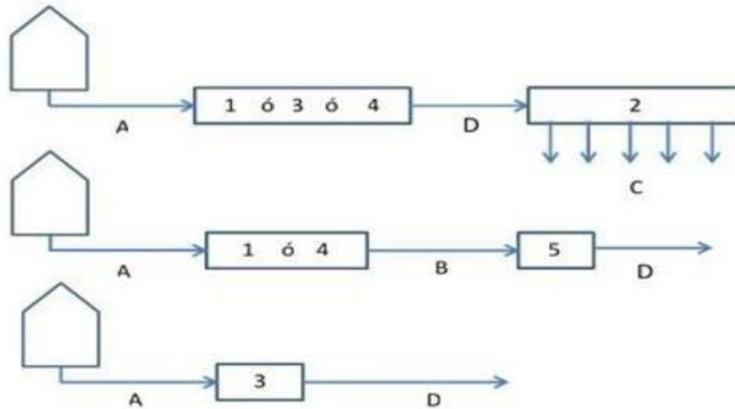
Tabla 7. Clasificación de los sistemas de depuración

Clasificación	Características	Material de fabricación
Sistemas de depuración prefabricado	<p>Sistema que sale de fábrica como producto terminado y listo para su instalación, se puede ensamblar en sitio o en la fábrica.</p> <p>Podrá estar integrado como un solo producto que contenga un tratamiento primario, un tratamiento secundario y en ocasiones de manera opcional se podrá colocar un filtro de percolación. El sistema se evalúa como un solo producto terminado.</p> <p>O bien por módulos separados que se podrán integrar en sitio, los módulos independientes pueden ser un tratamiento primario, un tratamiento secundario y en ocasiones de manera opcional incluye el filtro de percolación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Concreto; • Acero; • Cloruro de polivinilo no plastificado (PVC-U); • Polietileno (PE); • Polipropileno (PP); • Poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV).
Sistemas de depuración construida en sitio	<p>Un solo producto que contenga el tratamiento primario, el secundario y en ocasiones de manera opcional el filtro de percolación. El sistema se evalúa como un solo producto terminado.</p> <p>O bien por módulos separados que se podrán construir a medida que se vaya requiriendo, éstos pueden ser; el tratamiento primario, el tratamiento secundario y en ocasiones de manera opcional incluye el filtro de percolación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Concreto; • Acero.

Elaboración propia con información de (SEMARNAT, 2022)

- Filtro de percolación. Módulo opcional de tratamiento secundario, producto que consta de un lecho filtrante sobre el cual se rocían las aguas residuales pretratadas, donde los microorganismos se apegan al medio del lecho y forman una capa biológica sobre éste. A medida que las aguas negras se percolan por el medio, los microorganismos digieren y eliminan los contaminantes del agua, el líquido resultante es claro, incoloro y brillante, es estable y no contiene sólidos sedimentables salvo en períodos muy distanciados, en que puede aparecer una pequeña cantidad. El filtro de percolación se evalúa en conjunto con el tanque séptico o la unidad depuradora.
- Unidad depuradora de aguas residuales. Módulo de tratamiento secundario, producto que depura los efluentes procedentes de un tanque séptico hasta una calidad declarada. La unidad depuradora se evalúa de manera independiente o con el filtro de percolación.

En la Figura 15 se muestran las alternativas que recomienda SEMARNAT para la instalación de un sistema de depuración.



En donde:

- | | |
|---|---|
| <p>A Agua residual doméstica.</p> <p>B Agua residual pre tratada (mínimo SST 50% y DBO5 35%).</p> <p>C Infiltración en el terreno.</p> <p>D Salida de agua residual depurada (mínimo SST 80% y DBO5 88%).</p> | <p>1 Tanque séptico prefabricado (puede o no puede incluir tratamiento secundario).</p> <p>2 Filtración de efluentes pre tratados, observar Apéndice B.
Sistema de depuración de aguas residuales domésticas prefabricado o construido en sitio (tratamiento primario y tratamiento secundario con o sin filtro de percolación).</p> <p>3 Tanque séptico construido en sitio (puede o no puede incluir tratamiento secundario).</p> <p>4 Unidad depuradora (tratamiento secundario) o Filtro de percolación (tratamiento secundario).</p> |
|---|---|

Figura 15. Alternativas para la instalación de un sistema de depuración
Tomado de (SEMARNAT, 2022)

2.6 Marco normativo en materia de agua y aguas residuales

La preocupación por las descargas de aguas residuales y los efectos que traen al medio ambiente ha dado lugar a la promulgación de leyes como la (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente) publicada el 28 de enero de 1988 y la (Ley de Aguas Nacionales) publicada el 1 de diciembre de 1992, que establecen “la necesidad de prevenir y controlar la contaminación del agua y proteger los recursos hídricos” ...

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de agua, establecen los límites máximos permisibles de contaminantes para descargas de aguas residuales, con el fin de evitar riesgos a la población, a los animales y al medioambiente. La Tabla 8 muestra las NOM que son primordiales en la revisión de calidad del agua.

El cumplimiento de las NOM en ocasiones está referenciado a otras NOM o a estándares mexicanos (NMX), a los que la Secretaría de Economía define como

“son referencia para determinar la calidad de los productos y servicios de que se trate, particularmente para la protección y orientación de los consumidores”. Para garantizar la calidad de las aguas residuales los estándares mexicanos (NMX) especifican cuales son los límites permisibles, así como la metodología para determinarlos. En el caso de las aguas provenientes de los sistemas de saneamiento no alcantarillado especificadas y referenciadas del *PROY-NOM-006-CONAGUA-2022*, se muestran en la Tabla 9.

Tabla 8. Normatividad Mexicana

Norma
NOM-001-SEMARNAT-2021. Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación
NOM-002-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal
NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público
NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. - Lodos y biosólidos. -Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final

Elaboración propia con información de (SEMARNAT, CONAGUA) (SEGOB, s.f.) (SEGOB, s.f.)

Tabla 9. Referencias de Normas Mexicanas para la determinación de calidad y límites máximos en aguas residuales

Norma
NMX-AA-008-SCFI-2016. Análisis De Agua. - Medición Del pH En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas. - Método De Prueba- (Cancela A La NMX-AA-008-SCFI-2011)
NMX-AA-012-SCFI-2001. Análisis De Agua - Determinación De Oxígeno Disuelto En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas - Método De Prueba (Cancela A La NMX-AA-012-1980)
NMX-AA-026-SCFI-2010. Análisis De Agua - Medición De Nitrógeno Total Kjeldahl En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas - Método De Prueba - (Cancela A La NMX-AA-026-SCFI-2001)
NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis De Agua - Determinación De La Demanda Bioquímica De Oxígeno En Aguas Naturales, Residuales (DBO ₅) Y Residuales Tratadas - Método De Prueba (Cancela A La NMX-AA-028-1981)
NMX-AA-029-SCFI-2001. Análisis De Aguas - Determinación De Fósforo Total En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas - Método De Prueba (Cancela A La NMX-AA029-1981)
NMX-AA-030/1-SCFI-2012. Análisis De Agua - Medición De La Demanda Química De Oxígeno En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas. - Método De Prueba - Parte 1 - Método De Reflujo Abierto - (Cancela A La NMX-AA-030-SCFI-2001)
NMX-AA-030/2-SCFI-2011. Análisis De Agua - Determinación De La Demanda Química De Oxígeno En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas - Método De Prueba - Parte 2 - Determinación Del Índice De La Demanda Química De Oxígeno - Método De Tubo Sellado A Pequeña Escala.
NMX-AA-034-SCFI-2015- Análisis De Agua - Medición De Sólidos Y Sales Disueltas En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas - Método De Prueba (Cancela A La NMX-AA-034-SCFI-2001)
NMX-AA-042-SCFI-2015. Análisis De Agua - Enumeración De Organismos Coliformes Totales, Organismos Coliformes Fecales (Termotolerantes) Y Escherichia Coli -Método Del Número Más Probable En Tubos Múltiples (Cancela A La NMX-AA-42-1987)
NMX-AA-079-SCFI-2001. Análisis De Aguas - Determinación De Nitratos En Aguas Naturales, Potables, Residuales Y Residuales Tratadas - Método De Prueba (Cancela A La NMX-AA-079-1986)
NMX-AA-099-SCFI-2021. Análisis de Agua - Medición de Nitrógeno de Nitritos en Aguas Naturales, Residuales, Residuales Tratadas y Marinas - Método de Prueba (Cancela a la NMX-AA-099-SCFI-2006)

II. Metodología

En la sección anterior se enlistaron los estándares remitidos para los límites máximos permisibles en las aguas residuales, en esta sección se revisaron a profundidad las siguientes NMX:

Norma	Método
NMX-AA-008-SCFI-2016	Método Kjeldahl
NMX-AA-026-SCFI-2010	Método Electrométrico
NMX-AA-028-SCFI-2001	Método Yodométrico
NMX-AA-034-SCFI-2015	Método Gravimétrico
NMX-AA-042-SCFI-2015	Método Número más probable
NMX-AA-079-SCFI-2001	Método de reducción con cadmio cuperizado

3. Evaluación técnica de la clasificación de los efluentes

La estrategia seguida para alcanzar los objetivos de la tesis se efectuaron las siguientes actividades.

3.1 Análisis de las metodologías analíticas indicadas en PROY-NOM-006-CONAGUA-2022

- A. Recuperar el estándar al que remite el proyecto de norma.
- B. Analizar la metodología en los siguientes rubros:
 - Analito: reconocimiento y definición del componente de interés
 - Importancia de la determinación: brindar los indicadores en la calidad de las aguas en presencia del analito
 - Regulación aplicable, incluyendo límites permisibles: valores máximos referidos a nivel nacional
 - Principio del método: fundamento analítico de la medición del analito
 - Procedimiento experimental: secuencias experimentales para la medición y cuantificación del analito
 - Control de calidad: operaciones de rutina dentro de la secuencia experimental con el fin de reducir la frecuencia y la magnitud de los errores
 - Interferencias: compuestos que pueden causar desviaciones que pueden ser significativas causando un error sistemático

- Residuos generados: disposición final de las muestras y contenedores de éstas
- Conocimientos de química analítica involucrados: conocimientos prácticos y metodológicos necesarios y requeridos

3.2 Identificación de los conocimientos teóricos y prácticos de Química Analítica involucrados

Los conocimientos teóricos son los referidos a aspectos de la realidad con el fin de comprenderlos, estudiarlos, poder aplicar metodologías, procedimientos, protocolos, etc. Los conocimientos en la química analítica son referidos a los métodos y las técnicas analíticas empleadas para proporcionar la información de los analitos, resolver y abordar problemas reales, por ejemplo, los equilibrios químicos, la estequiometría, la volumetría, etc.

Por otro lado, los conocimientos prácticos son los orientados a la acción y aplicación de los conocimientos teóricos, la mayoría de las veces son utilizados para modelar la conducta real de los conocimientos teóricos, éstos suelen ser aprendidos por repetición o imitación, en la química analítica estos conocimientos son un pilar fundamental en el éxito del proceso analítico, pues les dan la rigidez y sustento a las metodologías experimentales. La mayoría son conocimientos previos que son refinados con la repetición en las mediciones analíticas. Algunos ejemplos son; las buenas prácticas de laboratorio, la ejecución de protocolos experimentales, evaluación de los riesgos de seguridad en laboratorio, el manejo adecuado de datos y resultados, la interpretación adecuada de los resultados.

III. Análisis de las metodologías analíticas

PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-006-CONAGUA-2022, además de describir las especificaciones que un sistema de depuración de aguas residuales domésticas debe cumplir, señala los parámetros físicos, químicos y biológicos esenciales:

- Coliformes totales y fecales (NMX-AA-042-SCFI-2015)
- Demanda bioquímica de oxígeno total (DBO₅) (NMX-AA-028-SCFI-2001)
- Nitrógeno total Kjeldahl (NMX-AA-026-SCFI-2010)
- Sólidos suspendidos totales (SST) (NMX-AA-034-SCFI-2015)

Adicionalmente en caso de requerirse también se pueden medir los siguientes parámetros:

- Temperatura del agua;
- Consumo total de energía del producto, si es aplicable;
- Caudal hidráulico diario;
- pH (NMX-AA-008-SCFI-2016);
- Conductividad (NMX-AA-093-SCFI-2000);
- Fósforo total (NMX-AA-029-SCFI-2001);
- Concentración de oxígeno disuelto (NMX-AA-012-SCFI-2001), y
- Demanda química de oxígeno (DQO) (NMX-AA-030/1-SCFI-2012 y NMX-AA-030/2-SCFI-2011);
- Nitratos (NMX-AA-079- SCFI-2001);
- Nitritos (NMX-AA-099- SCFI-2021).

