



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
PUEBLA**

INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”



Análisis de gestión de residuos químicos generados en laboratorios de Ingeniería Ambiental BUAP y propuesta de tratamiento por fotocatalisis heterogénea.

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

ANA VICTORIA RUGERIO SUAREZ

Directora de tesis:
D.C Gabriela Pérez Osorio



Diciembre 2022



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”

Análisis de gestión de residuos químicos generados en laboratorios de Ingeniería Ambiental BUAP y propuesta de tratamiento por fotocatalisis heterogénea.

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

ANA VICTORIA RUGERIO SUAREZ

Comité tutorial:

Directora	D.C Gabriela Pérez Osorio
Tutor	D.C Elsa Iracena Castañeda Roldán †
Integrante Comité Tutorial	D.C Gladys Linares Fleites
Integrante Comité Tutorial	D.C Sonia Emilia Silva Gómez
Integrante Comité Tutorial	D.C Daniel Cruz González
Integrante Comité Tutorial	D.C Jorge Antonio Herrera Cárdenas

Diciembre 2022

Agradecimientos

Agradezco especialmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada (CVU 460732) durante la realización de la Maestría en Ciencias Ambientales que sin este valioso apoyo no hubiera sido posible.

Agradezco al Instituto de Ciencias ICUAP y al Posgrado en Ciencias Ambientales por la confianza y todas las facilidades otorgadas en la gestión de los apoyos necesarios para el desarrollo y conclusión de esta investigación.

Un agradecimiento en particular a la Dra. Gabriela Pérez Osorio directora de esta tesis, quien siempre me brindo las bases y el apoyo de su experiencia y conocimiento para la realización de esta investigación.

Agradezco a los doctores que formaron parte del comité tutorial que siempre me brindaron su tiempo y conocimientos para el desarrollo y mejoramiento de esta investigación.

Un agradecimiento especial a mis hijas que siempre estuvieron a mi lado y que son el motor para ser cada día una mejor persona.

Agradezco a mi familia y amigos que siempre me han brindado su apoyo y ánimos para creer en mí y mis proyectos.

Índice

I. Introducción	1
II. Planteamiento del problema	3
III. Justificación.....	5
IV. Preguntas de investigación e hipótesis.....	7
V. Objetivos.....	8
5.1 Objetivo general.....	8
5.2 Objetivos específicos	8
VI. Marco de referencia	9
6.1 Marco teórico.....	9
6.1.1 Generación de residuos clasificación y manejo	9
6.1.2 Tratamientos aplicados a residuos químicos.....	13
6.1.3 Efectos nocivos a la salud humana y al ambiente por los residuos químicos	16
6.1.4 Contaminación del agua por residuos químicos.....	19
6.1.5 Tratamientos de aguas residuales por procesos fisicoquímicos avanzados	23
6.1.6 Fotocatálisis heterogénea.....	24
6.2 Marco legal.....	27
6.2.1 Internacional.....	27
6.2.2 Nacional	29
6.2.3 Estatal.....	32
6.2.4 Institucional, BUAP.....	33
6.3 Tipo de investigación	33
VII. Metodología	34
7.1 Delimitación y análisis del área de estudio	34
7.1.1 Selección y descripción de laboratorios de Ingeniería Ambiental FIQ, BUAP	34
7.1.2 Análisis de la generación y manejo de residuos en la FIQ, BUAP.....	34
7.1.3 Encuesta de percepción sobre residuos químico en la FIQ, BUAP	34
7.2 Pruebas fotocatalíticas	35
7.2.1 Síntesis y caracterización de los catalizadores TiO_2 y $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	35

7.2.2 Degradación fotocatalítica en muestras sintéticas	38
7.2.3 Degradación fotocatalítica de residuos químicos de laboratorio de Ingeniería Ambiental-FIQ, BUAP	42
7.2.4 Determinación de DQO y toxicidad aguda	43
7.3 Desarrollo del plan de gestión integral y tratamiento de residuos químicos	44
7.3.1 Propuesta de gestión de los residuos químicos generados en laboratorio	44
7.3.2 Propuesta del diseño de tratamiento de residuos químicos	46
VIII. Resultados y discusión	47
8.1 Ubicación geográfica y descripción de cuatro laboratorios	47
8.1.1 Facultad de Ingeniería Química, BUAP	47
8.1.2 Generación y disposición de residuos en laboratorios de la FIQ, BUAP ...	48
8.1.3 Conocimientos y percepción del tema de residuos y su gestión por un sector estudiantil	49
8.2 Degradación de residuos químicos por fotocátalisis	52
8.2.1 Composición química elemental de los catalizadores TiO_2 y TiO_2/SiO_2	52
8.2.2 Descripción de grupos funcionales de los catalizadores TiO_2 y TiO_2/SiO_2	53
8.2.3 Morfología y estructura cristalina de los catalizadores TiO_2 y TiO_2/SiO_2	54
8.2.4 Degradación de los colorantes azul de metileno, anaranjado de metilo y su combinación	56
8.2.5 Degradación de residuos químicos generados en la práctica de determinación de acidez y alcalinidad	61
8.2.6 Degradación de residuos químicos generados en las prácticas de determinaciones de cloruros, acidez y alcalinidad y nitrógeno total	64
8.2.7 Evaluación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)	66
8.2.8 Evaluación de la toxicidad aguda con semillas de alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	68
8.3 Plan de gestión de los residuos químicos generados en laboratorios Ingeniería Ambiental FIQ, BUAP	70
8.4 Diseño y descripción del tratamiento fotocatalítico de residuos químicos generados en laboratorios FIQ, BUAP	93
IX. Conclusiones	96
X. Bibliografía	98
XI. Anexos	106

a. Caracterización fisicoquímica de muestras de agua analizada en los cursos de análisis de agua de los periodos de primavera y verano 2022	106
b. Participación de eventos académicos	109

Índice de tablas

Tabla 1 Resumen de las técnicas de tratamiento y reciclaje de residuos.	14
Tabla 1 Resumen de las técnicas de tratamiento y reciclaje de residuos (continuación). 15	
Tabla 2 Clasificación de algunos parámetros del agua residual.	21
Tabla 3 Clasificación de tecnologías avanzadas de oxidación (TAOs).	24
Tabla 4 Normas oficiales mexicanas referentes a agua residuales.....	31
Tabla 5 Normas oficiales mexicanas referentes a residuos peligrosos.	31
Tabla 5 Normas oficiales mexicanas referentes a residuos peligrosos (continuación).	32
Tabla 6 Constantes cinéticas de la degradación de los colorantes.	61
Tabla 7 Porcentaje de reducción del área de los residuos químicos combinados al transcurso de la prueba fotocatalítica.	65
Tabla 8 Resultados finales de pruebas fotocatalíticas de muestras sintéticas y residuos de las prácticas de laboratorio.	66
Tabla 9 Evaluación de la calidad del agua con base en los criterios de DQO de la CONAGUA.	67
Tabla 10 Porcentajes de germinación de residuos químicos acuosos posterior a las pruebas fotocatalíticas de muestras sintéticas y muestras reales.	69
Tabla 10 Porcentajes de germinación de residuos químicos acuosos posterior a las pruebas fotocatalíticas de muestras sintéticas y muestras reales (continuación).	70
Tabla 11 Códigos de peligrosidad de los residuos (CPR).Fuente: NOM-052-SEMARNAT., 2005	72
Tabla 12 Símbolos, descripción y código GHS de los diferentes pictogramas de identificación.....	75
Tabla 13 Número y nombre de los grupos reactivos.....	77
Tabla 14 Código de reactividad y su descripción.....	78
Tabla 15 Prácticas y procedimientos generadoras de residuos de los laboratorios de estudio.....	80
Tabla 15 Prácticas y procedimientos generadoras de residuos de los laboratorios de estudio (continuación).....	81
Tabla 15 Prácticas y procedimientos generadoras de residuos de los laboratorios de estudio (continuación).....	82
Tabla 16 Reactivos e indicadores más utilizados en los laboratorios de estudio.	83
Tabla 17 Incompatibilidad de los residuos de los laboratorios de estudio.	84
Tabla 18 Registro de recolección de residuos químicos de la FIQ 2020.....	85
Tabla 19 Descripción de las acciones de minimización propuestas en cada etapa del proceso de generación de residuos químicos peligrosos.	90
Tabla 19 Descripción de las acciones de minimización propuestas en cada etapa del proceso de generación de residuos químicos peligrosos (continuación).	91

Índice de figuras

Figura 1 Procedimiento para la disposición final de un RP.....	12
Figura 2 Impactos a la salud humana por descargas de residuos químicos.....	17
Figura 3 Impactos ambientales de las descargas de residuos químicos.	18
Figura 4 Esquema de los procesos fundamentales en fotocatalisis heterogénea.....	25
Figura 5 Legislación internacional sobre la gestión de residuos químicos peligrosos.....	27
Figura 6 Normas internacional sobre la gestión de residuos químicos.	28
Figura 7 Legislación nacional sobre la gestión de residuos químicos.....	30
Figura 8 Etapas del proceso de obtención del catalizador TiO ₂ /SiO ₂	36
Figura 9 Desarrollo del proceso de inmovilización del TiO ₂ sobre el SiO ₂ por el método sol-gel.....	36
Figura 10 Muestras sintéticas.	38
Figura 11 Desarrollo de las pruebas fotocatalíticas para la degradación del azul de metileno.....	39
Figura 12 Desarrollo de las pruebas fotocatalíticas para la degradación del anaranjado de metilo.....	40
Figura 13 Desarrollo de las pruebas fotocatalíticas para la degradación del azul de metileno y anaranjado de metilo.	40
Figura 14 Filtrado y secado para recuperación de los catalizadores.	41
Figura 15 Kit y equipo para la determinación de la DQO.....	43
Figura 16 Pasos para determinación de toxicidad aguda por germinación de semillas de alfalfa (<i>Medicago sativa</i>) de muestras resultantes del proceso fotocatalítico.	44
Figura 17 Fases para la metodología de elaboración de un plan de gestión de residuos peligrosos.	45
Figura 18 Mapa de ubicación de sitio del área de estudio.....	47
Figura 19 Ubicación y nomenclatura de la Infraestructura, FIQ-BUAP.	48
Figura 20 Formato de la encuesta sobre manejo de residuos químicos en laboratorios académicos.	50
Figura 21 Datos generales sobre los estudiantes encuestados.....	51
Figura 22 Resultados de las preguntas sobre manejo de residuos químicos en laboratorios académicos.	51
Figura 23 Espectros EDE catalizadores.....	53
Figura 24 Comparación de espectros IR catalizadores.	54
Figura 25 Micrografías electrónicas de barrido de los catalizadores.	54
Figura 26 Patrones de difracción de rayos X catalizadores.....	55

I. Introducción

En el desarrollo de las prácticas de laboratorios de docencia e investigación para la capacitación de profesionistas se generan residuos químicos que son considerados como peligrosos, corrosivos, persistentes y recalcitrantes debido a sus características fisicoquímicas, que al ser mezclados dan como resultado compuestos complejos difíciles de identificar y clasificar de forma correcta para su gestión (Osicka, Benitez y Gímenez, 2004) (Mora y Benavides, 2011). Estos son almacenados por un tiempo prolongado hasta su disposición final representando riesgos potenciales para la salud de los seres humanos dependiendo de su exposición, toxicidad, dosis, tiempo y frecuencia que pueden ocasionar desde irritaciones cutáneas, ocular y en vías respiratorias hasta provocar cáncer y aberraciones cromosomales (Ramírez, Lema y García ,2003; Vargas, 2005). La contaminación ambiental por la liberación al ambiente de residuos peligroso puede deberse a descargas controladas, descargas no controladas por prácticas inadecuadas de tratamiento y disposición o por descargas accidentales durante su manejo, provocando la contaminación del suelo y cuerpos de agua generando desequilibrios ecológicos (Martínez, Mallo, Lucas, Alvarez y Salvarrey, 2005).

Por lo que la generación de un plan de gestión y tratamiento de residuos procedentes de los laboratorios de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Química de la BUAP aportaría al cuidado del medio ambiente, la salud universitaria y cuidado de recursos (Solano, 2015). Sumando también con el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible 12 y 6. Por lo que es importante conocer cuáles son los factores institucionales y socioambientales involucrados en la generación de residuos químicos de laboratorios, así como conocer la eficiencia de su tratamiento mediante fotocátalisis heterogénea con luz solar y establecer los beneficios del desarrollo de un plan de gestión y tratamiento. Con el análisis de los factores que intervienen en la generación, clasificación y disposición de residuos químicos generados en los laboratorios de docencia de Ingeniería Ambiental se establece una propuesta de gestión y tratamiento por fotocátalisis solar. Se determinaron los posibles impactos negativos a la salud humana y al ambiente por la presencias de los residuos químicos en aguas.

Se realizó la revisión y análisis de los acuerdos y normas internacionales para la gestión de residuos peligrosos, se revisó las leyes nacionales y normas oficiales mexicanas sobre la identificación, clasificación y manejo de residuos peligrosos a nivel institucional se revisó el

Introducción

Plan de Gestión de Residuos Universitarios y los manuales de laboratorios de estudio (análisis de agua, análisis de suelo, química ambiental con laboratorio y residuos sólidos y peligrosos) y se realizaron encuestas para conocer la percepción de los alumnos sobre la generación, manejo y disposición de los residuos de las prácticas de laboratorio.

Para establecer la eficiencia de la fotocatalisis heterogénea se realizó la selección y caracterización de los catalizadores TiO_2 sólo e inmovilizado sobre SiO_2 por el método sol-gel ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$). Se realizaron pruebas fotocatalíticas con luz solar de muestras sintéticas de colorantes (azul de metileno, anaranjado de metilo y su combinación) y de residuos provenientes de prácticas experimentales monitoreando y evaluando el porcentaje de degradación mediante espectrofotometría UV-Vis. Posterior al proceso fotocatalítico se determinó la DQO de las muestras resultantes y la toxicidad aguda mediante el bioensayo con semillas de alfalfa (*Medicago Sativa*).

La implementación de las pruebas de fotocatalisis heterogénea con luz solar se alcanzaron altos porcentaje de degradación de los contaminantes orgánicos de las muestras sintéticas, también se logró en menor proporción la degradación de contaminantes de los residuos de prácticas de laboratorios debido a que estas muestras forman una mezcla de composición química variada y lo anterior representa una mayor carga de contaminantes.

Se desarrolló la propuesta de gestión de los residuos mediante el diagnóstico, clasificación, registro y control, verificación y tratamiento donde se pudieron identificar áreas de oportunidad para la minimización de generación, su clasificación e identificación y su mejoramiento continuo mediante registros, controles y verificación. Se realizó la propuesta de diseño y operación de un fotorreactor como una tecnología eficaz, de montaje y operación fácil para el tratamiento de los residuos químicos de los laboratorios de estudio.