En los apartados, se hace una revisión de los métodos analíticos de los parámetros físicos, químicos y biológicos esenciales, es decir, Coliformes totales y fecales, Demanda bioquímica de oxígeno total, Nitrógeno total Kjeldahl, Solidos suspendidos totales, así como de pH y de nitratos.

4. Nitrógeno Total Kjeldahl (NT)

La determinación de nitrógeno total se efectúa por el método Kjeldahl de acuerdo con la NMX-AA-026-SCFI-2010. Análisis de agua - medición de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba -(cancela a la NMX-AA-026-SCFI-2001).

A. Analito. La NMX-AA-026-SCFI-2010 define al nitrógeno total "...como la suma del nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico, los cuales son convertidos a sulfato de amonio $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$, bajo las condiciones de digestión descritas en este método".

B. Importancia. Debido a que el nitrógeno es un nutriente esencial para organismos fotosintéticos, es importante el monitoreo y control de descargas de éste al ambiente (Secretaría de Economía, 2010). La determinación del contenido de nitrógeno es un indicativo de la calidad del agua, por medio de la cuantificación de su concentración es posible establecer la necesidad de sistemas de tratamientos para su depuración y así lograr su reducción o eliminación, si las descargas contienen una alta concentración ocasiona el crecimiento acelerado de las especies, que al morir se descomponen cubriendo gran parte de la superficie, y por ende hay mayor consumo de oxígeno disuelto, originando malos olores y disminuyendo así la calidad del agua, por lo que se va deteriorando el ecosistema (Velasquez, Steemit, 2023).

C. Regulación. La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 "Que Establece Los Límites Máximos Permisibles De Contaminantes En Las Descargas De Aguas Residuales En Aguas O Bienes Nacionales", señala los límites permisibles de Nitrógeno total mostrado en la Tabla 10.

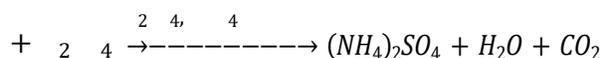
Tabla 10. Límites Permisibles de nitrógeno total

Límites permisibles	Agua									Suelo								
	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico*		
	P. M	P. D	V. I	P. M	P. D	V. I	P. M	P. D	V. I	P. M	P. D	V. I	P. M	P. D	V. I	P. M	P. D	V. I
Nitrógeno Total	25	30	35	15	25	30	25	30	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	15	25	30

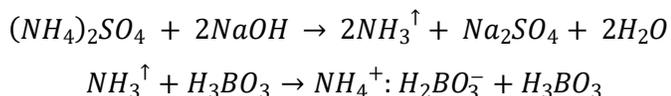
Elaboración propia con información de la Tabla 1 de la NOM-001-SEMARNAT-2021. N.A: No Aplica, P.M: Promedio Mensual, P.D: Promedio Diario, V.I: Valor Instantáneo. *NOTA: la norma en la Tabla 1 los indica las unidades en mg/L.

D. Principio del método analítico. El método Kjeldahl está basado en la volumetría ácido base, en esencia se destruye la materia orgánica con ácido sulfúrico concentrado, en presencia de un agente reductor con acción de calor para favorecer la descomposición, seguido de una destilación y titulación del nitrógeno proveniente de la muestra. Las tres etapas del método son (Secretaría de Economía, 2010):

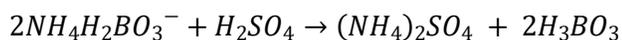
1. Digestión. El nitrógeno orgánico se convierte en NH_4^+ . La combinación de calor y medio ácido descomponen la muestra para liberar al nitrógeno:



2. Destilación. A través de la destilación se separa el nitrógeno de esta mezcla de digestión. Para ello se añade hidróxido de sodio (NaOH), lo cual en una reacción ácido-base transforma el amonio (NH_4^+) en amoníaco ($NH_3\uparrow$), que puede separarse por destilación, junto con vapor de agua, el destilado se colecta en una disolución indicadora de ácido bórico (H_3BO_3 , rojo de metilo y azul de metileno), para atrapar el nitrógeno y retransformar el amoníaco a su forma soluble: amonio, ahora ya separado de los demás componentes presentes en la muestra original. Cuando se trata de la determinación de nitrógeno total se añade también tiosulfato de sodio que es un reductor moderado.



3. Cuantificación. En esta última etapa del método, se hace uso nuevamente de los equilibrios ácido-base para poder determinar la cantidad de nitrógeno total presente en la muestra. Se titula con ácido sulfúrico al destilado colectado



El método Kjeldahl cuantifica el nitrógeno en su estado de valencia -3; a excepción de cuando se encuentra en grupos funcionales: nitrato, nitrito, nitrilo, nitro, nitroso, azida, azina, azo, hidrazina, oxima y semi-carbazona (Secretaría de Economía, 2010).

E. Procedimiento experimental. La cantidad de muestra necesaria para la determinación está en función de la concentración de nitrógeno total presente en la muestra, Tabla 11.

Tabla 11. Volumen de muestra necesaria de acuerdo con la concentración de nitrógeno total presente en la muestra

Concentración de nitrógeno en la muestra (mg/L)	Volumen de muestra necesario (mL)
0-1	500
1-10	250
10-20	100
20-50	50
50- 100	25

Tomada de (Secretaría de Economía, 2010)

En la Figuras 16 y 17 se muestra la secuencia experimental para la determinación de nitrógeno total de acuerdo con la NMX-AA-026-SCFI-2010.

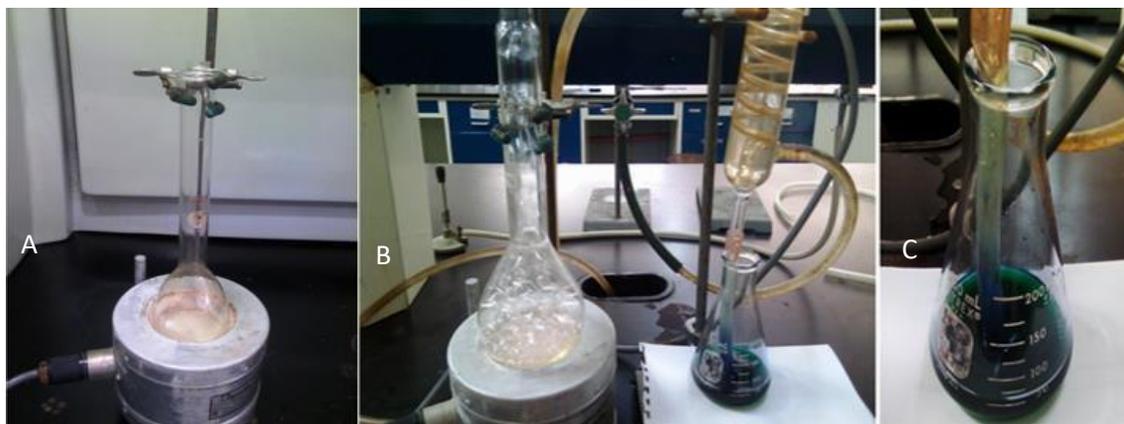


Figura 16. Ejemplo experimental de una muestra de agua residual: A) Digestión, B) Destilación y C) Valoración

Tomado de (Velasquez, Steemit, 2023)

Método Kjeldahl para Nitrógeno Total

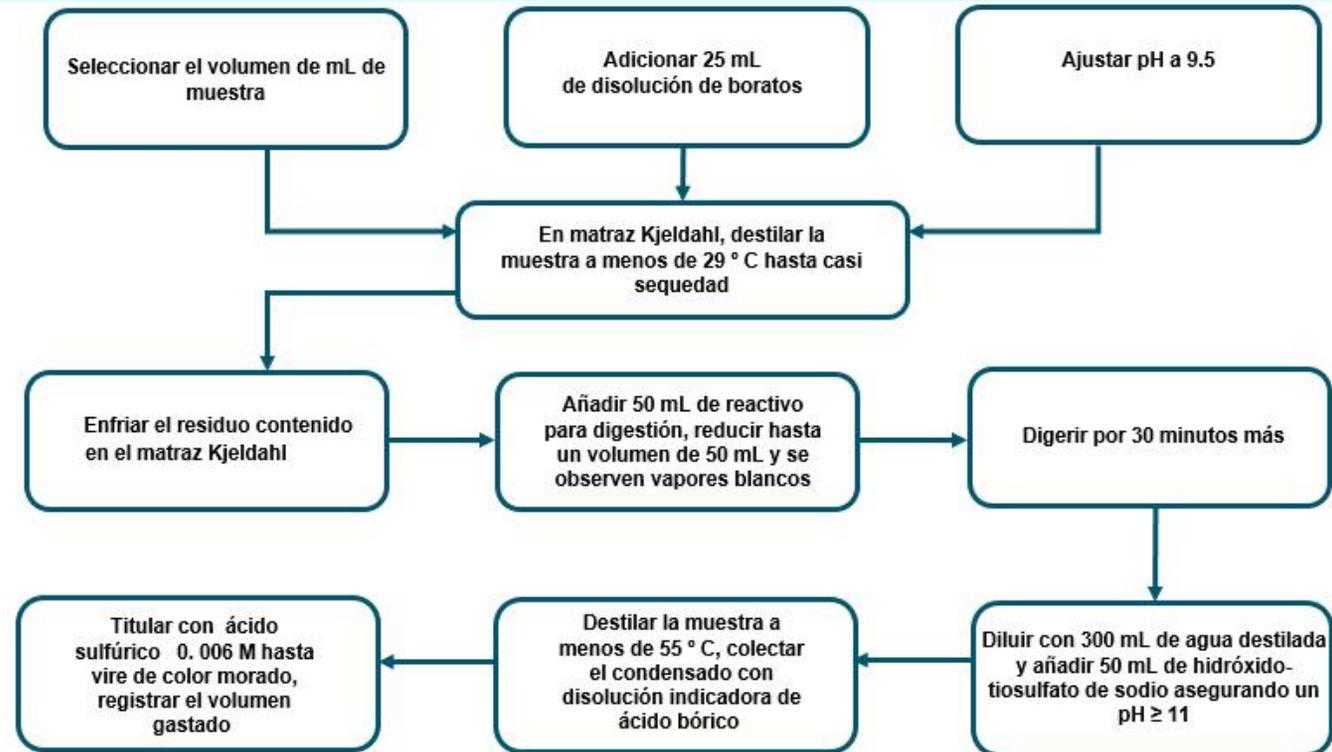


Figura 17. Diagrama experimental de método Kjeldahl
Elaboración propia con información de la NMX-AA-026-SCFI-2010

F. Control de calidad. La norma indica el uso de un blanco, y una disolución de control de referencia: una mezcla de N-NH₃+N-Org.

G. Interferencias. En el apartado 12 de la NMX-AA-026-SCFI-2010 señala algunas interferencias y da opciones para su eliminación o minimización.

Interferencias indicadas: nitratos, sales o sólidos en gran cantidad, materia orgánica, reactivos con trazas de amonio, cloro residual.

H. Residuos generados. Un estimado de residuos para un volumen de muestra de 25 mL es de aproximadamente menor a los 500 mL de mezcla de sulfatos y boratos. El manejo de residuos para el sulfato de amonio es: no se deben desechar al drenaje, se colectan para confinamiento y posterior envío a planta de tratamiento (ANASAC, 2017). El tratamiento de residuos para el ácido bórico: el sobrante y las disoluciones no aprovechables deben enviarse a una compañía de vertidos acreditada. Disolver o mezclar el producto con un disolvente combustible y quemarlo en un incinerador apto para productos químicos provisto de postquemador y lavador. Los envases contaminados deben ser eliminados como producto no usado (Sigma-Aldrich, 2013).

I. Conocimientos de química analítica involucrados. Control de calidad, equilibrios ácido-base, equilibrios óxido-reducción, estadística aplicada a química analítica, estequiometría, términos químicos, materiales de referencia, volumetría. Este punto se discutirá a detalle en el apartado 10.

5. Demanda Bioquímica de Oxígeno Total (DBO₅)

La determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno total se efectúa como lo describe la NMX-AA-028-SCFI-2001 Análisis de agua - Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas - Método de prueba (Cancela A la NMX-AA-028-1981), misma que remite a la NMX-AA-012-SCFI (vigente) para la determinación del oxígeno disuelto (OD), en la que se describe dos métodos: el electrométrico y el yodométrico (Método de Winkler), a continuación se describe este último:

A. Analito. La NMX-AA-028-SCFI-2001 define a la DBO_5 como "... una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días".