II. Planteamiento del problema

Derivado de las prácticas experimentales en laboratorios académicos se producen residuos peligrosos y residuos no peligrosos que necesitan ser gestionados ya que representan un peligro para la salud y preservación del medio ambiente, implicando una serie de acciones encaminadas a su reducción, reaprovechamiento, tratamiento y disposición final (Pérez, 2005). Principalmente los residuos químicos se encuentran en fase acuosa debido a que provienen de análisis que involucran el uso de agua lo que representa su contaminación y deterioro en su calidad. Esto representa un problemática ya que este recurso es limitado y requiere ser tratado para su aprovechamiento en otras actividades ambientales (Fernández, 2012).

En el colegio de Ingeniería Ambiental perteneciente a la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) se cuentan con distintos laboratorios como los de análisis de suelo, análisis de agua, química ambiental con laboratorio y residuos sólidos y peligrosos. Donde se generan residuos químicos clasificados en inorgánicos y orgánicos, los cuales son almacenados en contenedores sin análisis de compatibilidad química. Esto genera mezclas complejas difíciles de identificar, clasificar y gestionar de acuerdo a los lineamientos normativos existentes dificultado su cumplimiento ya que estas normas se concentran en residuos generados en el sector industrial (Mendoza y Ize, 2017).

Los residuos químicos son almacenados durante un largo periodo de tiempo hasta su recolección por parte de una empresa particular para su disposición final. Estos residuos químicos carecen de una adecuada clasificación e identificación para su almacenamiento y disposición lo que representan un riesgo latente para la salud de la comunidad universitaria, en caso de fugas o derrames. Los efectos a la salud dependen principalmente de dos factores: la naturaleza del residuo y el tiempo de exposición y contacto. Sin embargo, estos residuos pueden ser tóxicos teniendo efectos genotóxicos aún en pequeñas concentraciones y tiempos de exposición reducidos. Una exposición prolongada a residuos muy tóxicos puede tener un efecto irreversible en la salud o incluso causar la muerte (González, Velasco y Candelo-Becerra, 2020). También representan un peligro para el medio ambiente por la posibilidad potencial de derrames o descargas accidentales al suelo o agua generando contaminación en estos compartimentos ambientales (Cirelli, 2012).

Planteamiento del problema

Por lo que es importante diseñar un plan de manejo de residuos químicos con los procedimientos adecuados para su clasificación e identificación de los residuos químicos procedentes de los laboratorios de docencia de Ingeniería Ambiental con lo que se espera reducir la cantidad de residuos sin clasificar. Así como para determinar algunas alternativas de tratamiento como la degradación fotoquímica, con la finalidad de prevenir posibles riesgos de salud y ambientales.

III. Justificación

Con el objetivo de conocer la frecuencia y tipo de residuos que se generan durante el desarrollo de las prácticas de laboratorio se requiere del análisis de los manuales de prácticas experimentales desarrolladas en los laboratorios de Ingeniería Ambiental para la identificar los residuos que se obtenga en mayores volúmenes o los cuales se han reportado alta toxicidad. Con lo anterior se pueden caracterizar estrategias para la disminución de su generación y tratamiento de los residuos químicos que se generan en la institución académica.

Para una gestión adecuada de los residuos químicos es necesario conocer la legislación nacional e internacional aplicable al manejo de residuos peligrosos donde se establezcan los lineamientos para su clasificación con base en sus características fisicoquímicas y su compatibilidad química. Mediante una clasificación adecuada de los residuos químicos se pueden establecer propuestas de tratamiento como la degradación mediante fotocátalisis heterogénea.

La fotocátalisis heterogénea es una tecnología limpia que puede aplicarse con luz solar, de operación y montaje sencillo y que no genera lodos en el proceso. Esta tecnología pertenece a los Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs) que son alternativas altamente viables para alcanzar un alto grado de pureza en el agua tratada. La utilización de la luz solar como fuente de energía permite la disminución de costos de operación por el ahorro al no utilizar lámparas para su aplicación. Se ha estudiado ampliamente el dióxido de titanio (TiO_2) como fotocatalizador para el tratamiento de aguas residuales debido a sus propiedades y que ha alcanzado buenos rendimientos en la degradación de contaminantes. (Rueda, Levchuk, Ibañez y Sillanpää, 2020; Zhang, Wang y Zhang, 2014; Bousselmi, Geissen, Schoroeder, 2004; Giraldo, Ángel, Mesa. Restrepo y Palacio, 2005; Giraldo, Franco y Arango, 2004; Mera y Mera 2011). Puede ser dispuesto en suspensión o soportado en diferentes sustratos, que les brinda mejores condiciones mecánicas y operacionales pero disminuye su área superficial. Una alternativa es su inmovilización en dióxido de silicio (SiO_2) que es un material poroso e inerte en el cual se puede fijar el TiO_2 no afectando su capacidad fotocatalítica (Candal *et al.*, 2001; García, Guzmán, Vera y Páez, 2008).

Con la disminución de los residuos químicos que se generen, así como de una clasificación adecuada y los tratamientos propuestos se reduciría los riesgos para la salud humana y al ambiente aportando a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 12 Producción y

Justificación

consumo responsable y 6 Agua limpia y saneamiento en particular a la meta 12.4 *“lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, de conformidad con los marcos internacionales convenidos, y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente”*. Y a la meta 6.3 para *“mejorar la calidad del agua, reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgo a nivel mundial”* (Naciones unidas, 2016), .

IV. Preguntas de investigación e hipótesis

1. ¿Cuál es la eficiencia de la fotocatalisis heterogénea en la degradación de contaminantes acuosos generados en los laboratorios de docencia de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Química de la BUAP?
2. ¿Qué acciones y estrategias académicas y administrativas están involucradas en la gestión de los residuos químicos generados en los laboratorios, y son indispensables para que su manejo y disposición generen un menor impacto en la salud y el ambiente?

Hipótesis

1. La aplicación de un proceso de fotocatalisis heterogénea permite degradar residuos químicos acuosos generados en los laboratorios de docencia de Ingeniería Ambiental pertenecientes a Ingeniería Química de la BUAP.
2. Identificar los factores involucrados en la gestión de residuos generados en los laboratorios de docencia permite desarrollar un plan de gestión integral, de manera que se pueden establecer acciones para reducir su volumen, clasificarlos e identificarlos de acuerdo con normas nacionales e internacionales, almacenarlos y proponer un tratamiento para su degradación.

V. Objetivos

5.1 Objetivo general

Analizar los factores institucionales y socioambientales relacionados con la generación, clasificación y disposición de residuos químicos generados en laboratorios de docencia de Ingeniería Ambiental, para establecer una propuesta de gestión y tratamiento mediante fotocatalisis solar.

5.2 Objetivos específicos

1. Identificar los aspectos y requerimientos necesarios para el manejo de los residuos químicos, mediante la revisión y análisis de la normatividad internacional, nacional y local vigente referente a la gestión de residuos químicos y el Plan de Gestión Integral de Residuos institucional, así como los manuales de laboratorios seleccionados de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Química.
2. Determinar la eficiencia de degradación de residuos químicos mediante fotocatalisis heterogénea con los catalizadores TiO_2 y $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ y radiación solar, tanto de muestras sintéticas como de residuos generados en el desarrollo de prácticas del laboratorio.
3. Proponer un sistema de gestión y tratamiento para degradar los residuos químicos generados en los laboratorios de Ingeniería Ambiental FIQ, BUAP.

VI. Marco de referencia

6.1 Marco teórico

6.1.1 Generación de residuos clasificación y manejo

Buenas prácticas de laboratorios

Las universidades tienen un papel importante en la formación de profesionistas respetuosos del medio ambiente. El desarrollo de buenos hábitos y prácticas en los estudiantes para la protección de la comunidad, la universidad y el ambiente, contribuyen a vincular la teoría con la práctica. Esto facilita que comprendan la importancia que tiene la sociedad para planificar su desarrollo en forma sustentable en su beneficio y el de las generaciones futuras mediante el fomento de responsabilidad ambiental y social de un manejo adecuado de sus residuos (Bertini y Cicerone, 2009, p.137).

Las Buenas Prácticas de Laboratorio (BLP), es un conjunto de reglas, procedimientos operacionales y prácticas para asegurar la calidad e integridad de datos producidos en investigaciones o estudios. Establecidas por determinados organismos como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) o la Administración de alimentos y medicamentos de EE. UU. (FDA por sus siglas en inglés), etc.

Las instituciones educativas con laboratorios deben contar con un manual de seguridad e higiene con procedimientos apropiados a las características propias del laboratorio, para un manejo correcto de los materiales, reactivos y disposición final de sus residuos. Las medidas de seguridad son el conjunto de acciones destinadas a prevenir accidentes y contaminación, la seguridad en los laboratorios no se limita a la protección personal o de la infraestructura, sino también a un manejo adecuado de los reactivos químicos, para prevenir su desperdicio y contaminación. (Cantú, Múzquiz y Valdez, 2016).

Clasificación de residuos

Los residuos se definen en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) como “todos aquellos materiales o productos cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentran en estado sólido o semisólido, líquido o gaseoso y que se contienen en recipientes o depósitos; pueden ser susceptibles de ser valorizados o requieren sujetarse a tratamiento o disposición final” conforme a lo dispuesto en la misma Ley (DOF, 2003, p.6).

Marco de referencia

La palabra residuo (con origen en el latín *residuum*) describe al material que pierde utilidad tras haber cumplido con su misión o servido para atender una determinada necesidad. Por lo tanto, el concepto de residuo se emplea como sinónimo de basura, es decir, por hacer referencia a los desechos que el hombre ha producido.

En función de sus características y orígenes, los residuos se clasifican en tres grandes grupos: Residuos Sólidos Urbanos (RSU), Residuos de Manejo Especial (RME) y Residuos Peligrosos (RP). Los RSU son los que se generan en las casas habitación como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas o los que provienen también de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de los establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias, y los resultantes de las vías y lugares públicos siempre que no sean considerados como residuos de otra índole. Los RME están definidos como “aquéllos generados en los procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados residuos sólidos urbanos o peligrosos”, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos (DOF, 2003, p. 6).

Hay una gran diversidad de sustancias químicas que se han utilizado a nivel industrial para el mejoramiento de la vida de la población, pero al cumplir su ciclo de vida se convierten en desechos que ponen en riesgo la salud humana o pueden causar daños al medio ambiente. Entre estos desechos se encuentran los RP, definidos como “aquellos que poseen alguna de las características CRETIB que les confieren peligrosidad, así como los envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados”, según lo establece la LGPGIR (SEMARNAT, 2008, p. 338).

El sistema de manejo de los residuos peligrosos se encuentra organizado en nueve fases:

1. Recolección y transporte de RP
2. Almacenamiento y acopio de RP
3. Reciclado de RP industriales
4. CO-procesamiento de RP industriales
5. Tratamiento de RP industriales
6. Incineración de RP industriales
7. Confinamiento de RP industriales

Marco de referencia

8. Aprovechamiento de RP industriales
9. Reutilización de RP industriales (SEMARNAT, 2020, p. 149)

El mal manejo y disposición de los RP en sitios sin las medidas de seguridad suficientes como terrenos baldíos y traspacios industriales se debe a la falta de infraestructura suficiente en México, por lo que es de vital importancia la creación de infraestructura en las zonas, donde se localicen las fuentes generadoras y los tipos de residuos peligrosos generados en mayores volúmenes (SEMARNAT, 2020).

Para llevar a cabo un manejo integral de los residuos peligrosos en México, es necesario primero implementar estrategias de acciones preventivas y correctivas sobre el control en las fuentes generadoras y la infraestructura con que se cuenta, Dentro de estas estrategias, se pueden nombrar las siguientes:

1. Distinguir entre grandes, pequeños y microgeneradores de residuos peligrosos.
2. Identificar sectores que contribuyan con los mayores volúmenes o peligrosidad de residuos peligrosos o que generen los residuos con potencial de valorización.
3. Reconocer las fuentes generadoras y las empresas involucradas en el manejo de los residuos peligrosos sujetos a planes de manejo.
4. Identificar la infraestructura y capacidad instalada para reutilizar, reciclar o co-procesar los residuos peligrosos.
5. Localizar las zonas de la República en las cuales se deba poner énfasis en la creación de infraestructura, acorde con el tipo de fuentes generadoras y tipos de residuos peligrosos generados en mayores volúmenes. (Avedoy, 2006, p.69).

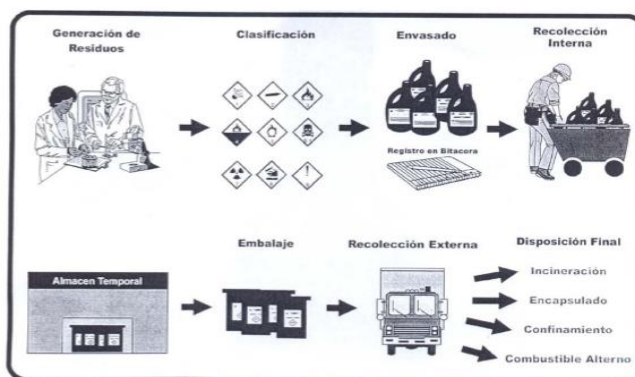
Procedimientos de manejo de RP químicos

A través de un programa de manejo adecuado de RP, se establecen las estrategias y procedimientos propios para aprovechar y disponer de manera ambientalmente segura los residuos peligrosos (Gavilán, Gavilán, Cano y Alcántara, 2012).

En la Figura 1 se muestra el procedimiento que sigue la generación de residuos peligrosos en laboratorios, los cuales deben de pasar por diferentes etapas desde su generación hasta su disposición final para su manejo integral.

Figura 1

Procedimiento para la disposición final de un RP.



Fuente: Cabrera., 2011.

Existen seis puntos principales en el manejo de cualquier tipo de residuos que se dividen de la siguiente forma:

1. Reducción en la fuente: descripción de las acciones en la fuente para una menor generación de residuos o residuos de menor peligrosidad.
2. Separación: describir las actividades, medidas, procedimientos, equipos, instalaciones y/o señalamientos para asegurar el manejo separado de los residuos dadas sus características fisicoquímicas, peligrosidad e incompatibilidad.
3. Valorización: describir las acciones para el aprovechamiento de los residuos indicando el sitio donde se realiza y el responsable de este.
4. Tratamiento: describir los procesos de tratamiento cuando sea el caso.
5. Almacenamiento: indicar las condiciones en las que se realizará para evitar la liberación de contaminantes al ambiente.
6. Disposición final: señalar las condiciones en que ésta se llevará a cabo con el fin de evitar la liberación de contaminantes al ambiente.

Para que el manejo sea considerado “sustentable” debe cumplir con los criterios que caracterizan los planes de manejo mencionados en la LGPGIR:

- ✚ Ambientalmente efectivo: para reducir las cargas ambientales sobre el sistema.
- ✚ Económicamente viable: con un costo aceptable para todos los sectores de la comunidad.

Marco de referencia

- ✚ Socialmente aceptable: para asegurar la participación de la sociedad (Chávez, 2018, p.25).

6.1.2 Tratamientos aplicados a residuos químicos

La USEPA (United States Environmental Protection Agency, o Agencia Mediambiental de EE. UU.) entiende como tratamiento de residuos a cualquier método o procedimiento que modifique el carácter químico, físico y/o biológico de un residuo con el fin de disminuir su peligrosidad y se convierta en inerte.

El tratamiento de los residuos químicos depende de los compuestos que lo integran, por lo que es importante realizar una clasificación de acuerdo en sus distintos grupos funcionales como halogenados, metales pesados, aceites, etc. Los tratamientos se pueden dividir en tratamientos biológicos y procesos fisicoquímicos (Beltrán, Berrio, Cardono y Agudelo, 2012).

Los tratamientos físicos se emplean principalmente para el pretratamiento de los residuos y también se pueden usar como complemento de los métodos químicos y biológicos. Los tratamientos químicos de residuos consisten en provocar cambios en su naturaleza química, mediante tecnologías y reactivos químicos para producir reacciones y convertirlos en otras sustancias que no sean peligrosas para el medio ambiente y salud, o que permitan su reutilización en otros procesos (Castells., 2012).

Existe una gran variedad de tratamientos biológicos eficaces para la remoción de compuestos orgánicos biodegradables, estos pueden ser clasificados como aeróbicos, anaeróbicos y anóxicos, a pesar de ofrecer una buena eficiencia estas reacciones ocurren en un tiempo muy largo, por lo cual estas tecnologías pueden ser combinadas con otras para reducir el tiempo y mejorar su eficiencia (Beltrán *et al.*, 2012).

A nivel nacional se cuenta con 65 empresas autorizadas en el rubro de tratamiento de residuos, con una capacidad total instaladas de 6,962,036 toneladas aproximadamente, vigente al 15 de febrero del 2019. Las entidades con una capacidad mayor a 100 mil toneladas instalada son: Nuevo León, Coahuila de Zaragoza, Tabasco, Estado de México, Ciudad de México, Guanajuato y Veracruz (SEMARNAT, 2020).

La Tabla 1 menciona una descripción general de las tecnologías o procesos más utilizados para el tratamiento o pretratamiento de residuos.

Tabla 1

Resumen de las técnicas de tratamiento y reciclaje de residuos.

Técnica	Denominación	Principio
	Decantación	Separación por gravedad de materias sedimentables.
	Floculación	Separación por gravedad. Unión de burbujas de aire con ciertas sustancias con cambio de densidad.
	Centrifugación	Separación por acción de la fuerza centrífuga.
	Filtración	Eliminación de sólidos suspendidos en líquido.
	Destilación	Evaporación de algún componente de una mezcla líquida.
	Ósmosis inversa	Separación de sustancias a través de membranas semipermeable.
Físicas	Electrodialisis	Separación de sustancias por cargas eléctricas q través de membranas semipermeables.
	Intercambio iónico	Absorción reversible de iones mediante un sólido insoluble.
	Adsorción	Fijación física de una sustancia de elevada superficie específica.
	Arrastre por vapor	Flujo de vapor o aire a contracorriente a través del fluido.
	Extracción con disolventes	Transferencia de un medio a un disolvente
	Fotólisis	Descomposición mediante radiación luminosa
	Neutralización	Transferencia de una solución ácida o básica en neutra al añadir base o ácido, respectivamente.
Químicas	Precipitación química	Transformación de un contaminante en un sólido insoluble.
	Oxidación química	Transformación de contaminantes a formas más oxidadas y peligrosa.
	Reducción química	Transformación de contaminantes a formas menos oxidadas y menos peligrosas.

Fuente: Castells, 2012.

Tabla 2

Resumen de las técnicas de tratamiento y reciclaje de residuos (continuación).

Técnica	Denominación	Principio
Químicas	Decloración	Uso de reactivos para eliminar el cloro o cambiar su estructura.
	Oxidación por agua supercrítica	Dstrucción de contaminantes con agua a presión y temperatura superiores a su punto crítico.
	Oxidación por aire húmedo	Inyección de aire con adición de O ₂ a alta temperatura y presión.
	Rotura ácida	Adición de ácido para romper emulsiones.
Biológicas	Fangos activados	Descomposición de sustancias orgánicas biodegradables: DBO.
	Tratamiento por bacterias	Separación de metales mediante bacterias.
	Compostaje	Mineralización de sustancias orgánicas.
	Metanización	Transformación de compuestos orgánicos en CH ₄ .
	Estabilización	Atenuación de la carga tóxica por reacción química.
Fisicoquímicas	Solidificación	Mezcla con aditivos para dar consistencia.
	Encapsulación	Confinamiento de contaminantes en el interior de un medio protector.
	Ceramización	Inserción de contaminantes en una matriz silicatada.
	Vitrificación	Disolución e integración de contaminantes en una matriz vítrea.
Energéticas	Pirolisis	Degradación térmica de residuos en ausencia de oxígeno.
	Gasificación	Transformación de residuos en gases combustibles.
	Incineración	Combustión de residuos con exceso de aire.
	Evaporación	Calentamiento para eliminar fases evaporables

Fuente: Castells, 2012.

6.1.3 Efectos nocivos a la salud humana y al ambiente por los residuos químicos

El contacto o exposición a sustancias químicas con propiedades tóxicas pueden causar riesgos tóxicos que se definen como la probabilidad de que se presenten efectos nocivos en el ambiente o salud humana (Ize, Zurk y Bracho, 2010). Estos efectos dependerán de su magnitud, frecuencia y duración. De igual forma depende de la capacidad o vulnerabilidad de los seres humanos que involucra diversos factores como las características genéticas, edad, fisiología, nutrición y salud. Se consideran grupos con mayor vulnerabilidad los adultos mayores, niñas y niños, mujeres embarazadas y lactantes (Mendoza y Ize, 2017).

En el desarrollo de las diferentes prácticas de los laboratorios de estudio se han identificado la utilización de reactivos e indicadores en mayor frecuencia como lo son: el ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, hidróxido de sodio, dicromato de potasio, cromato de potasio, anaranjado de metilo, negro de ericromo T., fenolftaleína, entre otras. Al final de la práctica se mezcla los residuos los que genera que estos adquieran mayor peligrosidad con riesgos potenciales a la salud humana y ambiental. En la Figura 2 se pueda observar las afectaciones a la salud humana ocasionadas por el contacto de los residuos químicos de los laboratorios identificados con más presencia.

Los residuos de ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, hidróxido de sodios, etc. poseen características corrosivas que pueden quemar o destruir los tejidos del cuerpo por contacto, mientras más fuerte o concentrada sea la sustancia corrosiva, y la exposición prolongada, incrementa la gravedad de las lesiones generadas, pueden causar desde irritaciones cutáneas, ocular y en vías respiratorias, las cuales se denominan quemaduras químicas y si son graves pueden ocasionar la muerte. Algunas y pueden causar otros efectos nocivos para la salud incluso en pequeñas dosis pueden provocar náuseas, vómitos, dolores de cabeza, pérdidas de conocimiento e incluso la muerte. Los residuos corrosivos son altamente tóxicos por inhalación, los vapores o la neblina en el aire irritan las membranas mucosas de la nariz, la garganta y los pulmones (Ramírez, Lema y García, 2003).

Los compuestos tóxicos persistentes (CTP), como plaguicidas organoclorados, las dioxinas, los furanos, bifenilos policlorados, metales y metaloides, compuestos organohalogenados, sustancias volátiles, etc. tienen efectos tóxicos como: neurotoxicidad, disruptiva endocrina, efectos en la reproducción, efectos cardiovasculares y carcinogénesis (Ibarluzea, Aurrekoetxea, Porta, Sunyer y Ballester, 2016).

Se ha reportado que sustancias químicas como el ácido sulfúrico, el dicromato de potasio y el cromato de potasio pueden producir cáncer en particular cáncer de pulmón. También pueden

Marco de referencia

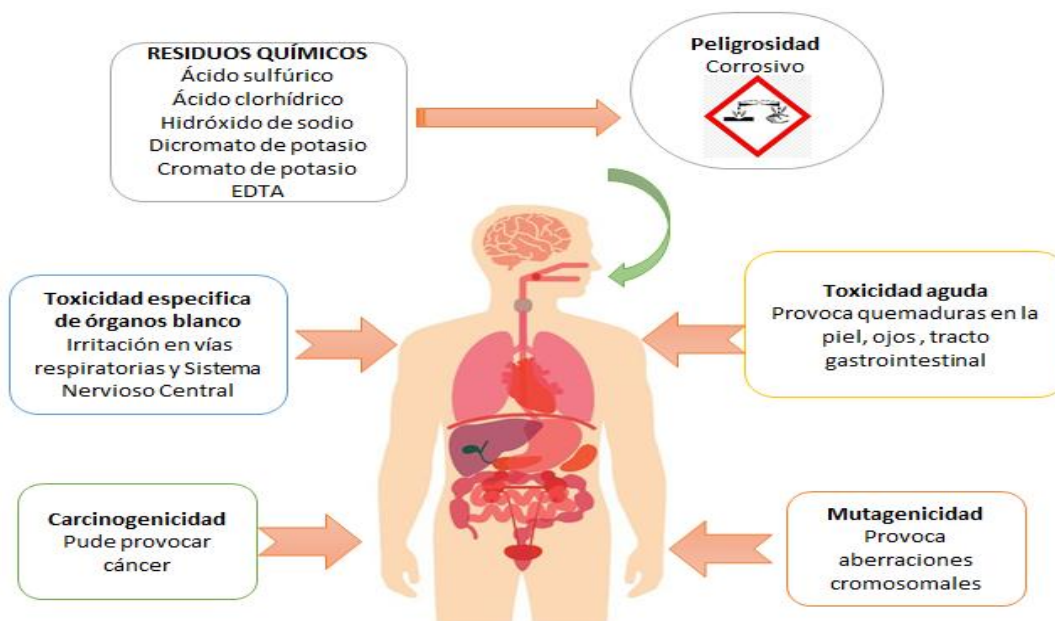
provocar mutagenicidad provocando aberraciones cromosomales. Esto ha sido reportado en sus hojas de seguridad de cada sustancia química.

La liberación al medio ambiente de las sustancias peligrosas, así como su exposición a los seres humanos o a organismos, pueden ocurrir en cualquier fase de su ciclo de vida, por emisiones en el aire, así como descargas al agua por derrames o fugas (Cuenca y Nava, 2000).

El vertido de sustancias químicas cada vez difíciles de tratar como ácidos, compuestos orgánicos (disolventes, colorantes, plásticos, etc.), contaminantes emergentes (antibióticos, fármaco, hormonas, etc.), metales tóxicos, etc. dentro de los cuerpos receptores de agua han afectado fuertemente la calidad del recurso hídrico. Una manera de evaluar y comunicar la calidad de un cuerpo de agua es mediante índices ambientales, que se utilizan para medir los cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas, individualmente o en forma grupal. Los parámetros fisicoquímicos dan una información extensa de la naturaleza de las especies químicas del agua y sus propiedades físicas, los métodos biológicos aportan información sobre la influencia de los parámetros fisicoquímicos sobre la vida acuática, por lo que muchos investigadores recomiendan la utilización de ambos en la evaluación de su calidad (Orozco, Pérez, Gonzales, Rodríguez y Alfayate, 2005).

Figura 2

Impactos a la salud humana por descargas de residuos químicos.



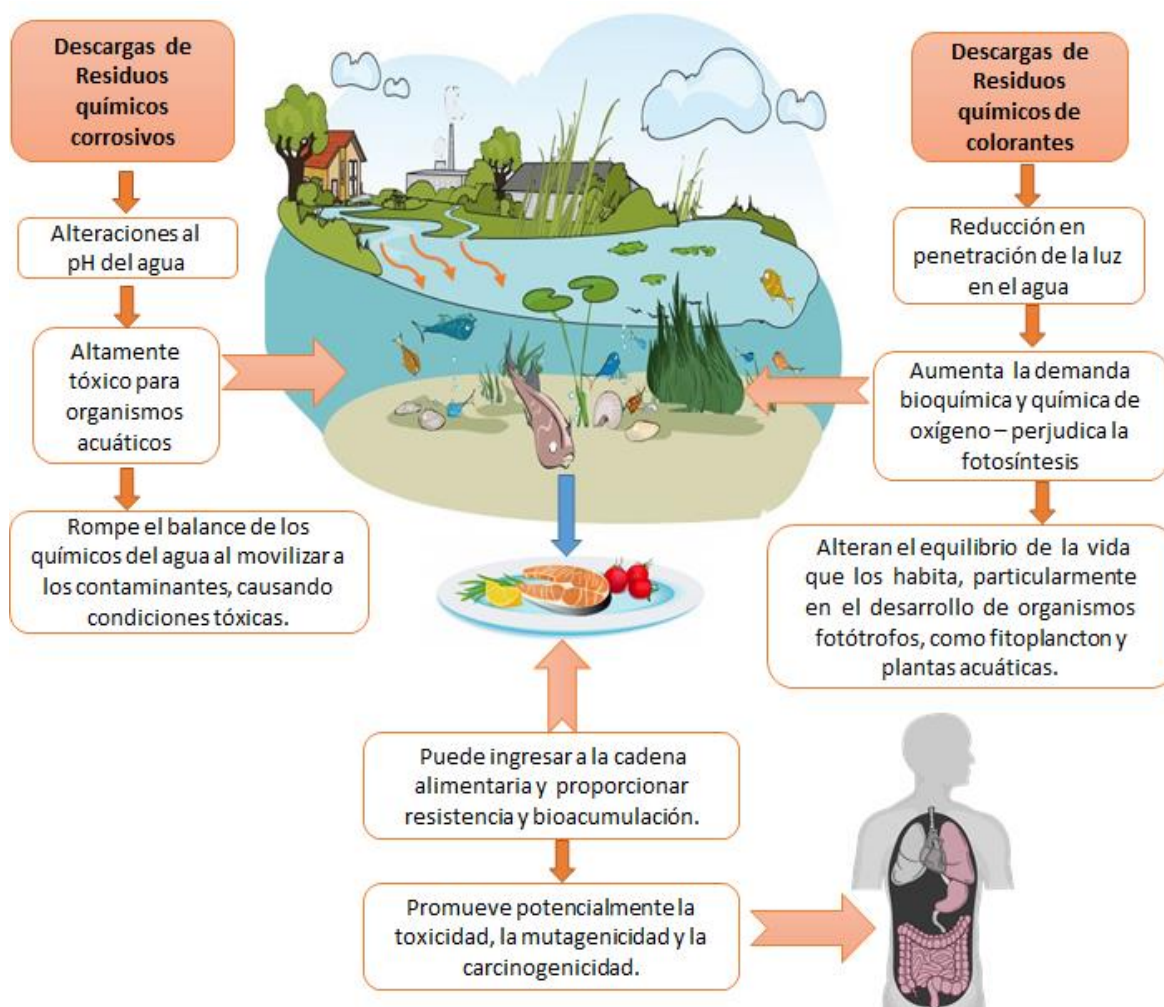
Nota: Impactos a la salud humana derivados del contacto con residuos químicos peligrosos identificados en los laboratorios de estudio. *Fuente:* Elaboración propia.