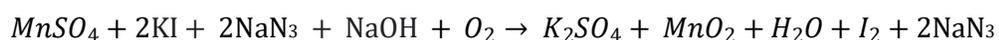
B. Importancia. La DBO_5 es un indicador de la cantidad de materia orgánica presente en el agua y se usa para la determinación de la contaminación biológica del agua, midiendo los requerimientos de oxígeno demandados por una población de microorganismos, tanto en agua tratada como en agua contaminada. También se usa para determinar la eficiencia de un proceso de tratamiento de aguas y para dimensionar las instalaciones para el tratamiento de éstas (Del Ángel, 1994). Su incremento provoca la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua, creando condiciones de "anoxia" que dañan a las comunidades biológicas de los ecosistemas acuáticos (SEMARNAT, 2014).

C. Regulación. Actualmente no existe una regulación activa que especifique los valores máximos permisibles, pues fue uno de los parámetros que desapareció con las modificaciones a la Norma Oficial NOM-001-SEMARNAT-2021, con base en los resultados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RNMCA), se ha identificado que al medir la calidad del agua de los cuerpos receptores con los parámetros habitualmente utilizados, como es la DBO_5 , hay un subregistro del nivel de contaminación del agua, ya que la prueba no es capaz de detectar contaminantes orgánicos no biodegradables ni tóxicos presentes en los cuerpos de agua, provenientes de descargas como los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, por lo que es necesaria la utilización de parámetros Demanda Química de Oxígeno (DQO), toxicidad y color que tienen mayor capacidad de detección de contaminantes y por lo mismo ofrecen mejores resultados para tipificar la contaminación del agua con el objeto de controlarla y reducirla.

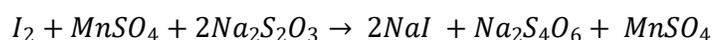
D. Principio del método analítico. Se emplea el método Yodométrico (el método Winkler) modificado con la adición de azida de sodio, para la determinación de Oxígeno Disuelto (OD), es una volumetría óxido-reducción,

en esencia la oxidación ocurre por la presencia del oxígeno disuelto en un medio oxidante como lo es el sulfato manganoso, en presencia de un agente alcalino fuerte, seguido de una titulación donde con el cambio de color refiere al punto de equivalencia del Oxígeno.

1. Como primer paso se fija el oxígeno, por medio de la reacción con sulfato manganoso y un agente alcalino fuerte (yoduro-azida, KI+ NaN₃ + NaOH) el precipitado color marrón es indicador de la oxidación del manganeso.



2. A continuación, se adicionan 2 mL de ácido sulfúrico concentrado, en presencia de iones yoduro y medio ácido el manganeso oxidado revierte al estado divalente, y ocurre la liberación de yodo en cantidad equivalente al contenido original de Oxígeno Disuelto (OD).
3. Se valora, el yodo con una disolución patrón de tiosulfato de sodio 0.025 M, adicionar almidón hasta el final de la valoración, cuando se alcance un color amarillo pálido, continuar hasta la primera desaparición del color azul, el punto final de la titulación se puede detectar visualmente con un indicador de almidón o con técnicas automáticas.



E. Procedimiento experimental. En las Figuras 18 y 19 se muestra la secuencia experimental para la determinación de nitrógeno total de acuerdo con la NMX-AA-028-SCFI-2001.

F. Control de calidad. La norma NMX-AA-012-SCFI en el apartado 8 señala la calibración del equipo si se utiliza el método electrométrico, la NMX-AA-028-SCFI-2001 indica el uso de un blanco, y una disolución de control de referencia: una mezcla de glucosa-ácido glutámico, las cuales son indicadores de la calidad del agua de dilución, si la disminución del oxígeno excede de 0.2 mg/L, las condiciones para la inhibición de nitritos, en tanto la disolución control comprueba la efectividad del inóculo y la técnica analítica.

Metodología para determinación de DBO₅

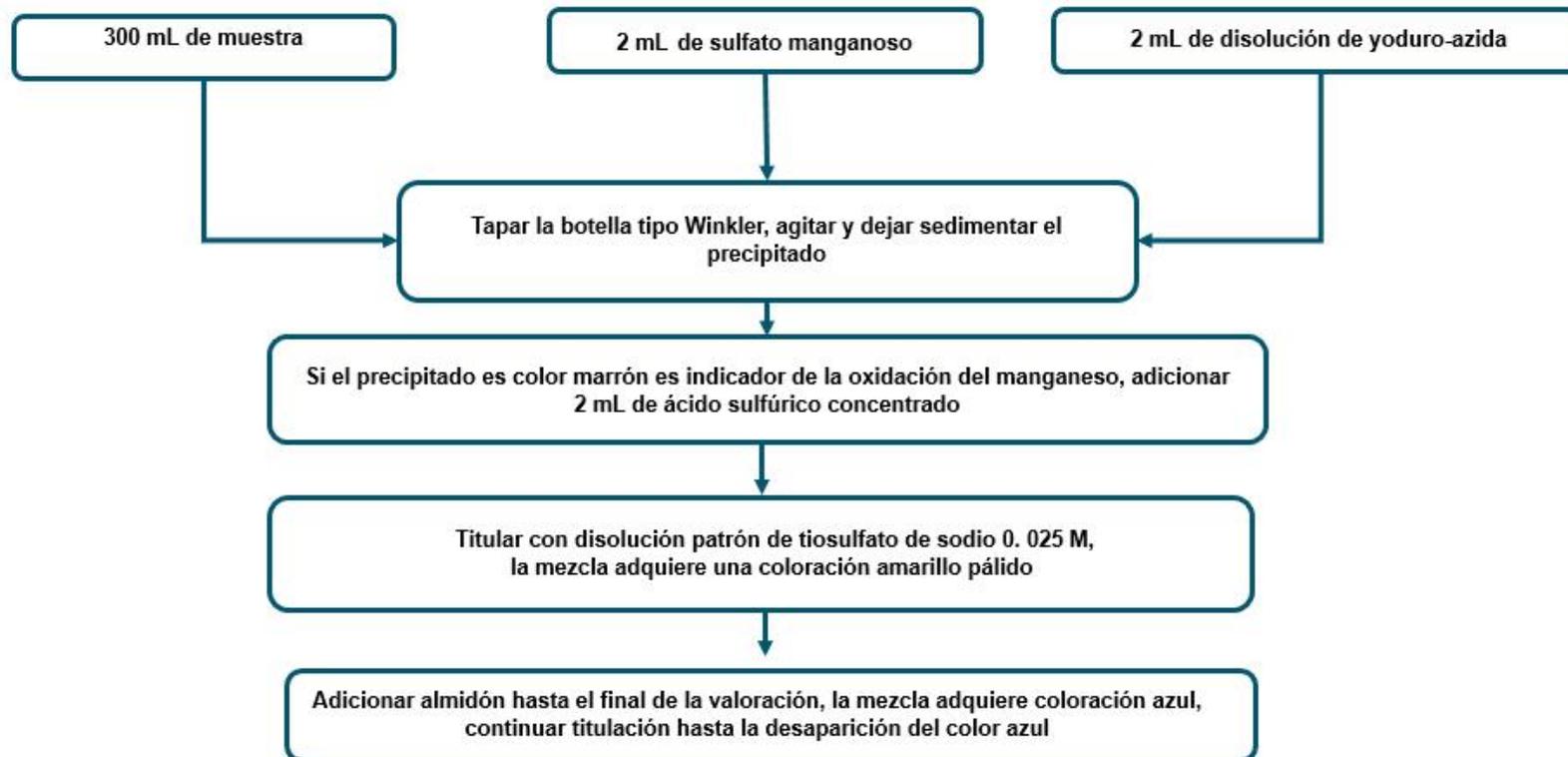


Figura 18. Diagrama Experimental para determinación de DBO₅
Elaboración propia con información de NMX-AA-028-SCFI-2001.



Figura 19. Secuencia experimental para determinación de DBO_5
Tomado de (Sites Google, 2012).

G. Interferencias. La norma NMX-AA-012-SCFI en el apartado 11 señala que las interferencias que pueden presentarse son introducción de burbujas de aire en la muestra y presencia de sustancias oxidantes o reductoras, la NMX-AA-028-SCFI-2001 en el apartado 12 señala algunas interferencias y da opciones para su eliminación o minimización. Interferencias indicadas: pH ácido o alcalino, cloro residual, nitritos siendo la más común de las interferencias, sustancias inorgánicas y orgánicas reductoras.

H. Residuos generados. Un estimado de residuos varía según el volumen de la muestra, sin embargo, es aproximadamente menor a los 500 mL, mezcla de yoduro de sodio, sulfato de manganeso, tetrionato de sodio. El manejo de residuos para el yoduro de sodio (NaI): Elimínense el producto y su recipiente como residuos peligrosos. Eliminar de acuerdo con la normativa local, regional, nacional o internacional. No tirar los residuos por el desagüe, solamente pueden usarse envases que han sido aprobados para su almacenamiento. Evítense su liberación al medio ambiente (ROTH, 2022). Para el tetrionato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_4\text{O}_6$): Para la eliminación de este producto, dirigirse a un servicio profesional autorizado. Ofertar el sobrante y las disoluciones no aprovechables a una compañía de vertidos acreditada, los

envases contaminados deben de eliminarse como producto no usado (Sigma-Aldrich, 2023). Para el sulfato de manganeso ($MnSO_4$): Elimínense el producto y su recipiente como residuos peligrosos. Eliminar el contenido o el recipiente de conformidad con la normativa local, regional, nacional o internacional. No tirar los residuos por el desagüe. Evítese su liberación al medio ambiente (ROTH, 2021).

I. Conocimientos de química analítica involucrados. Control de calidad, equilibrios óxido – reducción, estadística aplicada a química analítica, estequiometría, términos químicos, material de referencia, volumetría. Este punto se discutirá a detalle en el apartado 10.

6. Sólidos Suspendidos Totales (SST)

La determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST) se efectúa por el método Gravimétrico de acuerdo con la NMX-AA-034-SCFI-2015 Análisis de agua - Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (Cancela A La NMX-AA-034-SCFI-2001).

A. Analito. La NMX-AA-028-SCFI-2001 define a los SST como "... el material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por un filtro de fibra de vidrio con poro de $1.5 \mu m$ secado y llevado a masa constante a una temperatura de $105 \pm 2 \text{ }^\circ C$ ".

B. Importancia. El análisis de los SST es importante para el control de procesos de tratamientos físicos y biológicos de aguas residuales y para asegurar el cumplimiento de las normas legales vigentes (Londoño Carvajal, 2010). El incremento en los niveles de SST en los cuerpos de agua provoca su turbidez y reduce la penetración de la luz solar, impidiendo el desarrollo de la vegetación acuática y afectando al resto de su biodiversidad (SEMARNAT, 2014). Los sólidos afectan la calidad del agua de diferentes formas: cuando hay una alta concentración de sólidos disueltos generalmente las aguas son de baja potabilidad y pueden inducir reacciones fisiológicas desfavorables en el ser humano. Mientras que la presencia de altos contenidos de minerales es perjudicial para muchas aplicaciones industriales (Londoño Carvajal, 2010).

C. Regulación. La Norma Oficial NOM-001-SEMARNAT-2021, señala los límites permisibles en la Tabla 12.

Tabla 12. Límites Permisibles de Sólidos Suspendidos Totales

Límites permisibles	Agua									Suelo								
	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico*		
	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.
Sólidos Suspendidos Totales	60	72	84	20	24	28	20	24	28	30	36	42	100	120	140	20	24	28

Elaboración propia con información de la Tabla 1 de la NOM-001-SEMARNAT-2021. N.A: No Aplica, P.M: Promedio Mensual, P.D: Promedio Diario, V.I: Valor Instantáneo. *NOTA: la norma en la Tabla 1 los indica las unidades en mg/L.

D. Principio del método analítico. El análisis gravimétrico abarca una variedad de técnicas en las que la masa de un producto se utiliza para determinar la cantidad original de analito, es decir de la especie que se analiza. Puesto que la masa puede medirse con gran exactitud, los métodos gravimétricos se cuentan entre los más exactos de la química analítica (Harris, 2007)

Los métodos gravimétricos se determinan con la diferencia de masa existente entre la especie sin ningún tratamiento previo, tratamiento de secado, y el peso constante obtenido después de realizarse el tratamiento, para ello se hace necesaria la utilización de una balanza analítica debidamente calibrada (Jácome Yáñez, 2014).