Marco de referencia

En la Figura 3 se observa un esquema de las afectaciones al medio acuático por el vertido de residuos químicos peligrosos como sustancias corrosivas y compuesto orgánicos complejos (colorantes) que generan alteraciones en las propiedades fisicoquímicas del agua. Las alteraciones al pH son importantes porque interviene en los equilibrios de diferentes sustancias químicas en el agua y en la movilidad de contaminantes. Para pH bajo por ejemplo tiene un mayor efecto en la solubilidad de los metales. El intervalo de pH idóneo para la vida es muy estrecho y crítico en aguas naturales se encuentra en un rango comprendido entre 6 y 9 el cual ofrece protección a la vida de los peces de agua dulce (Cirelli, 2012).

Figura 3

Impactos ambientales de las descargas de residuos químicos.



Fuente: Elaboración propia.

Marco de referencia

También las descargas de residuos químicos con colorantes ocasionan una disminución de la penetración de la luz solar degradando la calidad de los cuerpos de agua. Una de sus afectaciones es el aumento en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO) que son parámetros utilizados para medir el grado de contaminación. La DBO es la cantidad de oxígeno necesario para degradar biológicamente la carga orgánica y la DQO es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en CO_2 y H_2O . Cuanto mayor es la DBO y DQO, más contaminada está el agua. Para aguas naturales la DBO es del orden de 10 mg/L y para aguas residuales urbanas tratadas 500 mg/L (Cirelli, 2012).

Otra afectación directa se da en la fotosíntesis al inhibir el crecimiento de las plantas acuáticas principalmente fotótrofos o productores primarios de la cadena alimenticia como fitoplancton y plantas acuáticas afectando el equilibrio de la actividad biológica de la flora y fauna acuática (Bojalil, Hernández y Segura, 2021).

Las sustancias tóxicas como las aminas aromáticas que se generan de los residuos de colorantes azoicos que al entrar a nuestro cuerpo y reaccionar con enzimas se liberan y pueden acumularse fisiológicamente a lo largo de la cadena trófica debido a su resistencia y bioacumulación. Los colorantes orgánicos son altamente tóxicos y potencialmente cancerígenos que se han relacionado con una variedad de enfermedades humanas y animales pueden causar enfermedades desde dermatitis hasta problemas con el sistema nervioso central (Al-Tohamy *et al.* 2022).

6.1.4 Contaminación del agua por residuos químicos

La composición química del agua es precisa (H_2O) por lo que la identificación de compuestos ajenos es más fácil de detectar. El agua rara vez se encuentra en forma pura y dependiendo de su origen y el uso que se le dé puede tener otros compuestos. Se considera como contaminante al exceso de materia o energía (calor) que provoque daños o que perturbe a los seres vivos o bienes negativamente Por lo que no existe una división precisa entre las aguas contaminadas y no contaminadas, esto dependerá del uso, las exigencias higiénicas y del grado de avance de la ciencia y tecnología para determinar los efectos y medir los contaminantes (Cisneros, 2001).

El agua residual se define como aquella que ha sido utilizada en cualquier uso beneficio. El conocimiento de su naturaleza es fundamental para el diseño, operación, y control de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. En general las aguas residuales se pueden agrupar

Marco de referencia

en aguas residuales domésticas, industriales no caracterizadas y las comerciales propias del sistema de alcantarillado (Sierra, 2011).

De acuerdo con la naturaleza de los contaminantes, estos se pueden clasificar en:

- ✚ Químicos: estos contaminantes pueden provenir de diferentes vías como aguas residuales municipales, derrames de petróleo, desechos líquidos industriales, etc. Producen efectos diversos y pueden ser de origen natural o antropogénico. Algunos son desechados de forma directa, otros se forman por la reacción entre diferentes compuestos en el agua y otra fracción pequeña se forma durante su tratamiento (Cisneros, 2001). En donde entrar los organoclorados (tetracloruro de carbono, cloroformo y algunos pesticidas como el DDT) que se forman durante la desinfección del agua con cloro. Habría que mencionar los trihalometanos (THMs), que se forman por la interacción de los desinfectantes a base de cloro con materia orgánica. Los THMs, son compuestos carcinógenos para el ser humano. Es por esto por lo que hay que mantener la cantidad de cloro residual dentro de unos límites permisibles para la salud humana (Zafra, 2008).

- ✚ Biológicos: son microorganismos que pueden provocar enfermedades en el hombre u otras especies. Se estima que el 80% de todas las enfermedades, y más de un tercio de los fallecimientos en países en vías de desarrollo, se debe al consumo de agua contaminada. Las enfermedades más comunes en el hombre son la tifoidea, la salmonelosis, disentería, cólera y helmintiasis (Cisneros, 2001).

- ✚ Físicos: son alteraciones en sus propiedades físicas, como temperatura, color, olor, etc. (Cisneros, 2001).

En la Tabla 3 se muestran la clasificación de algunos parámetros de acuerdo con su naturaleza.

Tabla 3

Clasificación de algunos parámetros del agua residual.

Clase	Parámetro	
	Sólidos totales	
	Sólidos totales en suspensión	
Físico	Temperatura	
	pH	
	Color	
	Olor	
	Hidratos de carbono	
	Proteínas	
	Lípidos	Orgánicos
	Grasas, aceite	
	DBO ₅ , DQO, COT	
Químico	Alcalinidad	
	Arenas	
	Metales pesados	
	Nutrientes N, P	
	Cloruros	Inorgánicos
	Azufre	
	Sulfato de hidrógeno	
	Gases	
	Bacterias	
	Algas	
Microbiológico	Protozoos	
	Virus	
	Coliformes	

Fuente: Leyva., 2013.

En la actualidad los procesos y tecnologías que se disponen para el tratamiento de contaminantes en agua residuales son muy diversos, los tratamientos convencionales se pueden dividir en tres grupos: tratamientos primarios, secundarios y terciarios. El tratamiento primario busca eliminar sólidos suspendidos, también es usado como un pretratamiento, el tratamiento secundario tiene como finalidad eliminar los compuestos orgánicos por medio de tratamientos

Marco de referencia

biológicos que pueden ser anaerobios y aerobios, el tratamiento terciario tiene como objetivo la desinfección así como remover sustancias disueltas o con tamaños de partículas reducidas, Algunos tratamientos terciarios son la adsorción, intercambio iónico, ultrafiltración, procesos con membranas, electrodiálisis, desinfección, procesos de oxidación convencionales y procesos de oxidación avanzada (Gómez y Chacón, 2014).

En el 2019 en México se registraron 2642 plantas de tratamiento de aguas residuales en operación con una capacidad instalada de 194.73 m³/s y un caudal tratado 141.5 m³/s. El estado de Puebla cuenta con 85 plantas municipales de tratamiento de aguas residuales con una capacidad instalada de 3.52 m³/s y un caudal tratado de 3.593 m³/s. de las cuales 16 plantas utilizan el procedimiento de lagunas estabilizadoras y 14 el procedimiento de lodos activados como los métodos más utilizados (SINA-CONAGUA, 2019).

Además de los contaminantes típicos presentes en las aguas residuales domésticas (sólidos, materia orgánica, nutrientes y microorganismos), las aguas residuales urbanas pueden contener una gran variedad de sustancias químicas de origen orgánico e inorgánicas que pueden tener repercusiones en la salud y el medio ambiente por su persistencia, toxicidad y bioacumulación. Las fuentes principales son el sector industrial y urbano que pueden contener contaminantes como: metales, disolventes, fitosanitarios, plaguicidas, restos de medicamentos, drogas, colorantes etc. (Escuadra *et al.*, 2011).

Dentro de los contaminantes orgánicos industriales con mayor presencia son los colorantes sintéticos ya que la mayoría presentan una estructura moléculas complejas que requiere que sean resistentes a muchas cosas tales como la acción de detergentes. Los colorantes sintéticos son ampliamente utilizados en muchos campos como la industria textil, de papel, de curtido de pieles, procesamiento de alimentos, plásticos, cosméticos, la industria de fabricación de goma, etc. Los colorantes están formados por un grupo cromóforo responsable del color, dentro de los más comunes para este fin se encuentran los grupos quinoides, carbonilo (C=O), metilo (-CH₃), nitro y grupos azo (-N=N-). La fijación de estos sobre las telas no es 100% eficiente, por lo que los residuos son desechados al ambiente y pueden ser encontrados en concentraciones por encima de los 1500 mg/L en los líquidos en el que se descargan (Cortazar, Coronel, Escalante y Gonzáles, 2014).

De acuerdo con el Inventario Nacional de Generación de Residuos Peligrosos (INGRP) y el padrón de generadores de residuos peligrosos de la SEMARNAT, en México en el año 2017 existían 67,342 establecimientos de microgeneradores que generaron 14,197 toneladas de

Marco de referencia

residuos peligrosos, como pequeños generadores se reportaron 40,260 establecimientos e industria que generaron 116,560.91 toneladas y como grandes generadores 7,548 empresas industriales y establecimientos, que generaron 2,316,838.10 toneladas a nivel nacional (SEMARNAT, 2020).

6.1.5 Tratamientos de aguas residuales por procesos fisicoquímicos avanzados

Al utilizar métodos de tratamiento, se deben tener en cuenta las características y propiedades fisicoquímicas de las aguas residuales a tratar. El agua contaminada por las actividades humanas a menudo se puede tratar eficazmente con tratamientos químicos tradicionales (oxidación térmica, cloración, permanganato de potasio, etc.). Sin embargo, en algunos casos estos procedimientos son insuficientes para lograr la pureza legal o para tratar aguas residuales que contienen residuos nocivos, persistentes y recalcitrantes.

Por lo que se está recurriendo en el uso de las llamadas Tecnologías o Procesos Avanzados de Oxidación (TAOs o PAOs), poco utilizadas en países en vías de desarrollo, debido a los altos costos de instalación, operación y mantenimiento. La mayoría de las TAOs puede aplicarse a la remediación y detoxificación de aguas especiales, generalmente en pequeña o mediana escala. Los métodos pueden usarse solos o combinados entre ellos o con métodos convencionales, pudiendo ser aplicados también a contaminantes de aire y suelos incluso para la inactivación de bacterias y virus (Doménech, Jardin y Litter, 200, p. 73.).

Los TAOs dependen de la generación y uso de especies transitorias poderosas, principalmente el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), puede ser generado por medios fotoquímicos (incluida la luz solar) o por otras formas de energía este radical altamente oxidantes permite la destrucción de una gran diversidad de sustratos químicos orgánicos sin selectividad (Gaya y Adbullah., 2018).

Los TAOs se puede clasificar como un tratamiento terciario, que se basa en la formación de radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$) con un elevado potencial de oxidación ($E^{\circ} = 2.8 \text{ V}$), que es altamente reactivo y de gran efectividad para el proceso de oxidación de compuestos orgánicos principalmente por abstracción de hidrógeno, mediante la generación de radicales orgánicos libres, disponibles para reaccionar con oxígeno molecular y formar peroxiradicales (Malato, 2004).Las TAOs se pueden clasificar en procesos no fotoquímicos y procesos fotoquímicos como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4

Clasificación de tecnologías avanzadas de oxidación (TAOs).

Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
Ozonización en medio alcalino (O_3/OH^-)	Fotólisis directa
Ozonización con peróxido de hidrógeno (O_3/H_2O_2)	Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)
Procesos Fenton (Fe^{2+}/H_2O_2)	UV/peróxido de hidrógeno
Oxidación electroquímica	UV/ O_3
Tratamiento con haces de electrones	Foto-Fenton y relacionadas
Plasma no térmico	Fotocatálisis heterogénea
Descarga electrohidráulica - Ultrasonido	Radiólisis
Oxidación en agua sub-/y supercrítica	

Fuente: Doménech et al., 2001.

Dentro las TAOs, aquellas que son capaces de aprovechar la radiación solar son de especial interés, ya que se reducen los costos por el gasto energético de lámparas, al ser sustituidas por el sol. Uno de estos procesos es la fotocatalisis que implica la combinación de la fotodegradación con catalizadores químicos. Ambos luz y catalizador son necesarios para alcanzar o acelerar una reacción química. (Garcés, Mejía y Santamaria, 2004).

6.1.6 Fotocatálisis heterogénea

La fotocatalisis heterogénea se define como el uso de un sólido semiconductor como los óxidos metálicos: TiO_2 , ZnO , CeO_2 , ZnO_2 etc. que forma una suspensión estable que bajo irradiación estimula una reacción en el interfaz sólido/líquido o sólido/gas. A diferencia de la fotocatalisis homogénea donde el catalizador está disuelto en el agua que contiene los contaminantes a tratar, por lo que todos los elementos que intervienen en el proceso se encuentran en la misma fase. Por definición, en ambos casos, el catalizador debe de poder ser reutilizado después de actuar en el sistema de oxidación-reducción sin sufrir cambios significativos (Acosta, 2009, p. 22).