E. Procedimiento experimental. En las Figuras 20 y 21 se muestra la secuencia experimental para la determinación de sólidos suspendidos totales.

F. Control de calidad. La norma indica el uso de una disolución de control de referencia: una mezcla de cloruro de sodio (NaCl), carbonato de calcio (CaCO₃), celulosa microcristalina (C₆H₁₀O₅)_n, tierra de diatomáceas y caolín o almidón.

Una dilución 1:10 de disolución control funciona como agente de verificación, éste se debe procesar simultáneamente con las muestras; el porcentaje de recuperación de los sólidos de la disolución control debe estar dentro del porcentaje esperado para las muestras.

Método Gravimétrico para SST



Figura 20. Diagrama Experimental para determinación de SST
Elaboración propia con información de NMX-AA-034-SCFI-2001

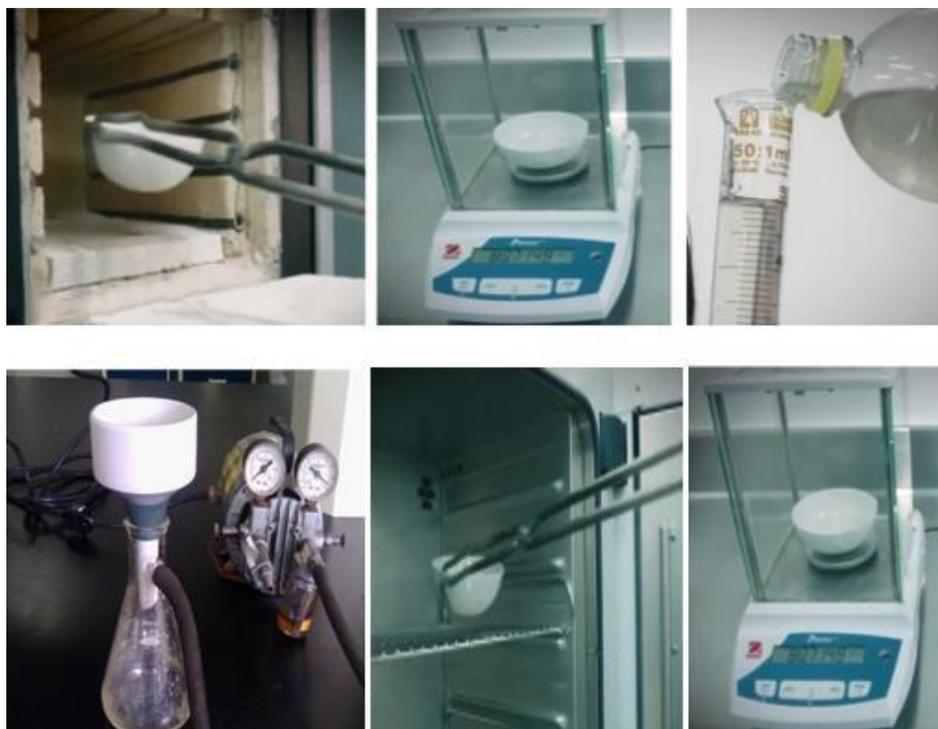


Figura 21. Secuencia experimental para determinación de sólidos suspendidos totales
Tomado de (Velasquez, 2021)

G. Interferencias. La NMX-AA-034-SCFI-2001 en el apartado 11 señala algunas interferencias y da opciones para su eliminación o minimización. Interferencias indicadas: heterogeneidad de la muestra, adherencias, temperatura, alto contenido en grasas o aceites, organismos vivos o materiales viscosos.

Las interferencias pueden verse reducidas mayormente teniendo especial cuidado en la temperatura, haciendo repeticiones en series de tres para reducción de errores estadísticos, realizar las pruebas con una menor cantidad de muestra por mencionar las recomendaciones más comunes y frecuentes.

H. Residuos generados. Los filtros utilizados pueden ser depositados en la basura común del laboratorio.

I. Conocimientos de química analítica involucrados. Control de calidad, estadística aplicada a química analítica, gravimetría, términos químicos, material de referencia. Este punto se discutirá a detalle en el apartado 10.

7. Coliformes Fecales y Totales

La determinación de Coliformes Fecales y Totales se efectúa por el método del Número más probable en tubos múltiples de acuerdo con la NMX-AA-042-SCFI-2015 Análisis de Agua - Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (Termotolerantes) y *Escherichia Coli* –Método del número más probable en tubos múltiples (Cancela A La NMX-AA-42-1987).

A. Analito. La NMX-AA-042-SCFI-2015 define a organismos coliformes totales como "Organismos aerobios o anaerobios facultativos capaces de crecer a 35 ° C en un medio líquido de lactosa, con producción de ácido y gas en un período de 48 h"; a los Organismos coliformes fecales (termotolerantes) como "Organismos coliformes aerobios o anaerobios facultativos capaces de crecer a 35 °C en un medio líquido de lactosa, con producción de ácido y gas fermentativas en un periodo de 24 h a 44.5 ± 0.2 ° C.

A la *Escherichia coli* (E. coli) como "organismos coliformes fecales (termotolerantes) aerobios o anaerobios facultativos capaces de crecer a 35°C en un medio líquido de lactosa, con producción de ácido y gas fermentativas, los cuales además producen indol a partir de triptófano en un lapso de 24 h a 44.5 ± 0.2 ° C".

B. Importancia. La importancia radica en conocer el grado y la presencia de la contaminación fecal, pues es un factor de gran relevancia en la evaluación de la calidad del agua. El análisis de muestras de agua para detectar grupos de bacterias coliformes puede ser utilizada para estimar el grado de contaminación fecal reciente, ya que algunos grupos de bacterias coliformes tiene capacidad ilimitada para sobrevivir en el agua (Secretaría de Economía, 2015).

C. Regulación. La Norma Oficial NOM-001-SEMARNAT-2021, señala los límites permisibles en la Tabla 13.

Tabla 13. Límites Permisibles de Coliformes

Límites permisibles	Agua									Suelo								
	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico*		
	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.
<i>Escherichia coli</i> , (NMP/100 mL)	25 0	50 0	60 0	25 0	50 0	60 0	25 0	50 0	60 0	25 0	50 0	60 0	25 0	50 0	60 0	5 0	10 0	20 0
Enterococos fecales* (NMP/100 mL)	25 0	40 0	50 0	25 0	40 0	50 0	25 0	40 0	50 0	25 0	40 0	50 0	25 0	40 0	50 0	5 0	10 0	20 0

Elaboración propia con información de la Tabla 1 de la NOM-001-SEMARNAT-2021. N.A: No Aplica, P.M: Promedio Mensual, P.D: Promedio Diario, V.I: Valor Instantáneo, NMP: Número más probable.

Principio del método analítico. Se basa en la determinación del número de coliformes presentes en una muestra mediante la siembra de distintos volúmenes del agua problema en series de tubos conteniendo un medio de cultivo líquido lactosado y una posterior resiembra en un medio de cultivo selectivo con incubación a temperaturas adecuadas.

Esta determinación consta de dos fases, la fase presuntiva y la fase confirmativa.

En la fase presuntiva el medio de cultivo que se utiliza es el caldo lauril sulfato de sodio que permite la recuperación de los microorganismos dañados que se encuentren presentes en la muestra y tengan la capacidad de utilizar a la lactosa como fuente de carbono. Durante la fase confirmativa se emplea como medio de cultivo el caldo lactosado bilis verde brillante, el cual es selectivo y sólo permite el desarrollo de aquellos microorganismos capaces de tolerar tanto las sales biliares como el verde brillante. La determinación del número más probable de microorganismos coliformes fecales se realiza a partir de tubos positivos de la prueba presuntiva y se fundamenta en la capacidad de las bacterias para fermentar la lactosa y producir gas cuando son incubados a una temperatura de 44.5 ± 0.1 ° C por un periodo de 24 a 48 horas (Castaño & Bernal , 2015).

D. Procedimiento experimental. En las Figuras 22-24 se muestra la secuencia experimental para las pruebas presuntivas y confirmativas.

Método Número Más Probable Prueba Presuntiva

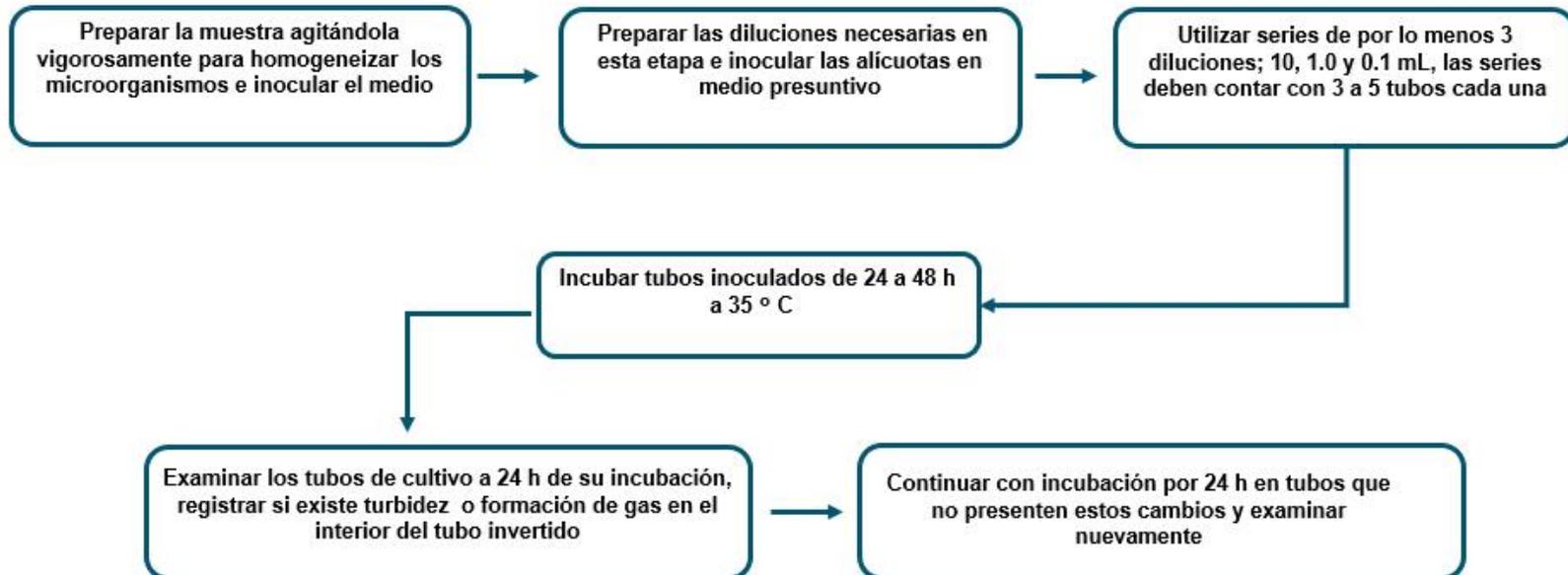


Figura 22. Diagrama Experimental de determinación de coliformes totales y fecales, prueba presuntiva
Elaboración propia con información de NMX-AA-042-SCFI-2015.