El proceso de fotocatalisis heterogénea se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante (visible o UV) por un sólido (fotocatalizador), que normalmente es un semiconductor de banda ancha. En la región de interfaz entre el sólido excitado y la solución, ocurren reacciones que destruyen o eliminan los contaminantes sin cambios químicos en el fotocatalizador. La

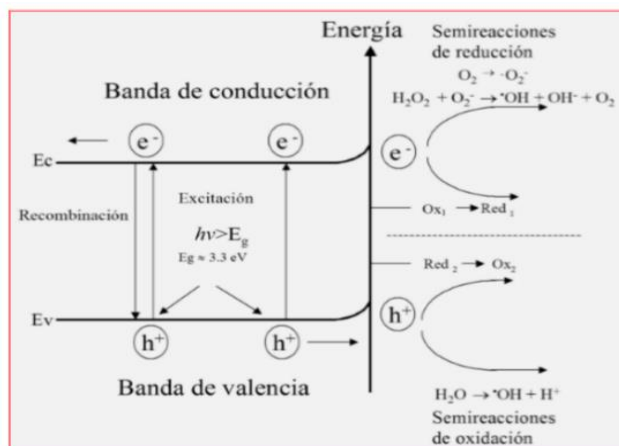
Marco de referencia

excitación de un semiconductor puede realizarse de dos formas: por excitación directa del semiconductor, haciendo que absorba los fotones utilizados en el proceso, y por excitación inicial de moléculas adsorbidas en la superficie del catalizador, la que a su vez son capaces de inyectar cargas (electrones) en el semiconductor, en un proceso denominado sensibilización (Sun y Xu, 2009).

La formación de los radicales libres puede ocurrir cuando se transfieren electrones del estado excitado de una molécula orgánica al oxígeno molecular, generando el radical superóxido (O_2^-), o hacia otros reactivos químicos como el ozono o el peróxido de hidrógeno, produciendo radicales hidroxilos ($\cdot OH$). Los métodos basados en la radiación solar utilizan normalmente radiación ultravioleta (UV) en particular UV-C de 210-230 nm debido a la mayor energía de sus fotones (Garcés *et al.*, 2004) cómo se ilustra en la Figura 4.

Figura 4

Esquema de los procesos fundamentales en fotocatalisis heterogénea.



Fuente: Gelover, 2013.

El método fotocatalítico tiene como una de sus principales aplicaciones la oxidación fotocatalítica para efectuar la mineralización parcial o total de contaminantes en fase gaseosa o líquida a sustancias esenciales como CO₂, H₂O, NO₃⁻, PO₄³⁻ e iones de haluro. Esta radiación es absorbida por las moléculas para alcanzar estados de excitación en determinado tiempo y así experimentar reacciones (Gaya y Adbullah, 2018).

Entre las ventajas de la fotocatalisis en el tratamiento de aguas residuales se destaca por ser una operación sencilla, muy eficiente en la degradación de compuestos orgánicos persistentes no-biodegradables, alta eficiencia en la eliminación de carga microbiana, flexibilidad en el diseño,

uso de espacios pequeños para su montaje, aprovechamiento de la energía solar y no se generan lodos en el proceso (Doménech *et al.*, 2001).

En un fotocatalizador el espectro de energía de los electrones en un cristal ideal consiste en grupos de estados de energía llenos y estados de energía vacíos, llamados también bandas de valencia (B.V.) y bandas de conducción (B.C.) respectivamente. Entre estas bandas de energía existe una zona en la que no es posible que permanezca un electrón por falta de estados de energía, a esta zona se le denomina Band gap (banda prohibida o ancho de banda óptico), dependiendo de este valor dependen las características electrónicas del material. La transferencia interfacial de las cargas, que conduce a la oxidación de un compuesto orgánico por el hueco, puede producirse por cualquiera de los siguientes caminos: i) transferencia directa del hueco a la sustancia adsorbida sobre el fotocatalizador, ii) a través de especies intermediarias fuertemente oxidantes, como el $\bullet\text{OH}$ o superóxido (O_2^-) formados respectivamente por oxidación de agua o reducción de oxígeno adsorbidos sobre el catalizador, iii) ambos caminos en simultáneo (Rodríguez, Candal, Solís, Estrada y Blesa, 2005, p. 135).

El TiO_2 es uno de los óxidos metálicos más estudiados debido a su actividad fotocatalítica y propiedades al ser considerado no tóxico, resistente a la corrosión y biocompatible. Las reacciones en la superficie en presencia de radiación UV, producen en especies reactivas como electrones (e^-) y huecos (h^+), que a su vez permiten las reacciones de reducción y oxidación, en el medio circundante. Estos procesos pueden utilizarse para la remediación ambiental. Sin embargo, a escala industrial aún necesitan mejorar la eficiencia de las reacciones fotocatalíticas en la superficie, que dependen de los mecanismos de transferencia de masa, cargas y iones (Nevárez, Espinoza, Quiroz y Bunsho, 2017, p.45).

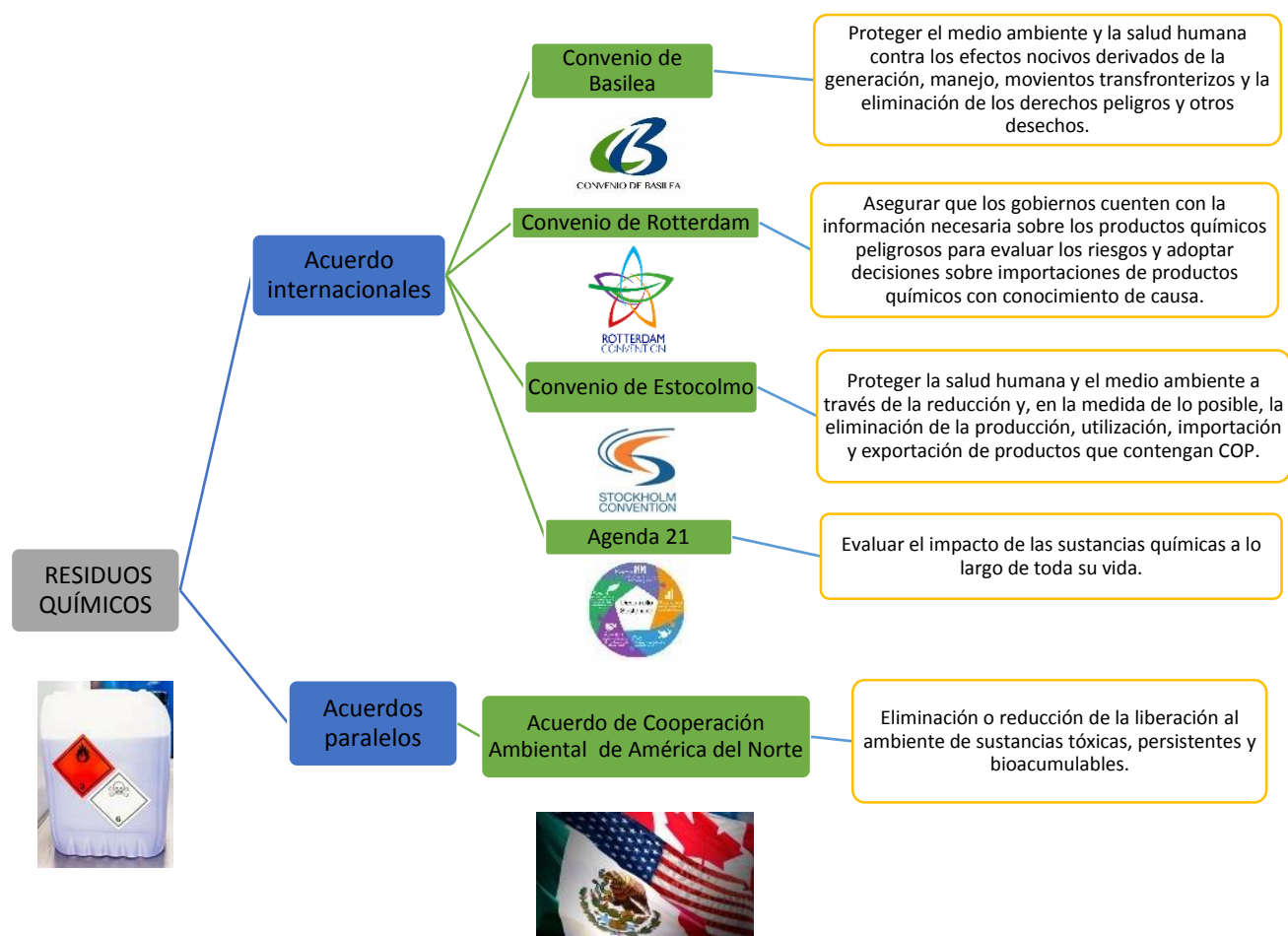
6.2 Marco legal

6.2.1 Internacional

En la Figura 5 se muestra un esquema con la legislación internacional referente a la gestión de los residuos químicos considerados como peligrosos de acuerdo con el Perfil Nacional de Sustancias Químicas (INECC, 2017).

Figura 5

Legislación internacional sobre la gestión de residuos químicos peligrosos.



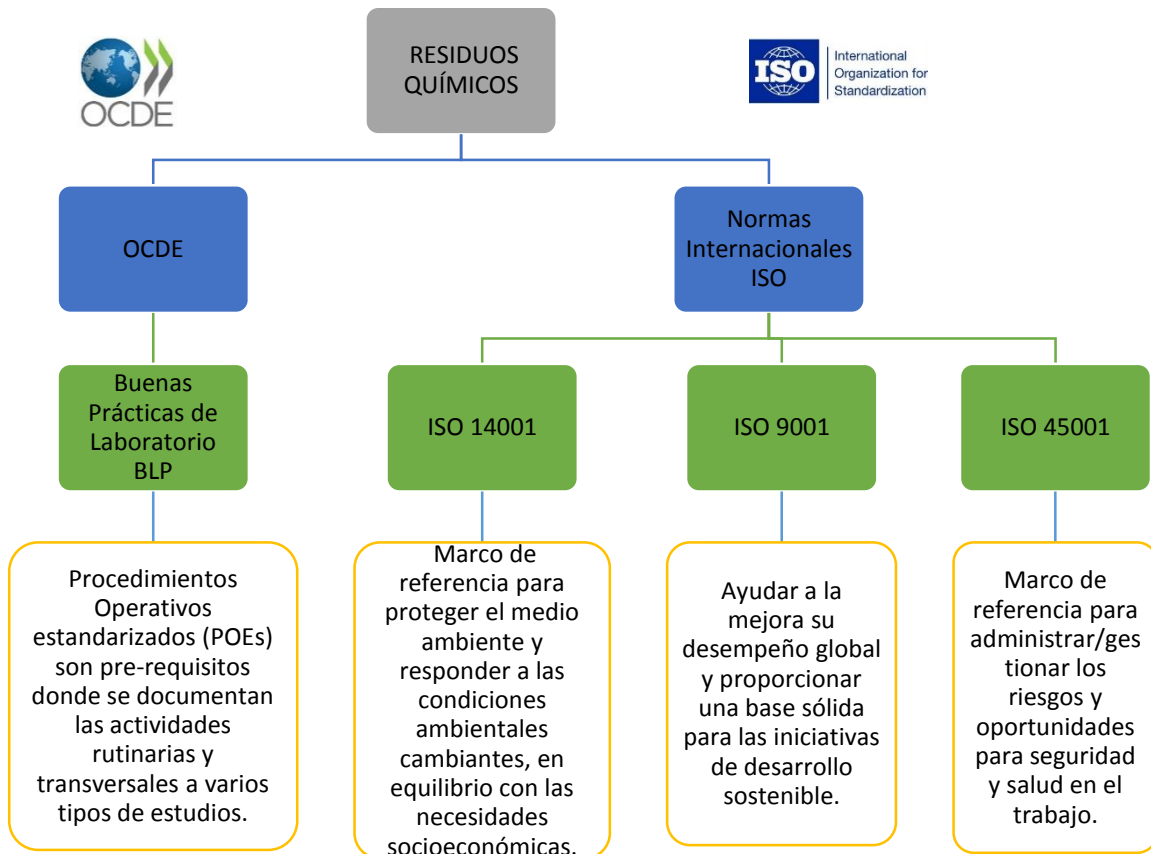
Fuente: Elaboración propia.

Marco de referencia

En la Figura 6 se describen normas internacionales donde se incluyen la gestión de los residuos para el desarrollo de las organizaciones y el cuidado de los recursos y medio ambiente dentro de los procesos de producción (Organización Internacional de Normalización, 2015).

Figura 6

Normas internacional sobre la gestión de residuos químicos.



Fuente: Elaboración propia.

Derivado de la integración de México a los acuerdos internacionales se han desarrollado leyes nacionales y normas oficiales mexicanas donde se establecen los lineamientos para el manejo de los residuos que pueda tener algún impacto para la salud humana y el medio ambiente con correspondencia nivel estatal, municipal.

6.2.2 Nacional

La Constitución de los Estados Unidos Mexicanos (art. 4, párrafo quinto) dice: Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley.

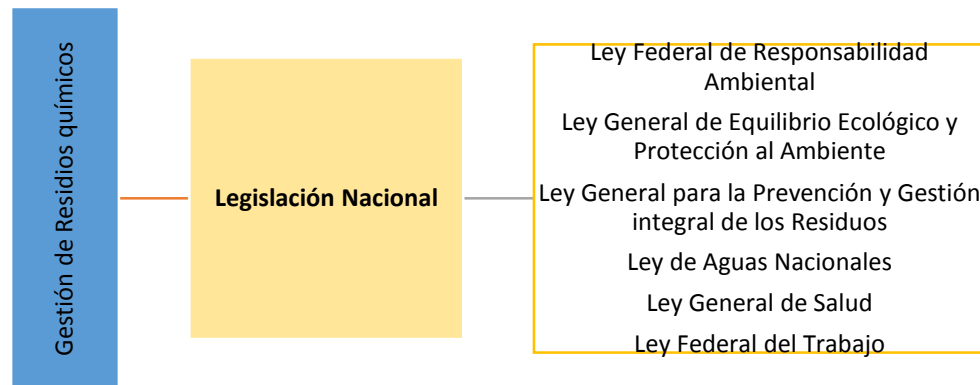
- ✚ El Congreso de la Unión expide la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (LRA), la cual se publicó en el Diario Oficial de la Federación el 7 de junio de 2013, entra en vigor un mes después el 7 de julio del mismo año. Se crea con el objeto de regular la responsabilidad ambiental que nace de los daños ocasionados al ambiente, así como la reparación y compensación de dichos daños; y que viene a complementar nuestras leyes ambientales.
- ✚ Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), que establece la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción.
- ✚ Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), tiene por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación.
- ✚ Ley de Aguas Nacionales, es reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en materia de aguas nacionales, regula la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la prevención de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable.
- ✚ Ley General de Salud tiene por objeto garantizar el derecho a la protección de la salud con la finalidad de la prolongación y el mejoramiento de la calidad de la vida humana, en los términos del artículo 4º constitucional. Particularmente, esta ley define los lineamientos del sistema de control y regulación sanitaria, cuyo objetivo es establecer los mecanismos de vigilancia e inspección de las actividades, los productos y servicios que impliquen un riesgo para la salud humana.
- ✚ Ley Federal del Trabajo, regula las relaciones de trabajo comprendidas en el artículo 123 de la Constitución, previene las medidas de seguridad que deben contemplarse

Marco de referencia

en el centro de trabajo donde se manejan sustancias químicas y establece los requerimientos de seguridad e higiene para garantizar un medio ambiente de trabajo adecuado que garantice el bienestar del trabajador.