Método Número Más Probable Prueba Confirmativa

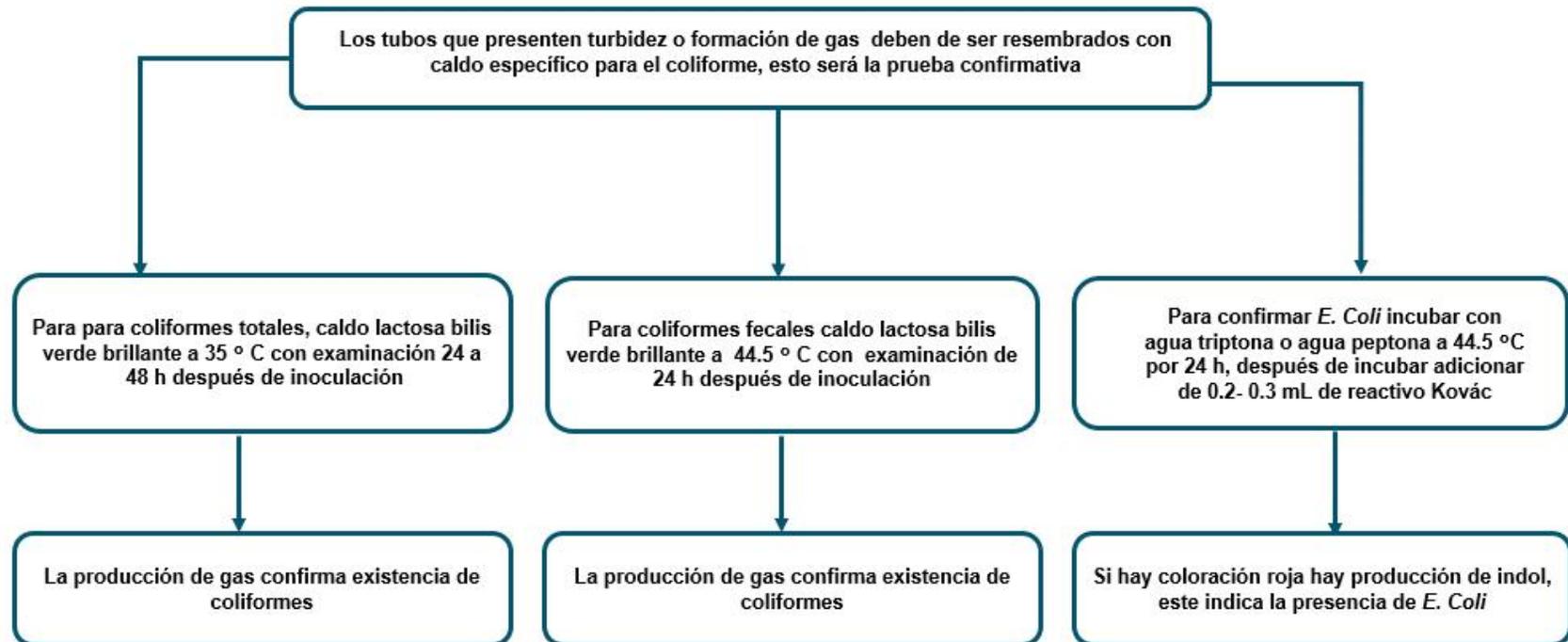


Figura 23. Diagrama Experimental de determinación de coliformes totales y fecales, prueba confirmativa
Elaboración propia con información de NMX-AA-042-SCFI-2015.



Figura 24. Secuencia experimental para determinación de coliformes totales y fecales, pruebas presuntivas y confirmativas
Tomado de (Contreraz, 2017)

E. Control de calidad. La NMX-AA-042-SCFI-2015 indica el uso de una cepa de control de referencia: Para coliformes totales el testigo positivo será *Escherichia coli* y testigo negativo *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis* u otro organismo que sea Gram positivo que no fermente la lactosa. Para coliformes fecales y *E. coli* testigo positivo *Escherichia coli* y testigo negativo *Enterobacter aerogenes*.

F. Residuos generados. Se consideran Residuos peligrosos biológico-infecciosos ya que entran en la siguiente clasificación:

"Utensilios desechables usados para contener, transferir, inocular y mezclar cultivos de agentes biológico-infecciosos (Gavilán, Alcántara, Cano, & Gavilán, 2014)".

Deben de almacenarse en bolsas de polietileno color rojo translúcido de calibre mínimo 200, impermeables y con un contenido de metales pesados de no más de una parte por millón y libres de cloro, además deberán estar

marcadas con el símbolo universal de riesgo biológico y la leyenda Residuos Peligrosos Biológico-Infeciosos.

Las bolsas se llenarán al 80 % (80 por ciento) de su capacidad, cerrándose antes de ser transportadas al sitio de almacenamiento temporal y no podrán ser abiertas o vaciadas.

Las bolsas deben de cumplir con los lineamientos de acuerdo con el Art. 46 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los residuos, donde menciona la identificación, clasificación, manejo, tipo de envase, etiquetado, almacenamiento, tipo de transporte de acuerdo con la normatividad vigente específico para el tipo de residuo. Aplicable a los grandes y pequeños generadores de residuos peligrosos.

G. Conocimientos de química analítica involucrados. Control de calidad, estadística aplicada a química analítica, estequiometría, términos químicos, material de referencia. Este punto se discutirá a detalle en el apartado 10.

8. Nitratos

La determinación de nitratos se efectúa como lo describe la NMX-AA-079-SCFI-2001. Análisis de aguas - Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (Cancela A La NMX-AA-079-1986), en la que se describe dos métodos: Método de sulfato de brucina y Método de reducción con cadmio cuperizado, a continuación, se revisa el último.

A. Analito. La NMX-AA-079-SCFI-2001 define que el nitrato es una de las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas, se presenta generalmente a nivel de trazas en el agua de superficie, pero puede alcanzar niveles elevados en las subterráneas. El nitrato se encuentra sólo en pequeñas cantidades en las aguas residuales domésticas, pero en el diluyente de las plantas de tratamiento biológico desnitrificante, el nitrato puede encontrarse en concentraciones de hasta 30 mg de nitrato como N/L.

B. Importancia. Debido a que el nitrato es un nutriente esencial para muchos autótrofos fotosintéticos y en algunos casos se ha identificado como determinante para el crecimiento de éstos. Una concentración alta de nitratos es indicio de una etapa mayor de mineralización de los compuestos nitrogenados. En las aguas de algunos pozos suele encontrarse cantidades apreciables de nitratos, lo que es objetable desde el punto de vista sanitario (Secretaría de Economía, 2001).

C. Regulación. Actualmente no existe una regulación activa en México que especifique los valores máximos permisibles, debido a que se encuentra generalmente en concentraciones de trazas. Sin embargo, en regulaciones internacionales si se hace una mención de los valores máximos permitidos, por ejemplo, en la Normatividad de República Dominicana.

Tabla 14. Límites Permisibles de nitratos y nitritos

Parámetro	Aguas superficiales			Aguas Costeras		
	Clase A	Clase B	Clase C	Clase E	Clase F	Clase G
NO ₃ -N + NO ₂ -N mg/L	10	10	-	15	20	-

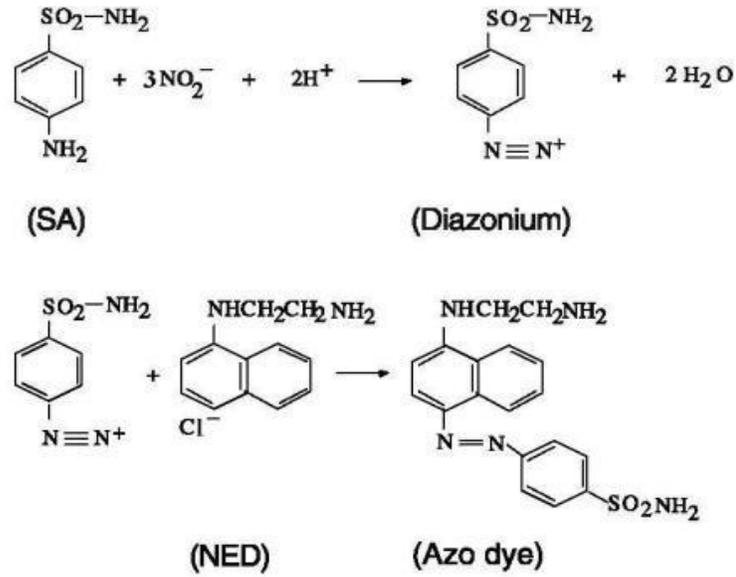
Elaboración propia con información de la Tabla 4.1 de la Norma Sobre Aguas Residuales 2001. (SECRETARÍA DE ESTADO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, SUBSECRETARÍA DE GESTIÓN AMBIENTAL., REPÚBLICA DOMINICANA, 2001).

D. Principio del método analítico. “El nitrato se reduce cuantitativamente a nitrito en presencia de cadmio. Emplea gránulos de cadmio, disponible comercialmente, tratado con sulfato de cobre empacado en columna de vidrio. El nitrito producido se determina entonces por diazotización de la Sulfanilamida acoplada con dihidrocloruro de N-(1-naftil) etilendiamina para formar un azo compuesto altamente colorido que se mide espectrofotométrica o colorimétricamente” (Secretaría de Economía, 2001).



Donde EN se refiere a etilendiamintetracetato

La reacción correspondiente a la formación del azo compuesto, es la siguiente:



Tomado de (Patel, 2016)

E. Procedimiento experimental. En las Figuras 25 y 26 se muestra la secuencia experimental para la determinación de nitratos.



Figura 25. Columna para reducción de nitratos
Tomado de (Wikimedia Commons, 2017).

Método de reducción con cadmio cuperizado Determinación de Nitratos

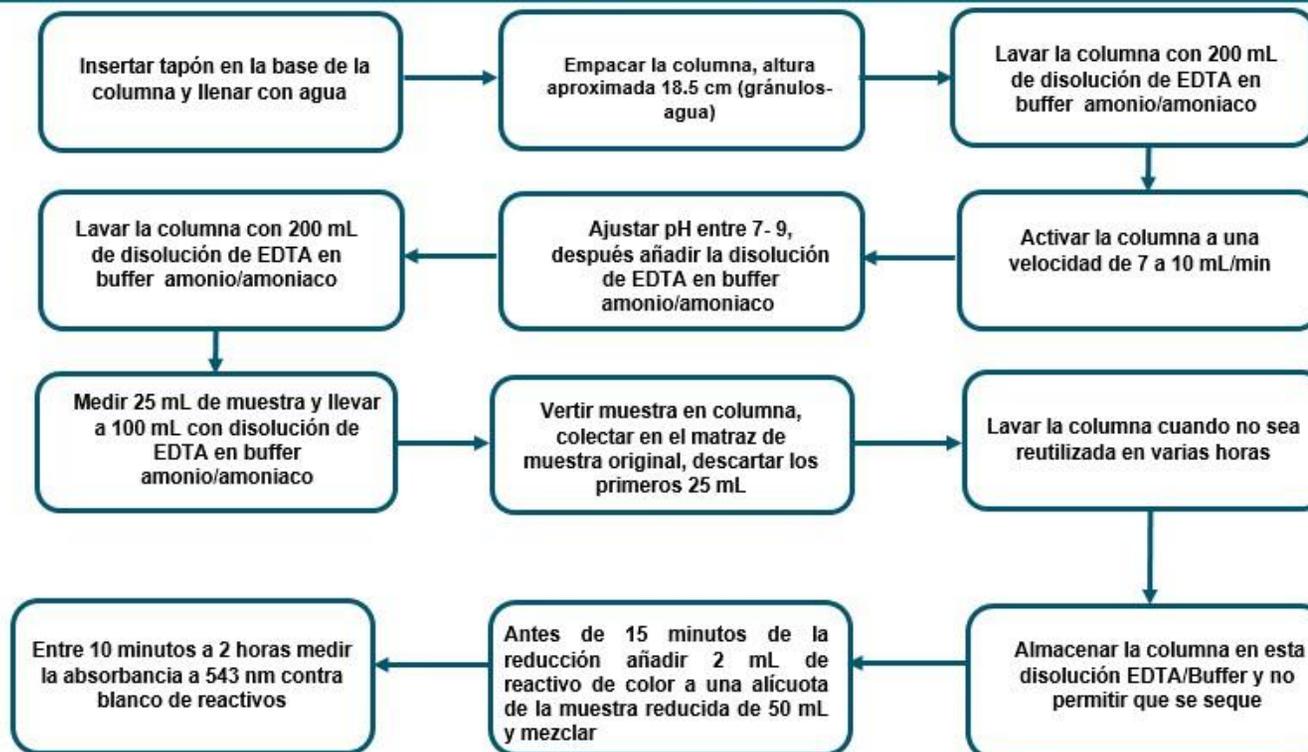


Figura 26. Diagrama Experimental de determinación de nitratos por método de cadmio cuperizado
Elaboración propia con información de NMX-AA-079-SCFI-2001

F. Control de calidad. La NMX-AA-079-SCFI-2001 en su apartado 8 menciona la calibración del equipo, haciendo mención general de la calibración del espectrofotómetro ya que éste debe de seguir las indicaciones que da el fabricante, en el caso del método de reducción con cadmio cuperizado se emplea una disolución estándar intermedia de N-NO_3^- en el intervalo de concentraciones de 0.05 a 1 mg N-NO_3^- /L.

G. Interferencias. La NMX-AA-079-SCFI-2001 en el apartado 11 señala algunas interferencias y da opciones para su eliminación o minimización. Interferencias indicadas: materia suspendida, presencia de metales, presencia de grasas y aceites, presencia de cloro residual, efecto de salinidad, turbidez, presencia de color en la muestra.