Figura 7

Legislación nacional sobre la gestión de residuos químicos.



Fuente: Elaboración propia.

Normas nacionales

La SEMARNAT ha generado diferentes lineamientos de regulación técnicas de los contaminantes contenidos en aguas residuales (Tabla 4), así como los lineamientos referentes al manejo de residuos considerados como peligrosos (Tabla 5). Estas normas son de caracteres obligatorio a nivel nacional.

Tabla 5

Normas oficiales mexicanas referentes a agua residuales.

Norma	Objetivo
NOM-001-SEMARNAT-2021	Que establece los límites máximos 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.

Fuente: Elaboración propia**Tabla 6**

Normas oficiales mexicanas referentes a residuos peligrosos.


Norma	Objetivo
NOM-052-SEMARNAT-2005	Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos
NOM-053-SEMARNAT-1993	Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente
NOM-054-SEMARNAT-1993	Que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la norma oficial mexicana NOM-052-ECOL-1993
NOM-055-SEMARNAT-2003	Que establece los requisitos que deben reunir los sitios que se destinarán para un confinamiento controlado de residuos peligrosos previamente estabilizados.

Tabla 7


Normas oficiales mexicanas referentes a residuos peligrosos (continuación).

Norma	Objetivo
NOM-056-SEMARNAT-1993	Que establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.
NOM-057-SEMARNAT-1993	Que establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos.
NOM-058-SEMARNAT-1993	Que establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos
NOM-133-SEMARNAT-2005	Protección ambiental-Bifenilos Policlorados (BPCs) - especificaciones de manejo
NOM-098-SEMARNAT-2002	Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes

6.2.3 Estatal

-  Ley para la Prevención y Gestión integral de los Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial para el Estado de Puebla.

A nivel estatal solo se encuentra la ley y reglamento de gestión de Residuos Sólidos y de Manejo especial no se encuentra especificados el manejo de residuos peligrosos (químicos) debido a que estos son de jurisdicción federal.

-  Ley del Agua para el Estado de Puebla, regula la participación de las Dependencias y Entidades de la Administración Pública Estatal y Municipal en el ámbito de sus respectivas competencias, en la planeación, administración, explotación, uso, los estudios, proyectos y obras relacionadas con los recursos hídricos en el marco del desarrollo sustentable del Estado de Puebla y la mitigación de adaptación ante el cambio climático.

6.2.4 Institucional, BUAP

- ✚ Manual de Sistema Integral de Gestión Institucional (SIGI) en su Capítulo III “Planeación y control de los recursos”, inciso 6: Realizar las actividades haciendo un uso adecuado de los materiales y energía, así como la disposición correcta de los diferentes residuos.
- ✚ Programa de Manejo Integral de Residuos Universitarios bajo la coordinación de la Dirección para el Desarrollo Sustentable Universitario (DIDESU) de la BUAP establece la estructura que organiza el esquema y procedimientos de manejo de los residuos mediante un enfoque llamado “ciclo de reciclaje”. Este programa solo aborda los residuos sólidos como: residuos electrónicos, residuos de valor, residuos de potencial de reúso, residuos orgánicos. Mediante diversas estrategias de sensibilización de los principales generadores de los residuos, la separación, recolección y transporte al centro de acopio.

6.3 Tipo de investigación

Investigación de tipo descriptiva y correlacional. El estudio descriptivo tiene como objetivo la caracterización de un hecho o fenómeno para establecer su comportamiento. Mediante la correlación se busca conocer la relación o grado de asociación que existe entre dos o más conceptos, categorías o variables (Hernández, Fernández y Baptista, 2014).

VII. Metodología

7.1 Delimitación y análisis del área de estudio

7.1.1 Selección y descripción de laboratorios de Ingeniería Ambiental FIQ, BUAP

Se recabó información de la localización del área de estudio referente a la ubicación de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la BUAP y se realizó el mapa del área de estudio mediante el programa ArcGis. Se realizó una descripción general de la infraestructura donde se encuentran los laboratorios académicos de Ingeniería Ambiental de la FIQ y la selección de laboratorios generadores de residuos químicos.

7.1.2 Análisis de la generación y manejo de residuos en la FIQ, BUAP

Se recabó los datos de la generación y manejo de los residuos de la FIQ mediante el inventario de recolección de residuos por parte de la empresa particular Integración de Servicios Industriales S.A. de C.V. realizado en febrero del 2020 de la FIQ.

También se realizó el análisis de los manuales de prácticas de los laboratorios seleccionados: análisis de agua, análisis de suelo, química ambiental con laboratorio y residuos sólidos. Para obtener información sobre el manejo y disposición de los residuos que se generan derivados de las diferentes prácticas en cada laboratorio.

7.1.3 Encuesta de percepción sobre residuos químico en la FIQ, BUAP


Se realizó una encuesta a 39 estudiantes de Ingeniería Ambiental de FIQ, BUAP. Mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia cuyo objetivo fue conocer la percepción de satisfacción de los estudiantes sobre la gestión de los residuos químicos que se producen en laboratorios académicos desde su generación, clasificación, identificación, almacenamiento y disposición final. Se seleccionaron a los alumnos debido a que son los que frecuentemente permanecen en los laboratorios y están en contacto durante todo un semestre con los residuos que se producen. Se incluyó a alumnos que ya hubieran cursado una materia con laboratorio experimental de manera presencial y que contaran por lo menos con el sexto semestre cursado de su plan educativo, sin importar género y edad. Por accesibilidad se seleccionaron a los alumnos que cursaban la materia de análisis de agua en el periodo de primavera y verano 2022 en regreso a clases presenciales post pandemia.

La encuesta constó de 26 preguntas de las cuales 8 fueron preguntas abiertas relacionadas con sus datos generales y 18 preguntas de una escala del 1 al 5 donde 1 es nunca, 2 rara

vez, 3 a veces, 4 casi siempre y 5 completamente sobre su percepción del manejo de los residuos generados en los laboratorios académicos, esta encuesta se realizó por línea mediante la aplicación de Microsoft Forms.

7.2 Pruebas fotocatalíticas

7.2.1 Síntesis y caracterización de los catalizadores TiO_2 y $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

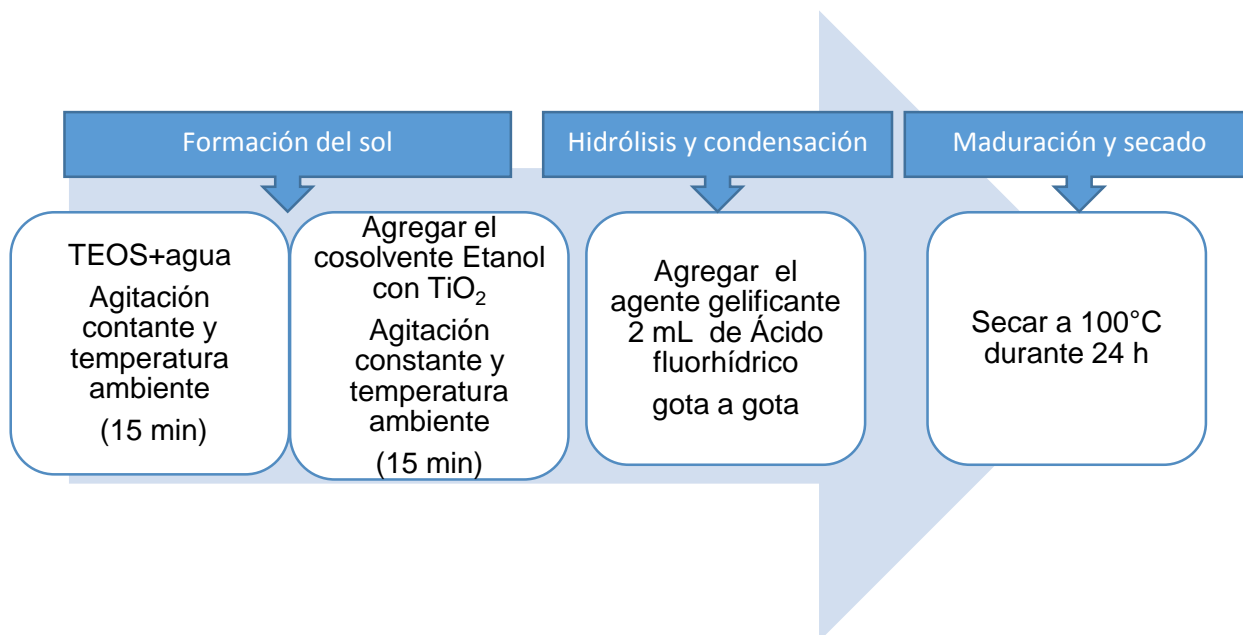
 **Síntesis e inmovilización de catalizadores:** se seleccionó como fotocatalizador el dióxido de titanio (TiO_2) comercial Degussa p25 el cual se utilizó en suspensión y se inmovilizó sobre dióxido de silicio (SiO_2), mediante el método sol-gel (Bedoya y Muñoz, 2020).

El proceso sol-gel se ha convertido en una de las técnicas más usadas para sintetizar óxidos mixtos tales como: $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$, $\text{Ag}_2\text{O-SiO}_2$, $\text{WO}_3\text{-ZrO}_2$, $\text{WO}_3\text{-TiO}_2$ y $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ (Zhang, Zhang y Chan, 2005) y (Li et al., 2005). De entre todos estos sistemas, los óxidos mixtos titanio-silicio han sido un foco notable de investigación debido a sus posibles aplicaciones en catálisis (Vives y Meunier, 2006) y (Junp y Grange 2002). El método sol-gel es el más empleado dada su capacidad para controlar las propiedades texturales y de superficie de los óxidos compuestos. El proceso sol-gel implica la transición de un sistema en estado líquido, “sol” (suspensión coloidal de partículas sólidas con tamaño nanométrico), a una fase sólida denominada “gel” (sólido constituido por al menos dos fases, con la fase líquida inmovilizada por la fase sólida). (Fernández y Guzmán, 207). Este método se basa en reacciones de hidrólisis y policondensación de un alcóxido de un metal, para producir óxidos puros y homogéneos (Zhang et al., 2005).

Para la síntesis de SiO_2 mediante el método sol-gel se utilizó como precursor y fuente de silicio el Tetraetil ortosilicato (TEOS) y como cosolvente se utilizó etanol. El proceso de síntesis consistió, en la hidrólisis del TEOS bajo las siguientes relaciones molares: 1:26:6 TEOS-agua-etanol y para la inmovilización del catalizador TiO_2 en SiO_2 una relación en peso de 1:3 (Figuras 8 y 9).

Figura 8

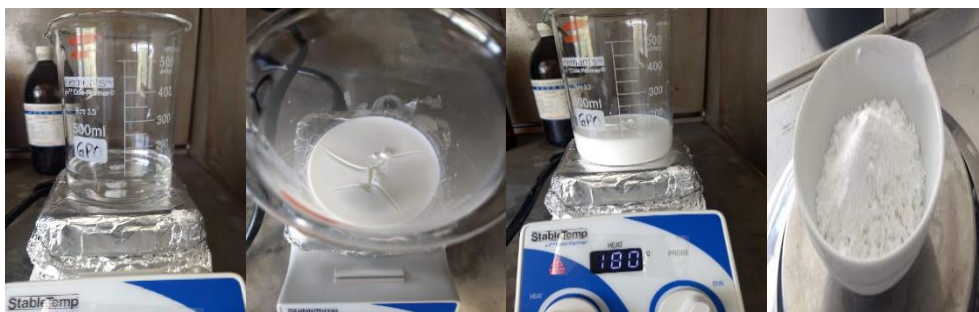
Etapas del proceso de obtención del catalizador $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9

Desarrollo del proceso de inmovilización del TiO_2 sobre el SiO_2 por el método sol-gel.



Fuente: Elaboración propia.

- + **Caracterización de los catalizadores TiO_2 y $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$:** se obtuvo la información sobre su estructura y composición mediante las técnicas de espectroscopia de energía dispersiva (EDE), microscopía electrónica de barrido (MEB), difracción de rayos X (DRX) y espectroscopia infrarroja (IR) (Mosquera, Rosas, Debut y Guerrero, 2015).

EDE: es una técnica de análisis espectral basada en la dispersión de energía de los rayos X emitidos por un elemento excitado por electrones acelerados. Se llevó a cabo con el microscopio del equipo JEOL JSM-6610 LV.

DRX: es una de las técnicas más eficaces para el análisis cualitativo y cuantitativo de fases cristalinas de cualquier tipo de material, tanto natural como sintético. La difracción de rayos X se realizó con un equipo Brucker D8 Discover, el cual posee un detector Eye Lince que mide los ángulos de incidencia desde 5° y hasta 90°.

MEB: se construyen imágenes y contrastes aprovechando la emisión de electrones de una muestra, cuando sobre ella incide un haz enfocado de electrones de alta energía. Mediante un barrido sincronizado del haz para detectar la superficie con el fin de caracterizar la morfología y determinar el tamaño de partícula. Esta técnica se llevó a cabo con un equipo JEOL JSM-6610LV que cuenta con filamento de tungsteno y que opera a 15 V.

IR: es una técnica analítica espectroscópica rápida y accesible, que proporciona abundante información cualitativa y cuantitativa acerca de la composición de las muestras. La muestra se preparó mezclando una cierta cantidad de bromuro de potasio. Esta mezcla se trituro y prensó con el fin de formar una pastilla por la que pasó el haz de luz.

Determinación del tamaño medio de las partículas: se utilizó la ecuación de Scherrer (Ecuación 1) a partir del pico más intenso obtenido del patrón de DRX de cada catalizador.

$$T = \frac{0.9 \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

Donde:

K = factor de forma. Típicamente vale 0.9, asumiendo cristales esféricos. No tiene unidades

λ = longitud de onda (normalmente en Å. El tamaño de cristal tendrá las mismas unidades)

β = (anchura a media altura del pico empleado) – (anchura a media altura del pico más próximo de un patrón medido en las mismas condiciones) (en radianes)

$\cos \theta$ = coseno del ángulo de Bragg (θ , no 2θ) al que aparece el pico empleado.

7.2.2 Degradación fotocatalítica en muestras sintéticas

Para la fase experimental inicial se prepararon muestras sintéticas debido a que no hubo acceso a los laboratorios académicos por la contingencia sanitaria a causa de la pandemia de SARS CoV-2 y no se realizaron prácticas experimentales en los laboratorios seleccionados por lo que no se generaron residuos químicos.

- ✚ **Muestras sintéticas:** se prepararon soluciones acuosas con colorantes orgánicos utilizados como indicadores en distintas prácticas de laboratorio: azul de metileno y anaranjado de metilo (Merck) a 10 ppm de las cuales se tomaron 100 mL y se aforaron a 1000 mL para obtener una concentración final de 1 ppm. (Fig.10).

Figura 10

Muestras sintéticas.



Nota: Muestras sintéticas de los colorantes anaranjado de metilo, azul de metileno y su combinación. *Fuente:* Elaboración propia.

Dentro de los colorantes orgánicos más utilizados actualmente en la industria se encuentran el azul de metileno y anaranjado de metilo, los cuales tienen una variedad de aplicaciones, como indicador ácido-base, teñido de textiles y plásticos, preparaciones farmacéuticas, entre otros (Gil, 2019). Sus estructuras químicas son complejas, el azul de metileno ($C_{16}H_{18}N_3ClS$) tiene una masa molecular 319.85g/mol y un grupo funcional amino, el anaranjado de metilo ($C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$) tiene una masa molecular de 327.34 g/mol con un grupo funcional azo. Esto hace que sean recalcitrantes, mostrando una gran resistencia a la exposición de radiación solar y al ataque químico, provocando que no sea biodegradable (Cortazar et al., 2014).

- ✚ **Pruebas de oscuridad:** para determinar si los catalizadores tienen capacidad de adsorber las moléculas de los colorantes en su estructura se mantuvieron en

Metodología

contacto con las muestras sintéticas de manera individual por 24 h en ausencia de luz. Se evaluaron los cambios en los espectros de absorción UV-Vis, al inicio y al final de las 24 h en un equipo PerkinElmer Lambda 25 UV/VIS Spectrometer.

✚ **Pruebas fotocatalíticas de muestras sintéticas:** se siguieron los pasos siguiente para la realización de pruebas de fotocatalisis heterogénea con luz solar en las muestras acuosas de azul de metileno, anaranjado de metilo y su combinación (1 ppm) se ilustran los pasos de proceso en las Figuras 11, 12 y 13.

- Se realizaron con las muestras sintéticas por duplicado con 0.05 g de los catalizadores y un blanco analítico.
- Se colocaron las tres disoluciones en matraces de bola de un 1 L sobre una base de aluminio altamente reflejante que permitió la captación de luz solar en una zona libre de sombra con una orientación norte a sur, en un ángulo aproximado a 19 °.
- Se airearon las muestras mediante un difusor de aire (O_2 1.5 L/min) para mantener el contacto constante del catalizador con la muestra y aportando oxígeno para las reacciones de óxido - reducción.
- Se tomaron alícuotas de 10 mL cada hora durante 3 horas continuas y se midió el pH.

Figura 11

Desarrollo de las pruebas fotocatalíticas para la degradación del azul de metileno.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12

Desarrollo de las pruebas fotocatalíticas para la degradación del anaranjado de metilo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13

Desarrollo de las pruebas fotocatalíticas para la degradación del azul de metileno y anaranjado de metilo.



Fuente: Elaboración propia.

✚ **Porcentaje de remoción de los colorantes:** se tomaron alícuotas cada hora para monitorear el procedimiento de fotodegradación de los colorantes, se verificó su degradación mediante espectrofotometría UV-Vis, esta técnica se llevó a cabo con un equipo PerkinElmer Lambda 25 UV/VIS Spectrometer.

La remoción de colorantes se determinó mediante la ecuación 2 (Gil, Quintero, Rincón, Rivera, 2007).

$$D\% = \frac{(c_i - c_f)}{c_i} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

c_i concentración inicial (ppm)

c_f concentración final (ppm)

Metodología

✚ **Cinéticas de velocidad de reacción:** se determinaron las velocidades de reacción de la remoción de colorantes y se calcularon las constantes del grado de la reacción mediante las ecuaciones 3-5 (Pérez, Gómez, Morales y Hernández, 2020).

$$CT = k_0 t + C_0, \quad (3)$$

$$CT = C_0 e^{-k_1 t}, \quad (4)$$

$$C_T^{-1} = -k_2 t + C_0^{-1}, \quad (5)$$

Donde:

CT concentración de colorante en un momento determinado (ppm)

C_0 constante 0 durante la degradación (ppm/h)

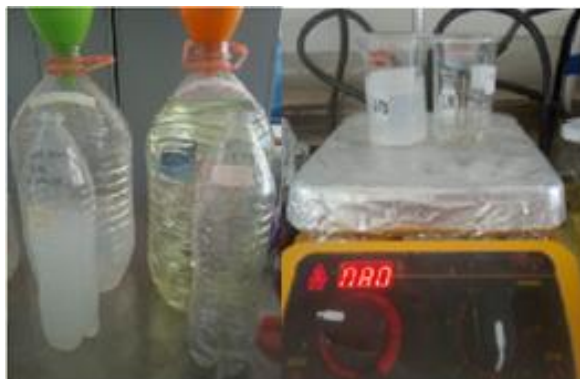
k_0 k_1 k_2 grados de las constantes

Se determinaron las constantes cinéticas para la k grado 0 mediante la concentración inversa frente al tiempo, para la k grado 1 por el logaritmo natural de la concentración frente al tiempo y para la k grado 2 la concentración inversa frente al tiempo, también se determinó el coeficiente de correlación (R^2).

✚ **Recuperación de los catalizadores:** Se realizó la recuperación de los catalizadores de las pruebas de fotocatalisis solar de las muestras sintéticas, estas se filtraron y secaron para recuperar cada catalizador como se observa en la Figura 14.

Figura 14

Filtrado y secado para recuperación de los catalizadores.



Fuente: Elaboración propia.

7.2.3 Degradación fotocatalítica de residuos químicos de laboratorio de Ingeniería Ambiental-FIQ, BUAP

✚ **Muestras de residuos químicos de la práctica de determinación de acidez y alcalinidad del laboratorio de análisis de agua:** debido al regreso a clases presenciales a partir de febrero 2022 se pudieron realizar prácticas experimentales en los laboratorios, en el periodo de primavera 2022 se realizó la recolección de los residuos de la práctica de acidez y alcalinidad, donde se ocuparon como indicadores el anaranjado de metilo y fenolftaleína y para la titulación se utilizaron ácido sulfúrico e hidróxido de sodio a una concentración 0.02 N. Se obtuvieron aproximadamente 900 mL los cuales se dividieron en tres partes y fueron aforados a 1000 mL, se utilizó 0.05 g de cada catalizador (TiO_2 y $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$) de manera separada y el blanco analítico. Se realizó la prueba de oscuridad, para posteriormente realizar las pruebas de fotocatalisis heterogénea y determinar el porcentaje de decoloración con los procedimientos descritos en el apartado 7.2.2.

✚ **Muestras de residuos combinados de las prácticas del laboratorio de análisis de agua:** Se realizó una segunda recolección de residuos derivados de las prácticas experimentales de determinación de acidez y alcalinidad, dureza y nitrógeno total en el laboratorio de análisis de agua del curso del verano 2022.

En la práctica de determinación de acides y alcalinidad se utilizó como indicadores fenolftaleína y naranja de metilo para su titulación ácido sulfúrico e hidróxido de sodio a una concentración 0.02 N; En la práctica de dureza se usó como indicador negro Eriocromo T. y para su titulación EDTA y en la práctica de nitrógeno total donde se utilizó como indicador ácido bórico y para la titulación ácido sulfúrico. Estos residuos se combinaron y se obtuvieron 1200 mL los cuales se dividieron en tres partes iguales de 400 mL a las cuales se le agregaron 0.02 g del catalizador inmovilizado $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ para realizar pruebas de oscuridad y fotocatalíticas mediante los procedimientos descritos en el apartado 7.2.2.

Se determinó el área bajo la curva de los espectros de absorción UV-Vis, durante cada hora del proceso para determinar el porcentaje de disminución de residuos químicos, usando la herramienta de integración del software Origin 2022.

7.2.4 Determinación de DQO y toxicidad aguda

- ✚ **Determinación de Demanda Química de Oxígeno (DQO):** a las muestras resultantes de las pruebas fotocatalíticas se les determinó la DQO para conocer la carga orgánica y se clasificó de acuerdo con los criterios de calidad del agua del CONAGUA (2016).

Se determinó este parámetro con un kit comercial Merck COD Cell Test (Fig. 15) mediante el método fotométrico de rango de medida de 25-1500 mg/L DQO, la prueba determina las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables con dicromato de potasio.

Figura 15

Kit y equipo para la determinación de la DQO.



Fuente: Elaboración propia.

- ✚ **Determinación de toxicidad aguda:** se determinó la toxicidad de las muestras finales obtenidas después de las pruebas fotocatalíticas, mediante el bioensayo de toxicidad aguda con semillas de alfalfa (*Medicago sativa*) como una herramienta para determinar la evaluación del riesgo ambiental (Foti, Billard y Lallama, 2005).

El bioensayo de toxicidad de semillas es una prueba de toxicidad aguda estática, donde se permiten evaluar efectos fitotóxicos en el proceso de germinación y el desarrollo de las plántulas en los primeros días de crecimiento, donde se determina el porcentaje de germinación y la inhibición o retardo de los procesos de elongación de la radícula o del hipotilo, lo que permite ponderar el efecto tóxico de compuestos solubles en concentraciones muy bajas (Romero y Cantú, 2008). El bioensayo con semillas permite evaluar la fitotoxicidad de muestras coloreadas o con elevada turbiedad de manera directa evitando un pretratamiento de las muestras, reduciendo tiempos y costos ya que no se requiere de equipos sofisticados. Para el desarrollo de estas pruebas se han empleado

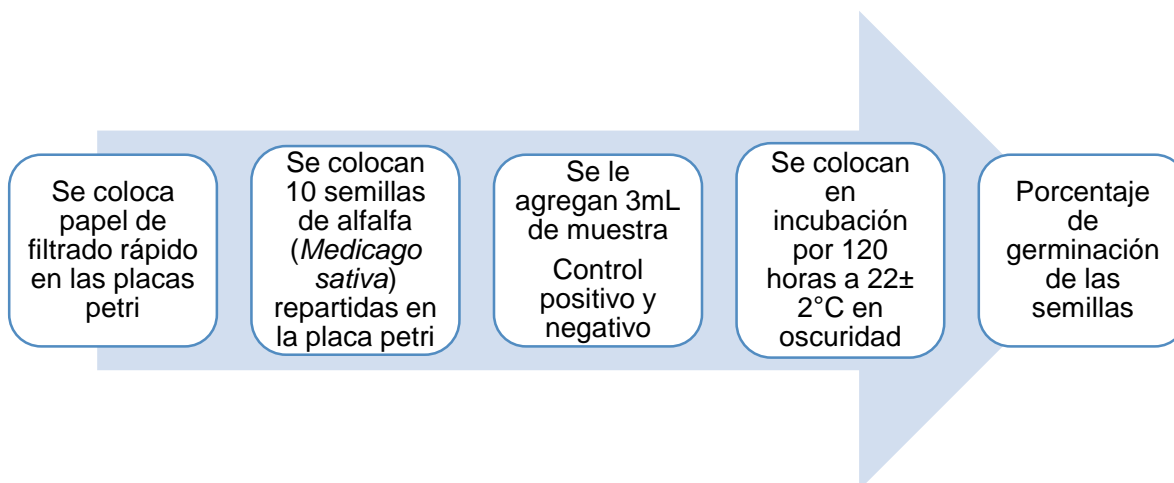
Metodología

diversas especies de semillas de importancia económica y ecológica. Todas las semillas deben ser de tipo orgánico, sin fungicidas o plaguicidas, con buen poder de germinativo. Como control de calidad de las semillas debe realizarse una prueba de viabilidad verificando que cada lote de semillas tenga un porcentaje de germinación mayor al 90%, sincronización en la germinación y baja variabilidad de elongación de la radícula e hipocotilo, caracterizando las condiciones de germinación (Sobrero y Ronco, 2004; Elizalde, Lallana, Fonti, Gómez y Fernández, 2016).

La prueba se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la Figura 16.

Figura 16

Pasos para determinación de toxicidad aguda por germinación de semillas de alfalfa (*Medicago sativa*) de muestras resultantes del proceso fotocatalítico.



Fuente: Elaboración propia.

7.3 Desarrollo del plan de gestión integral y tratamiento de residuos químicos

7.3.1 Propuesta de gestión de los residuos químicos generados en laboratorio

La gestión y el manejo de los residuos químicos generados en los laboratorios implica una serie de medidas encaminadas a reducir, reciclar, procesar y finalmente eliminar estos residuos con el fin de promover la conservación y preservación de los materiales, la salud y la protección del medio ambiente. .

Para la aplicación de la metodología se contaron con una serie de 7 pasos (Fig. 17), con actividades para el correcto manejo de los residuos peligrosos.

Figura 17

Fases para la metodología de elaboración de un plan de gestión de residuos peligrosos.



Fuente: Solano, 2015.

1. Diagnóstico: en esta etapa se describió el contexto actual y se determinaron las problemáticas con respecto al manejo de residuos peligroso y se establecieron las necesidades e intereses.

a) Identificación de los residuos

2. Segregación o clasificación: se realizó de acuerdo con el tipo de desecho al que pertenecían según sus características.

Los desechos químicos se pueden clasificar según el diagnóstico más adecuado realizado en la institución teniendo en cuenta los factores como: volumen, periodicidad de generación, compatibilidad y características fisicoquímicas.

3. Cuantificación de los residuos: una vez que el generador identificó los residuos peligrosos generados en la instalación. Se recomienda que el generador cuantificará los residuos y lleve registros de las cantidades generadas para posteriormente evaluar los avances en la gestión sobre las medidas de minimización de su generación. Según esta cuantificación de la institución esta se puede clasificar como gran, mediano, o pequeño generador y cumplir con las obligaciones de acuerdo con su categoría.

4. Registro y control: se realizó por medio de formatos en donde se lleva la información periódica del volumen de generación de residuos, de sus características, las fechas de

Metodología

entrega y fechas de salida, la unidad de trabajo, el tipo de residuo y el personal responsable de la gestión.

5. Verificación y cumplimiento: la verificación y el cumplimiento se realizaron cuando las etapas de cuantificación, registró y control coincidieron con la salida de los desechos a su tratamiento o sitio final de disposición. Es decir, si se cuantificó cierto peso o volumen de desechos; este debió coincidir con los registros y por lo tanto con el total de residuos a tratar o eliminar. La verificación se realizó con la inspección periódica de las unidades generadoras; se determinó que los residuos se clasificaron, almacenaron, rotularon y entregaron en los horarios y fechas acordadas con la supervisión de la persona o profesional a cargo del plan de manejo (Solano., 2015).