H. Residuos generados. Un estimado de residuos para un volumen de muestra de 50 mL es de aproximadamente menor a los 500 mL de mezcla de nitritos EDTA y amonio. El tratamiento de residuos para EDTA: Los restos de productos químicos y materiales peligrosos deberán eliminarse de acuerdo con la legislación o reglamentación local, estatal o nacional vigente. En general, los residuos químicos se pueden eliminar a través de las aguas residuales, por el desagüe u otra alternativa segura, una vez que se acondicionen de forma de ser inocuos para el medioambiente. Los envases contaminados deberán tratarse como el propio producto contenido (Cicarelli laboratorios, 2006).

Amoniaco: neutralización con HCl 6 M controlando la temperatura, la colección debe de hacerse en recipientes de polietileno o recubiertos de él (Facultad de Química, 2015).

Nitrito de sodio: Elimínense el producto y su recipiente como residuos peligrosos. Eliminar el contenido/el recipiente de conformidad con la normativa local, regional, nacional o internacional, No tirar los residuos por el desagüe. Evítense su liberación al medio ambiente. Recábense instrucciones específicas de la ficha de datos de seguridad (ROTH, 2018).

I. Conocimientos de química analítica involucrados. Preparación de disoluciones, cálculos estequiométricos, preparación de alícuotas,

preparación de diluciones, equilibrios ácido-base, equilibrios óxido-reducción, volumetría, espectrofotometría, formación de complejos, tratamiento de residuos, buenas prácticas de laboratorio, control de calidad.

9. Potencial de hidrógeno (pH)

La determinación de pH se efectúa de acuerdo con la NMX-AA-008-SCFI-2016. Análisis De Agua. - Medición Del pH En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas. - Método De Prueba- (Cancela A La NMX-AA-008-SCFI-2011).

A. Analito. Lo define la NMX-AA-008-SCFI-2016 pH como: "El pH se define en términos de la actividad relativa de los iones de hidrógeno en la disolución.

$$pH = -\log a_H = -\log(m_H \gamma_H / m^0)$$

Donde a_H es la actividad relativa del ion hidrógeno (en base molal); γ_H es el coeficiente de actividad molal del ion hidrógeno H^+ a la molalidad m_H , y m^0 es la molalidad estándar. La magnitud pH es considerada como una medida de la actividad de los iones hidrógeno en la disolución".

B. Importancia. La medición del pH del agua es muy importante para muchos tipos de muestra. Los valores altos y bajos de pH son tóxicos para organismos acuáticos, ya sea directa o indirectamente. Es el parámetro más importante utilizado en la evaluación de las propiedades corrosivas de un medio ambiente acuático (Secretaría de Economía, 2011).

En el suministro de aguas es un factor que debe considerarse con respecto a la coagulación química, la desinfección, el ablandamiento y el control de corrosión. En las plantas de tratamiento de aguas residuales que emplean procesos biológicos, el pH debe controlarse dentro de un intervalo favorable a los organismos (Gómez, 1995).

C. Regulación. La Norma Oficial NOM-001-SEMARNAT-2021, señala los límites permisibles en la Tabla 15.

Tabla 15. Límites permisibles de pH

Límites permisibles	Agua									Suelo								
	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico*		
	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.
pH (UpH)	6-9																	

Elaboración propia con información de la Tabla 1 de la NOM-001-SEMARNAT-2021. N.A: No Aplica, P.M: Promedio Mensual, P.D: Promedio Diario, V.I: Valor Instantáneo, UpH: Unidades de pH.

D. Principio del método analítico. El principio básico de la determinación potenciométrica del pH es la medida de la actividad de los iones hidrógeno por mediciones potenciométricas utilizando un electrodo patrón de hidrógeno y otro de referencia. La potenciometría consiste en la medida de la fuerza electromotriz de una celda galvánica, a través de la cual la corriente que pase es virtualmente cero. La variable de interés es la modificación del potencial de un electrodo sencillo o de la semicelda en la que tienen lugar las variaciones de una o de ambos componentes. Como el potencial de un electrodo sencillo no puede medirse directamente, el par de electrodos de la celda consiste en un electrodo de referencia que mantiene un potencial constante y un electrodo indicador, cuyo potencial depende de la composición de la disolución electrolítica (Gómez, 1995).

E. Procedimiento experimental. En las Figuras 27-29 se muestra la secuencia experimental para la determinación de pH.

Metodología para determinación de pH Calibración

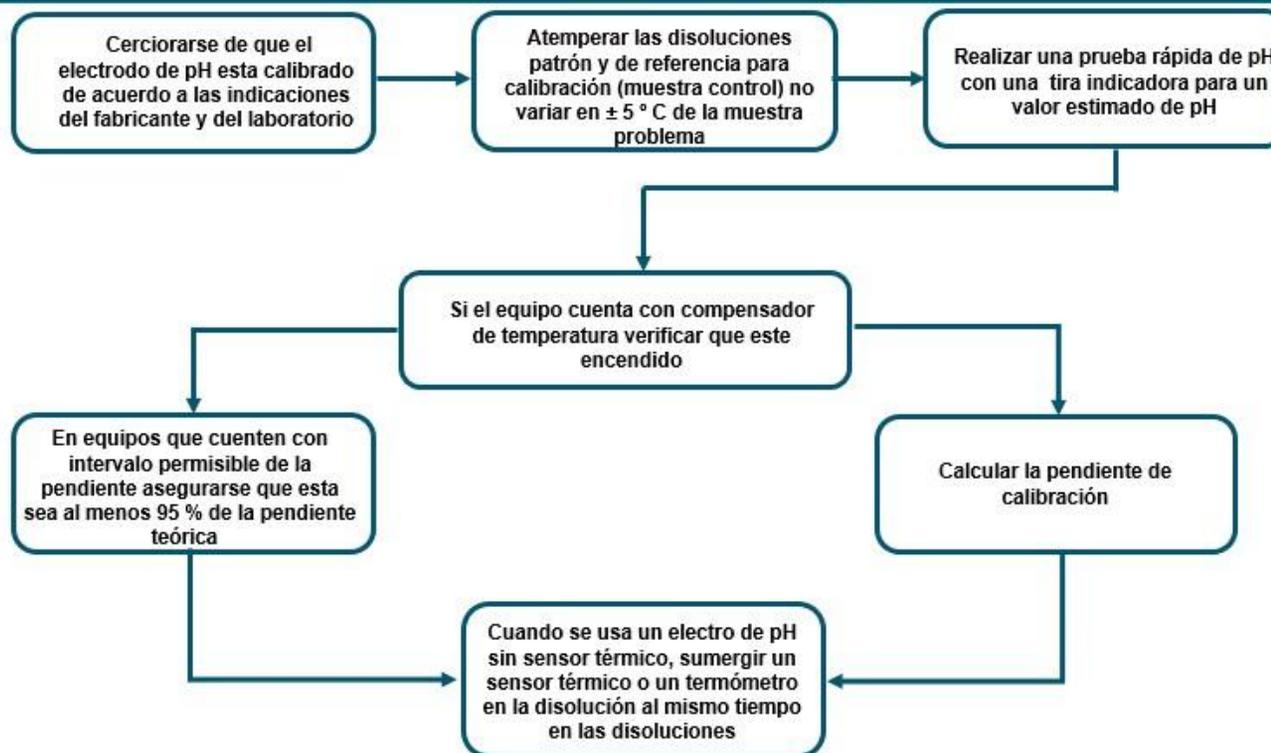


Figura 27. Diagrama Experimental de determinación de pH, calibración
Elaboración propia con información de NMX-AA-008-SCFI-2016.

Metodología para determinación de pH

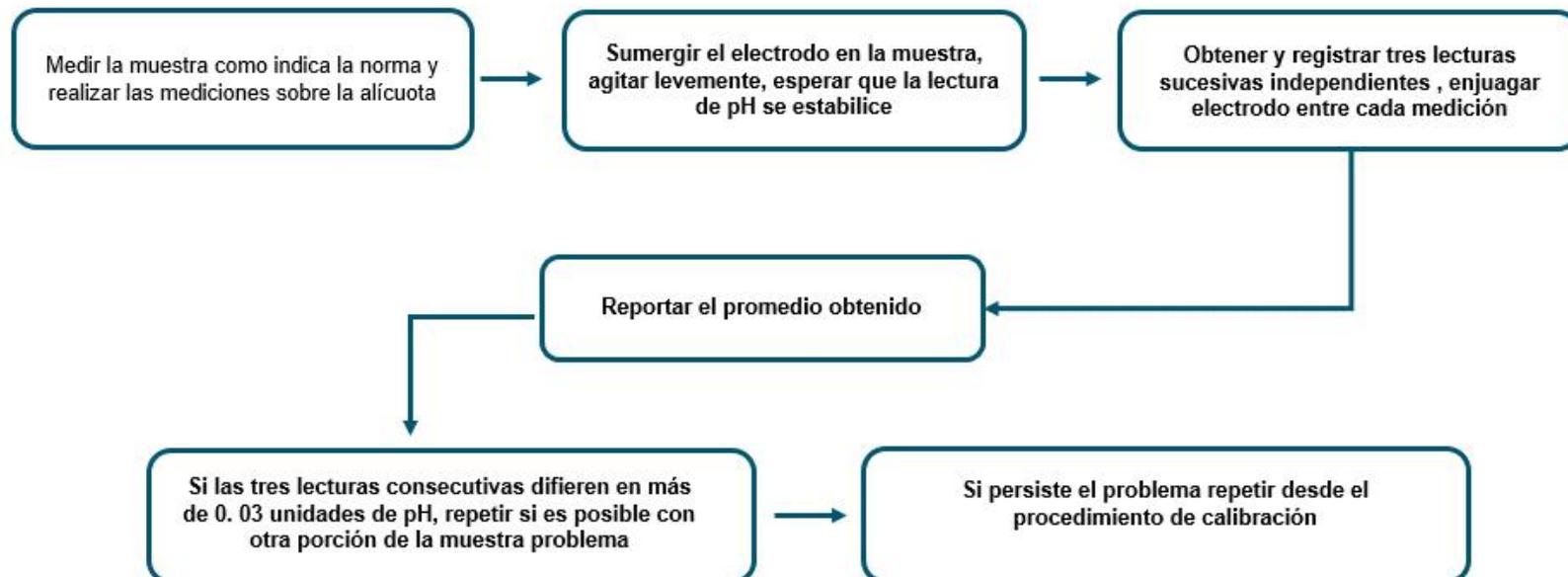


Figura 28. Diagrama Experimental de determinación de pH, muestreo
Elaboración propia con información de NMX-AA-008-SCFI-2016.



Figura 29. Determinación de pH con equipo Schott

Tomado de (SCHOTT INSTRUMENTS, 2023)

- F. Control de calidad.** La NMX-AA-008-SCFI-2016 en el apartado 9 señala la metodología para la calibración de los electrodos, haciendo referencia a la limpieza y disolución patrón de referencia de manera general.
- G. Interferencias.** La NMX-AA-008-SCFI-2016 señala en el apartado 5 algunas interferencias y da opciones para su eliminación o minimización. Interferencias indicadas: contaminación de membranas de electrodos, desviaciones en las mediciones, disminución en la sensibilidad de los electrodos, baja conductividad, presencia de sedimentos, liberación de gases.
- H. Residuos generados.** De acuerdo con el apéndice A de la norma, las disoluciones amortiguadoras se tratan en su mayoría de sales, por lo que pueden ser desechadas en el drenaje de manera segura, en tanto la disolución patrón o disolución de referencia con que sean neutralizadas pueden ser desechadas en el drenaje.
- I. Conocimientos de Química Analítica involucrados.** Calibración química, control de calidad, equilibrios ácido-base, equilibrios óxido-reducción, estadística aplicada a química analítica, estequiometría, potenciometría,

términos químicos, materiales de referencia. Este punto se discutirá a detalle en el apartado 10.

10. Conocimientos teóricos y metodológicos

En la aplicación de la Química Analítica se requiere que los estudiantes de las licenciaturas de la Facultad de Química tengan fortaleza y solidez en el manejo e instrumentación de las técnicas analíticas. Mostrando las habilidades para aplicar el método científico y el razonamiento crítico a la resolución de casos y problemas de complejidad creciente, de manera progresiva, aplicando los conocimientos adquiridos, así como la capacidad para elaborar informes y presentar por escrito información científica con una interpretación lógica, coherente y correcta de la información que esté analizando, incorporando al bagaje formativo la importancia de los principios éticos y deontológicos que han de orientar su labor profesional. Con la finalidad de conseguir una visión general y aplicada de los aspectos claramente demandados por la sociedad y por el mercado laboral.

Los conocimientos y metodologías teóricas identificados en los procedimientos revisados son los mostrados en la Tabla 16.

Todos los conocimientos identificados se encuentran incluidos en los contenidos curriculares de las materias de Química Analítica, que se imparten en la Facultad de Química UNAM. La correspondencia de los conocimientos teóricos y metodológicos que se aplican en cada uno de los métodos revisados se presentan en la Tabla 17.

Tabla 16. Conocimientos y metodologías teóricas revisadas

	N total Kjeldahl	pH	Nitratos	DBO ₅	Sólidos suspendidos totales	Coliformes totales y fecales
Calibración química		x	x			
Control de calidad	x	x	x	x	x	x
Equilibrios ácido-base	X	x		x		
Equilibrios de precipitación						
Equilibrios óxido-reducción	x	x		x		
Equilibrio de complejos						
Espectroscopía de ultravioleta-visible			x			
Estadística aplicada a química analítica	x	x	x	x	x	x
Estequiometría	x	x	x	x		x
Gravimetría					x	
Potenciometría		x				
Términos químicos	x	x	x	x	x	x
Materiales de referencia	x	x	x	x	x	x
Volumetría	x			x		

Elaboración propia

Tabla 17. Relación de los conocimientos teóricos y las asignaturas de química analítica

	QA	QAII	QAIII	QAI1	AEI	AEII	AEIII
Calibración química	x				x		
Control de calidad	x		x				x
Potenciometría	x			x			
Equilibrios ácido-base	x	x					
Equilibrios de precipitación	x	x	x				
Equilibrios óxido-reducción	x	x					
Equilibrios de complejos	x	x					
Espectroscopía de ultravioleta-visible	x						
Estadística aplicada a química analítica	x						
Estequiometría	x						
Gravimetría	x				x		
Potenciometría	x			x		x	
Términos químicos	x	x	x	x	x		x
Materiales de referencia	x	x	x	x	x		x
Volumetría	x				x		

Elaboración propia. Las abreviaturas corresponden a, QA: Química analítica, QAII: Química analítica II, QAIII: Química analítica III, QAI1: Química analítica Instrumental I, AEI: Analítica Experimental I, AEII: Analítica Experimental II, AEIII: Analítica Experimental III.

Los conocimientos previos prácticos necesarios para la correcta realización de los métodos se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Conocimientos y metodologías prácticas necesarias

	Nitrógeno total Kjeldahl	pH	Nitratos	DBO ₅	Sólidos suspendidos totales	Coliformes totales y fecales
Buenas prácticas de laboratorio	X	X	X	X	X	X
Cálculos estadísticos (elaboración e interpretación)	X	X	X	X	X	X
Conocimiento y manejo de material de laboratorio	X	X	X	X	X	X
Ejecución de protocolos experimentales	X	X	X	X	X	X
Elaboración de informes	X	X	X	X	X	X
Evaluación de riesgos de seguridad	X	X	X	X	X	X
Evaluación e interpretación de gráficos	X	X	X	X	X	X
Habilidades y uso de TIC	X	X	X	X	X	X
Manejo de electrodos selectivos		X				
Manejo de equipo ultravioleta-visible			X			
Manejo de potenciómetro		X				
Manejo de residuos	X	X	X	X	X	X
Preparación de disoluciones	X	X	X	X	X	X
Preparación de muestras	X	X	X	X	X	X
Recolección y registro de datos experimentales	X	X	X	X	X	X
Cultivo de microorganismos						X

Elaboración propia.

Los profesionales egresados de las seis carreras que se ofertan en la Facultad de Química cuentan con amplios conocimientos de tipo teórico y práctico en la diferentes áreas científicas que les permiten aplicar sus competencias impulsando el desempeño de la industria química en general y la docencia, por ello deben de ser capaces de aplicar sus conocimientos en la resolución de problemáticas que se presenten en el ámbito en el que se desempeñe, también debe de ser capaz de modificar y gestionar las tecnologías para la innovación de

productos o procesos, así como de transmitir la información de acuerdo con la metodología científica.

Aspectos éticos

El código de ética es un compromiso personal como social, con la finalidad de que se asegure actuar de acuerdo con la normatividad moral, ética y deontológica establecida (Universidad Autónoma de Querétaro - Facultad de Química, 2023).

El profesional de la química desde el punto de vista deontológico está regido por dos órdenes de principios éticos, uno de carácter general, análogo a los de otras profesiones y otros derivados de la forma de ejercer la profesión, precisando de un articulado específico por afectar a determinadas áreas vitales del ser humano y su entorno, lo que se traduce en unas responsabilidades éticas concretas en relación con (Colegio Oficial de Químicos de la Comunidad Valenciana, 2009):

- Medio ambiente
- Alimentación y nutrición
- Fármacos y otros agentes con efectos biológicos
- Sustancias químicas tóxicas y peligrosas
- Instalaciones industriales y sus riesgos
- Salud y riesgos laborales

Dado el alto impacto que tienen los resultados en la toma de decisiones, tiene implícito el compromiso ético de un químico con la sociedad, entre los principios éticos de los profesionales del área de la química resaltan los siguientes (COPAES, 2020; COPAQUI, 2021, CNQFBM, 2021, López-Santiago, 2021) (Colegio de Químicos Clínicos del Estado de Michoacán A.C, 2012):

- Utilizar sus conocimientos, habilidades y capacidades para mejorar el bienestar humano
- Estar comprometido con el desarrollo sustentable
- Tener una conducta profesional honesta, digna, sana y responsable

- Admitir trabajos sólo cuando se cuente con los conocimientos y habilidades necesarias para su ejecución
- Ser imparcial al emitir una opinión o juicio a fin de evitar conflictos de interés
- Conservar estricta confidencialidad de la información que le sea confiada y referida en relación con la evaluación, salvo en casos o informes requeridos por la ley
- Deberá de respetar siempre los derechos humanos de sus colegas, subordinados, clientes y de la sociedad en general
- Deberá de responder por los actos que dañen a terceros o al patrimonio cultural que deriven como resultado de su ejercicio
- Deberá evitar que utilicen incorrectamente su nombre o cédula profesional en asuntos inherentes a su profesión
- Deberá prestar sus servicios al margen de cualquier ideología política y religiosa o de tendencias xenofóbicas, racistas, sexistas o elitistas
- Deberá intervenir a favor de sus colegas en caso de injusticia o apoyarlos en situaciones manifiestas cuando el conocimiento profesional de éstos sea limitado.

Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones que se obtuvieron de este trabajo de acuerdo con los objetivos planteados.

Objetivos específicos

1. Analizar las metodologías analíticas propuestas en el proyecto de norma "Sistemas de depuración de aguas residuales domésticas que no estén conectadas a un sistema de alcantarillado sanitario-Especificaciones y métodos de prueba.

Mediante la revisión de las metodologías referidas en las normas mexicanas se estableció el contexto de las pruebas y sus implicaciones ambientales y legales. El análisis de la información permitió la identificación pronta de las pruebas esenciales para así reproducirla en los demás parámetros.

2. Identificar los conocimientos teóricos y prácticos de Química Analítica involucrados.

Una vez categorizados de acuerdo con su naturaleza en habilidades y conocimientos teóricos o prácticos, se observó que son necesarios e indispensables para la aplicación del método científico y el razonamiento crítico para la resolución de casos y problemas de complejidad creciente.

3. Valorar la importancia actual de la química analítica para la resolución de problemáticas reales.

Debido a que los profesionales de la química son los responsables para tomar decisiones en determinadas áreas vitales del ser humano y su entorno, la importancia de la química analítica se traduce en resolución de problemáticas de carácter importante, cerciorándose de que las decisiones tomadas minimicen, eviten o reduzcan los riesgos por las mismas.

Objetivo general

Fue posible recuperar las secuencias experimentales expresadas en los fundamentos analíticos que refieren los estándares a los que remite el proyecto de norma, analizándolos en nueve principales rubros: analito, importancia, regulación, principio del método analítico, procedimiento experimental, control de calidad, residuos generados y finalmente identificación de conocimientos de química analítica involucrados.

En el contexto enmarcado de la relevancia e importancia en la vida profesional de los químicos en la adquisición de habilidades y conocimientos de química analítica, se reafirma que garantizar la salud humana y el cuidado ecológico, son aspectos éticos de gran importancia para los químicos en la modernidad.

Referencias

- Congreso de la Unión. (2020). Obtenido de Ley de Infraestructura de la Calidad. Ciudad de México: Congreso de la Unión.: https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LICal_010720.pdf
- ANASAC. (01 de 2017). *Hoja de seguridad Sulfato de Amonio*. Obtenido de <https://www.anasac.cl/agropecuario/wp-content/uploads/SULFATO-DE-AMONIO.pdf>
- Arazari Saldivar, H. (2021). Obtenido de Obtenido de Introducción a la química analítica, química analítica capacidades. Reconoce la importancia de la química analítica, su clasificación y sus aplicaciones: <https://slideplayer.es/slide/18015332/>
- Baeza Baeza, J. J. (2016). *Tema 1. Introducción a la Química Analítica*. Obtenido de www.uv.es: https://www.uv.es/baeza/Tema_1_IntroduccionQA_2016.pdf
- Caballero, M. S. (2018). Obtenido de Introducción a la Química Analítica: <https://aulavirtual4.unl.edu.ar/mod/resource/view.php?id=22>
- Cámara de Diputados. (2022). Obtenido de Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos: http://www3.diputados.gob.mx/camara/001_diputados/012_comisionesl/xii/01_ordinarias/002_agua_potable_y_saneamiento/13_marco_juridico/01_constitucion_politica_de_los_estados_unidos_mexicanos
- CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN. (2015). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*.
- CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN. (2022). *Ley de Aguas Nacionales*.
- Castaño Moreno, E., & Bernal Osorio, S. M. (Noviembre de 2015). Obtenido de Validación del método de ensayo de Coliformes totales y fecales por la técnica de NMP en la calidad de queso fresco producido a pequeña escala: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/16168/VALIDACI%C3%93N%20DEL%20M%C3%89TODO%20DE%20ENSAYO.pdf?sequence=1>
- Cervantes, Q. A. (2009). Obtenido de Tesis que para obtener el título de Maestra en Ingeniería. Sistema Combinado Para el Tratamiento de Aguas

Residuales Para Viviendas Unifamiliares:
<http://132.248.9.195/ptd2009/marzo/0641610/Index.html>

Cicarelli laboratorios. (2006). *Material Safety Data Sheet*. Obtenido de <https://www.ge-iic.com/files/fichas%20productos/EDTA.pdf>

Colegio de Químicos Clínicos del Estado de Michoacán A.C. (2012). *Código de Ética*. Obtenido de https://quimicosdemichoacan.org.mx/codigo_etica.pdf

Colegio Oficial de Químicos de la Comunidad Valenciana. (2009). *CODIGO DEONTOLÓGICO ICOQCV*. Obtenido de <https://colegioquimicos.com/wp-content/uploads/2022/03/codigo-deontologico-icoqcv.pdf>

CONAGUA. (2009). *Semblanza Histórica del Agua en México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA. (2019). *Libro 20. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Alcantarillado sanitario*. México.

CONAGUA. (2019). *Libro 21. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Sistemas Alternativos de Alcantarillado Sanitario*.

CONAGUA. (2019). *Libro 31. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos*. México.

Contreraz, R. (2017). *DatosPDF*. Obtenido de https://datospdf.com/download/ccayac-m-004-11-metodo-de-prueba-para-la-estimacion-de-la-densidad-microbiana-por-la-tecnica-del-numero-mas-probable-nmp-deteccion-de-coliformes-totales-coliformes-fecales-y-escherichia-coli-_5a4c1d9cb7d7bcb74fe3197e_pdf

Corona, Z. I. (2007). Obtenido de Biodigestores. Tesis que para obtener título de Ingeniero Industrial: <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/10722/Biodigestores.pdf?sequence=1>

Del Ángel, S. M. (1994). *Contribución al Estudio de la Demanda Bioquímica de Oxígeno. Tesis que para obtener el título el grado a Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental*. Monterrey, N.L.

- Facultad de Química. (2015). Obtenido de Hoja de datos de amoníaco :
<https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2017/05/HDS-Amoniac-NOM-018-2015-MARY-DGTF-MEAG-Hoja-de-datos.pdf>
- Facultad de Química UNAM. (2023). Obtenido de Departamento de Química Analítica:
<https://quimica.unam.mx/la-facultad/organizacion/departamentos-academicos/quimica-analitica/#presentacion-qa>
- FAO. (s.f.). *MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA LA DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO Y CONSTITUYENTES NITROGENADOS EN ALIMENTOS*. Obtenido de
<https://www.fao.org/3/ah833s/Ah833s17.htm>
- García, R. A. (2014). Obtenido de Diseño De Un Biodigestor Anaerobio:
https://energia.azc.uam.mx/images/PDF/ProyecINVES/Tec_Sust/DISEO-DE-UN-BIODIGESTOR-ANAEROBIO.pdf
- Gavilán García, I., Alcántara Concepción, V., Cano Díaz, G. S., & Gavilán García, A. (Agosto de 2014). *Guía técnica de acción para residuos biológicos*. Obtenido de
https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2014/08/gt_biologicos.pdf
- Gómez, G. I. (1995). *Manual de Análisis de Agua*. Manizales, Colombia.
- Gomis Yagües, V. (2008). *TEMA 1. INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS INSTRUMENTALES EN EL ANÁLISIS INDUSTRIAL*. Obtenido de
<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8245/8/T1metodos%20instrumentales.pdf>
- González, H. A. (2003). *Inspección en fosas sépticas y letrinas*. México: Instituto Mexicano de Tecnología.
- HACH. (2023). *HACH be right*. Obtenido de Sólidos totales y disueltos:
<https://es.hach.com/parameters/solids>
- Harris, D. (2007). *Análisis químico cuantitativo*. Barcelona: Reverté.
- Indeed. (2023). Obtenido de Qué hace un analista químico: funciones y habilidades:
<https://mx.indeed.com/orientacion-profesional/como-encontrar-empleo/que-hace-analista-quimico>
- Jácome Yánez, J. A. (2014). Obtenido de Validación De Métodos Analíticos Para La Determinación De La Demanda Química De Oxígeno (Rango Bajo,

Rango Medio, Rango Alto), Sólidos Totales Disueltos Y Sólidos Totales Suspendidos En Matrices De Agua Clara Y Residual "CICAM": <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/8461/1/BQ%2062.pdf>

- Jiménez, C. B. (2001). *La Contaminación Ambiental en México*. México: Limusa.
- Legorreta, G. J. (2006). *El agua y la ciudad de México : de Tenochtitlán a la megalópolis del siglo XXI*. México: UAM- Azcapotzalco.
- Londoño Carvajal, G. G. (2010). Obtenido de MÉTODOS ANALÍTICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FISICOQUÍMICA DEL AGUA: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/54604/9789588280394.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- López Torres, M. d. (2010). *Conceptos básicos de química analítica y sus aplicaciones*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- López, M. E. (1985). Aspectos sanitarios del estudio de las aguas. Servicio de Publicaciones. Granada. Obtenido de https://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf
- López-Santiago, N. R. (2021). *Estrategias para el aprendizaje de la validación de métodos analíticos: un enfoque neurodidáctico*. Ciudad de México: CESE.
- López-Santiago, N., & Orta-Pérez, M. (2012). *Memorias del Quinto Foro Nacional de Ciencias Básicas*. Obtenido de <http://dcb.fic.unam.mx/Eventos/Foro5/memorias/lista.php?id=3>
- Lorenzetti, L. C. (2012). *Repositorio Académico*. Obtenido de https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/302513/lorenzetti_lc-pub-delfos.pdf?sequence=1
- Martínez, F. C., Cansino, A. T., & Ortiz., A. C. (2017). *Dimensionamiento de lagunas de estabilización*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Mazari, A. M. (2012). *Efecto De La Granulometría Sobre El Desempeño De Un Sistema De Biofiltración Utilizando Material Orgánico*. Tesis para optar por el grado de Maestro en Ingeniería. Obtenido de

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5076/Tesis.pdf?sequence=1>

Patel, M. (2016). *Investigation of the Efficiency for the Cadmium Reduction Method of Nitrate to Nitrite Conversion for the Application in the LOPAP Instrument*. Obtenido de <https://cac.yorku.ca/files/2016/09/Mitesh-Patel-CHEM4000-THESIS.pdf?x27611>

Pérez, W. M. (2014). *Tesis para obtener el grado en Ingeniero Civil "Revisión de un Sistema de Alcantarillado Pluvial"*.

Rivera, N. H. (2009). Obtenido de DISEÑO, COSTO Y PROGRAMACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DE UNA URBANIZACIÓN, (CASO PRÁCTICO): <https://repositorio.unan.edu.ni/9602/1/81801.pdf>

Rosell Campos, F. (2009). *Historia del Saneamiento de Valladolid*. Ayuntamiento de Valladolid.

ROTH. (2018). Obtenido de Ficha de datos de seguridad Nitrito de sodio: <https://www.uv.mx/pozarica/cq/files/2021/02/360.-Sodio-nitrito.pdf>

ROTH. (11 de 2021). *Ficha de datos de seguridad Manganeso(II) sulfato*. Obtenido de <https://www.carlroth.com/medias/SDB-4487-ES-ES.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wzMDYzMzh8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0cy9oNzIvaGE5LzkwNDkyMDcwNzg5NDIucGRmfDhhOWExOTQ0ODgzMTkwYTE5NTkzNmY1Y2Y1ZTgwNzYzYTJiOTUwNzUwNjRiMzM3NDhkMDhl>

ROTH. (01 de 2022). *Ficha de datos de seguridad Yoduro de sodio*. Obtenido de <https://www.carlroth.com/medias/SDB-A134-ES-ES.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wyODUzNzF8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0cy9oMDAvaDM1LzkwNTg3MzZkMzZkMDYucGRmfDM4ODBjMzlmNDY2NTJkMTFmZDBiZmE2ODhlMWQ2ODIIZDRkY2EyMjEzZTk3NDVmMGYzMDY3>

SCHOTT INSTRUMENTS. (2023). *Schott Instruments 074221 PH-metro, Lab 870*. Obtenido de <https://www.amazon.es/SCHOTT-instrumentos-074221-pH-metro-870/dp/B01BY8SMNS>

SECRETARÍA DE ECONOMÍA. (s.f.). Obtenido de <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2001/nmx-aa-028-scfi-2001.pdf>

Secretaría de Economía. (2001). NMX-AA-079-SCFI-2001. Análisis De Aguas - Determinación De Nitratos En Aguas Naturales, Potables, Residuales Y Residuales Tratadas - Método De Prueba (Cancela A LA NMX-AA-079-1986). *Diario Oficial de la Federación*, 1-27.

Secretaría de Economía. (2010). NMX-AA-026-SCFI-2010. Análisis de agua - medición de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba -(cancela a la NMX-AA-026-SCFI-2001). *Diario Oficial de la Federación*, 1-31.

Secretaria de Economía. (2011). NMX-AA-008-SCFI-2016. Análisis De Agua.- Medición Del pH En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas.- Método De Prueba- (Cancela A La Nmx-Aa-008- Scfi-2011). *Diario Oficial de la Federación*, 1-21.

Secretaría de Economía. (2015). NMX-AA-042-SCFI-2015 ANÁLISIS DE AGUA - ENUMERACIÓN DE ORGANISMOS COLIFORMES TOTALES, ORGANISMOS COLIFORMES FECALES (TERMOTOLERANTES) Y Escherichia coli. MÉTODO DEL NÚMERO MÁS PROBABLE EN TUBOS MÚLTIPLES (CANCELA A LA NMX-AA-42-1987). *Diario Oficial de la federación*, 1-29.

SECRETARÍA DE ECONOMÍA. (s.f.). NMX-AA-012-SCFI-2001. ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-012-1980) . Obtenido de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166768/NMX-AA-012-SCFI-2001.pdf>

SECRETARÍA DE ESTADO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, SUBSECRETARÍA DE GESTIÓN AMBIENTAL., REPÚBLICA DOMINICANA. (Abril de 2001). *NORMA SOBRE AGUAS RESIDUALES*. Obtenido de <https://colegiodeabogados.org.do/index.php/bibliojuris/leyes-y-decretos/militar-y-medio-ambiente/745-norma-sobre-aguas-residuales-pdf/file>

SEGOB. (s.f.). *DOF*. Obtenido de NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.:

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

SEGOB. (s.f.). *DOF*. Obtenido de NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003#gsc.tab=0

SEMARNAT. (2002). Obtenido de Fosa Séptica , Cámara de Oxidación y Pozo de Absorción: <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/tlax/estudios/2002/29TX2002G0003.pdf>

SEMARNAT. (2014). *El medio ambiente en México, 2013-2014*. Obtenido de Calidad del Agua: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_1.html

SEMARNAT. (Julio de 2022). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:bSiIYZBIf44J:https://dof.gob.mx/nota_to_doc.php%3Fcodnota%3D5658984&cd=3&hl=es-419&ct=clnk&gl=mx

SEMARNAT. (2022). *PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-006-CONAGUA-2022, Sistemas de depuración de aguas residuales domésticas que no estén conectadas a un sistema de alcantarillado sanitario-Especificaciones y métodos de prueba*. Obtenido de https://dof.gob.mx/nota_to_doc.php%3Fcodnota%3D5658984&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=mx

SEMARNAT, CONAGUA. (s.f.). Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/sgaa-15-13.pdf>

Sigma-Aldrich. (05 de 2013). *Safety Data Sheet Ácido bórico*. Obtenido de <https://dcb.ingenieria.unam.mx/wp-content/themes/temperachild/CoordinacionesAcademicas/FQ/Q/LQ/HS/AcidoBorico.pdf>

- Sigma-Aldrich. (11 de 2023). *Ficha de datos de seguridad Tetrionato de sodio*. Obtenido de [sigmaaldrich.com: https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/sds/sigma/s5758](https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/sds/sigma/s5758)
- SINEC. (s.f.). *Sistema Integral de Normas y Evaluación de la Conformidad*. Obtenido de *Portal único del gobierno*. Obtenido de <https://www.sinec.gob.mx/SINEC/Vista/Normalizacion/BusquedaNormas.xhtml>
- Sites Google. (2012). *Portafolio: Química Ambiental 350*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/portafolioquimicaambiental350/laboratorios/-4-determinacion-de-oxigeno-disuelto-en-aguas-naturales>
- Skoog, D. A. (2014). *Fundamentos de química analítica. 9ª Edición*. Madrid: Reverté.
- Study Smarter. (2023). *Chemical Analysis Definition & Examples*. Obtenido de [studysmarter.es: https://www.studysmarter.es/](https://www.studysmarter.es/)
- Tilley, E. U. (03 de 2017). Esquema de funcionamiento de una fosa séptica, Traducción al español.
- Universidad Autónoma de Querétaro - Facultad de Química. (2023). *Normatividad - Código de Ética*. Obtenido de [quimica.uaq.mx: https://quimica.uaq.mx/index.php/conocenos/normatividad-fq/codigo-etica](https://quimica.uaq.mx/index.php/conocenos/normatividad-fq/codigo-etica)
- Universidad de Murcia. (11 de 2011). *Tema 1. Introducción al Análisis Químico*. Obtenido de <https://www.um.es/documents/4874468/11830096/tema-1.pdf/1c49a077-8b02-405d-9100-ee5f7f1b1b7b>
- Velasquez, Y. (2021). *Steemit*. Obtenido de Hive blog: <https://hive.blog/hive-196387/@yusvelasquez/determinacion-de-solidos-totales-en-muestras-de-agua>; <https://steemit.com/stem-espanol/@yusvelasquez/aplicacion-de-la-gravimetria-en-el-area-ambiental-determinacion-de-solidos-en-agua-residual>
- Velasquez, Y. (Enero de 2023). *Steemit*. Obtenido de <https://steemit.com/stem-espanol/@yusvelasquez/determinacion-de-nitrogeno-total-en-muestra-de-agua-residual-una-aplicacion-de-la-volumetria-de-neutralizacion>
- Vidal, G., & etal. (s.f.). Obtenido de *Manual De Tecnologías Sostenibles En Tratamiento de Aguas*.

We Are Water Foundation . (2022). Obtenido de https://www.wearewater.org/es/aguas-negras-el-rastro-de-nuestra-historia_281141

Wikimedia Commons. (2017). *File:Copper Cadmium catalyst filter.jpg*. Obtenido de wikipedia : <https://commons.wikimedia.org/w>

Zippia. (2023). *Zippia "The carrer expert"*. Obtenido de <https://www.zippia.com/analytical-chemist-jobs/>