7.3.2 Propuesta del diseño de tratamiento de residuos químicos

Se realizó la propuesta del diseño de un fotorreactor para la realización de pruebas de fotocatalisis heterogénea con luz solar y el catalizador inmovilizado $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$. También se realizó el diagrama de flujo del proceso y su descripción para el tratamiento de los residuos químicos provenientes de los laboratorios de análisis de agua, análisis de suelo, química ambiental con laboratorio y residuos sólidos y peligrosos.

VIII. Resultados y discusión

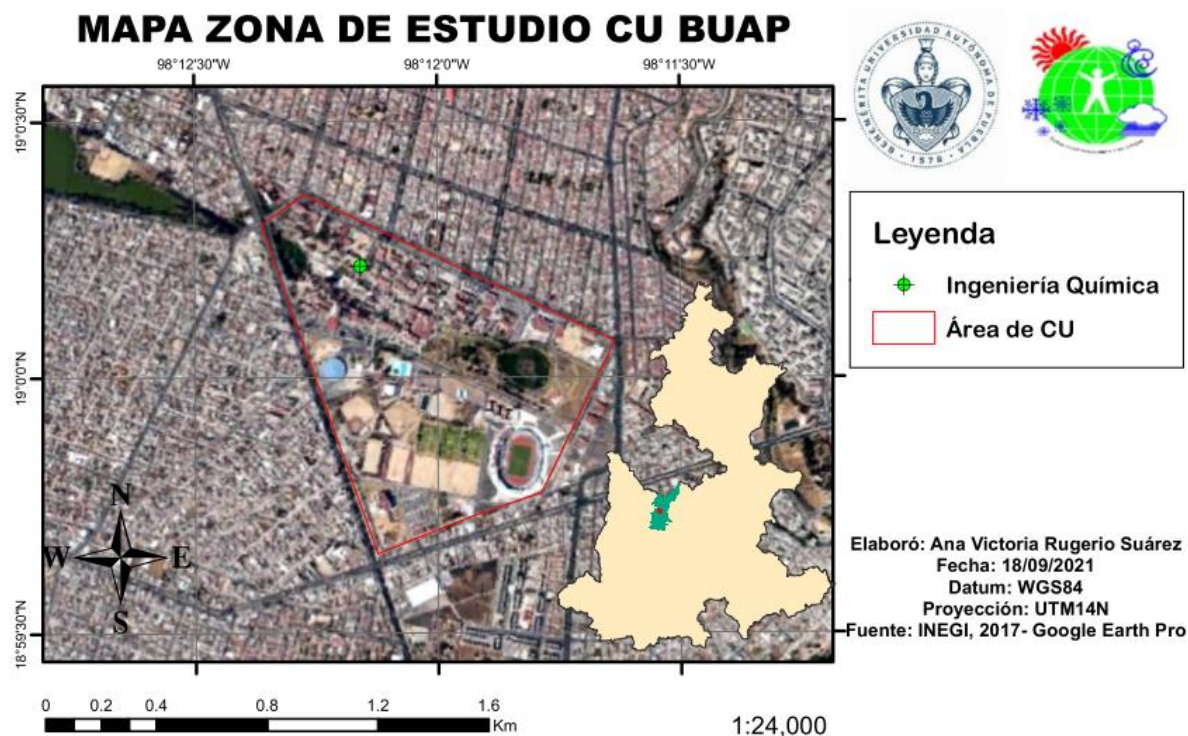
8.1 Ubicación geográfica y descripción de cuatro laboratorios

8.1.1 Facultad de Ingeniería Química, BUAP

La Facultad de Ingeniería Química BUAP se encuentra en Av. Sn. Claudio y 18 sur Col. Jardines de San Manuel, CP. 72570 Puebla, Puebla en ciudad universitaria. En la Figura 18 se encuentra en mapa de ubicación del área de estudio.

Figura 18

Mapa de ubicación de sitio del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia

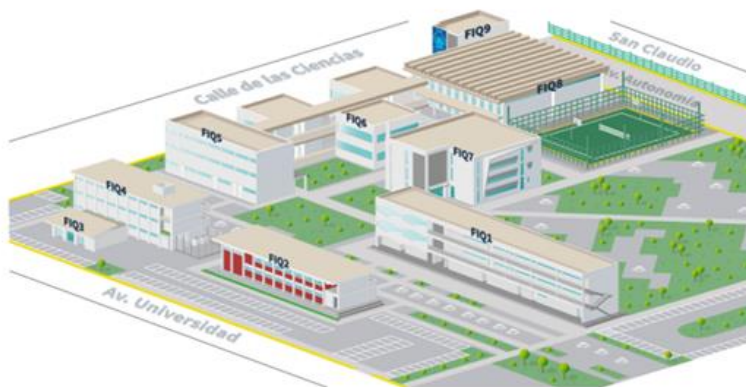
La Facultad de Ingeniería Química (FIQ) cuenta con 8 edificios como se muestra en la Figura 19, en los cuales se encuentran áreas administrativas, salones, laboratorios, cubículos, salas de conferencias y baños. Se cuenta con laboratorios para los diferentes programas educativos que se ofrecen en la FIQ como laboratorio de alimentos, ambiental, química, materiales y ciencias básicas. Hay un total de 38 laboratorios. Se seleccionaron cuatro laboratorios de Ingeniería Ambiental: análisis de agua, química ambiental con

Resultados y discusión

laboratorio, análisis de suelo, y residuos sólidos y peligrosos los cuales están ubicados en los edificios FIQ5 106-107 y FIQ9 301-302.

Figura 19

Ubicación y nomenclatura de la Infraestructura, FIQ-BUAP.



Fuente: www.plantafisica.buap.mx

8.1.2 Generación y disposición de residuos en laboratorios de la FIQ, BUAP

Se obtuvieron los datos referentes al inventario que se realizó en 2020 de la FIQ para la entrega de residuos químicos peligrosos a la empresa privada Integración de servicios industriales S.A. de C.V. Se realizó una colecta de residuos sólidos, material de vidrio roto y 75 porrones de residuos acuosos. Se recabaron 30 porrones provenientes de residuos de suero de leche correspondientes a los laboratorios de Ingeniería de alimentos, 20 porrones correspondieron a residuos orgánicos y 8 porrones de residuos inorgánicos. El resto de los porrones corresponden a residuos diversos de los laboratorios de investigación, académicos y reactivos caducos. Lo que generó un costo aproximado de \$23,000.00 pesos moneda nacional.

Se analizaron los manuales de prácticas de los laboratorios de estudio estos tienen como objetivo normar y regular las actividades dentro de los laboratorios de la FIQ, así como reglamentar el uso de equipos, materiales, reactivos, disposición de residuos generados y los controles de seguridad necesarios para el desarrollo de los trabajos experimentales.

Se establece que los usuarios deberán manejar los residuos generados en los laboratorios de acuerdo con el protocolo específico en el Manual de Seguridad e Higiene de la FIQ. Dentro de las prácticas se establece en el punto de “Residuos generados y disposición” donde se indica en que recipiente se depositan dichos residuos de acuerdo con sus

Resultados y discusión

características orgánicas e inorgánicas, como en el caso del manual de laboratorio de análisis de agua se indica en la sección 8, en el manual de química ambiental y análisis de suelo se establece en la sección 7, el cual también hace referencia al Manual interno de Gestión de Residuos, sin embargo no se cuenta con dicho manual. En el manual de residuos sólidos y peligrosos no cuenta esta sección, por lo que hace falta mayor información sobre el manejo y disposición de los residuos procedentes de dichas prácticas.

Los manuales de prácticas de laboratorio de Ingeniería Ambiental tienen como referencia principal las Normas Oficiales Mexicanas procedimentales correspondientes a las diferentes determinaciones de las asignaturas. En la normatividad se cuenta con una sección correspondiente al “Manejo de residuos” donde se establece que es la responsabilidad del laboratorio de cumplir con todos los reglamentos federales, estatales y locales referente al manejo de residuo, particularmente las reglas de identificación, almacenamiento y disposición de residuos peligrosos.

- ✚ Cada laboratorio debe contemplar dentro de su Programa de Control de Calidad el destino final de los residuos generados durante su determinación.
- ✚ Los desechos ácidos se deben neutralizar para su posterior desecho.
- ✚ Todas las muestras que cumplan con la norma de descarga a alcantarillado pueden descargarse en el mismo sistema.

8.1.3 Conocimientos y percepción del tema de residuos y su gestión por un sector estudiantil

Conocer las perspectivas del sector estudiantil sobre el manejo de los residuos en los diferentes laboratorios académicos es de gran interés para conocer los conocimientos con los que se cuentan y los que son necesarios reforzar para que los estudiantes se sientan seguros sobre el manejo de los residuos procedentes de los laboratorios. Se aplicó una encuesta a 39 estudiantes por línea la cual conto con un total de 26 preguntas de las cuales 8 fueron abiertas y 18 preguntas por escala de satisfacción como se muestra en la Figura 20. Los resultados se muestran en las Figuras 21 y 22.

Resultados y discusión

Figura 20

Formato de la encuesta sobre manejo de residuos químicos en laboratorios académicos.

GENERACIÓN, CLASIFICACIÓN Y MANEJO DE RESIDUOS DE LABORATORIOS ACADÉMICOS
 PROYECTO DE TESIS, POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES
 Ana Victoria Rugerío Suárez

* Obligatorio

1. Género *

2. Edad *

3. Facultad *

4. Colegio *

5. Generación *

6. Semestre que cursa *

7. Conoces la diferencia entre basura y residuo *

Donde 1 Nunca 2 Rara vez 3 A veces 4 Casi siempre 5 Completamente

1 2 3 4 5

1: Nunca
5: Completamente

8. Separas y clasificas tus residuos *

Donde 1 Nunca 2 Rara vez 3 A veces 4 Casi siempre 5 Completamente

1 2 3 4 5

9. Durante el desarrollo de las prácticas de laboratorio de las diferentes asignaturas ¿se generan residuos? *

Donde 1 Nunca 2 Rara vez 3 A veces 4 Casi siempre 5 Completamente

1 2 3 4 5

1: Nunca
5: Completamente

10. Escribe el nombre de los laboratorios que has cursado y en los que se generan residuos *

11. Los manuales de laboratorio te dan información o te asesoran sobre el correcto manejo de los residuos *

Donde 1 Nunca 2 Rara vez 3 A veces 4 Casi siempre 5 Completamente

1 2 3 4 5

1: Nunca
5: Completamente

12. Los técnicos encargados de los laboratorios te dan información o te asesoran sobre el correcto manejo de residuos *

Donde 1 Nunca 2 Rara vez 3 A veces 4 Casi siempre 5 Completamente

13. Se clasifican los residuos que se generan en el desarrollo de las prácticas de laboratorio *

Donde 1 Nunca 2 Rara vez 3 A veces 4 Casi siempre 5 Completamente

1 2 3 4 5

1: Nunca
5: Completamente

14. Los contenedores de los residuos de los laboratorios cuentan con la información necesaria para su identificación y manejo *

15. Conoces los símbolos, nomenclatura y colores de las etiquetas en los contenedores de residuos químicos *

Donde 1 Nunca 2 Rara vez 3 A veces 4 Casi siempre 5 Completamente

1 2 3 4 5

1: Nunca
5: Completamente

16. Conoces los protocolos en caso de accidentes o derrames de residuos químicos *

Donde 1 Nunca 2 Rara vez 3 A veces 4 Casi siempre 5 Completamente

17. Conoces los riesgos de la exposición y manejo de los residuos químicos *

Donde 1 Nunca 2 Rara vez 3 A veces 4 Casi siempre 5 Completamente

1 2 3 4 5

1: Nunca
5: Completamente

18. Conoces el procedimiento para el manejo y almacenamiento de los contenedores de residuos químicos de los diferentes laboratorios *

19. Tienes conocimiento del Sistema Globalmente Armonizado para la clasificación y etiquetado de sustancias químicas peligrosas *

Donde 1 Nunca 2 Rara vez 3 A veces 4 Casi siempre 5 Completamente

1 2 3 4 5

1: Nunca
5: Completamente

20. Conoces tratamientos para la eliminación o degradación de residuos químicos *

21. Conoces la normatividad oficial mexicana que corresponde a la clasificación, manejo y disposición de residuos químicos *

Donde 1 Nunca 2 Rara vez 3 A veces 4 Casi siempre 5 Completamente

1 2 3 4 5

1: Nunca
5: Completamente

22. Sabes que es un Plan de Gestión Integral de Residuos *

23. Tienes compromiso con la clasificación, manejo y disposición de residuos químicos generados en el desarrollo de las prácticas de laboratorio *

Donde 1 Nunca 2 Rara vez 3 A veces 4 Casi siempre 5 Completamente

1 2 3 4 5

1: Nunca
5: Completamente

24. ¿Consideras que hay personal capacitado para el manejo de los residuos químicos generados en las prácticas de laboratorio? *

25. ¿Consideras que la institución aplica una gestión adecuada de los residuos generados en las prácticas de laboratorio? *

Donde 1 Nunca 2 Rara vez 3 A veces 4 Casi siempre 5 Completamente

1 2 3 4 5

1: Nunca
5: Completamente

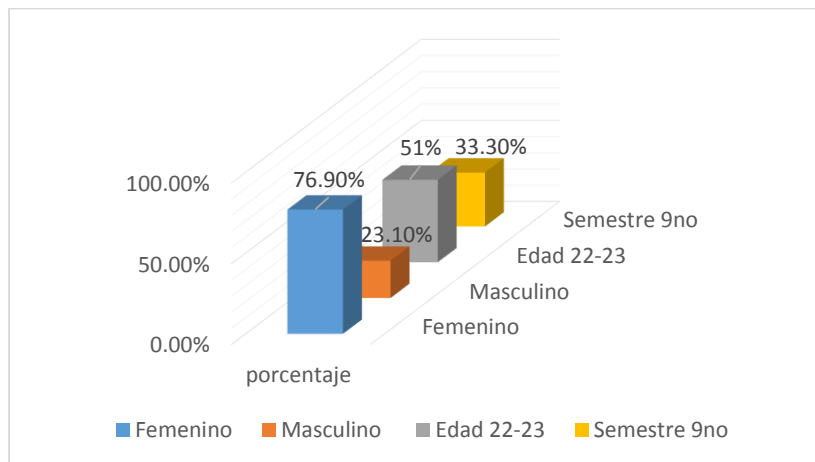
26. Escribe comentarios sobre el tema

Escribe su respuesta

Fuente: Elaboración propia.

Figura 21

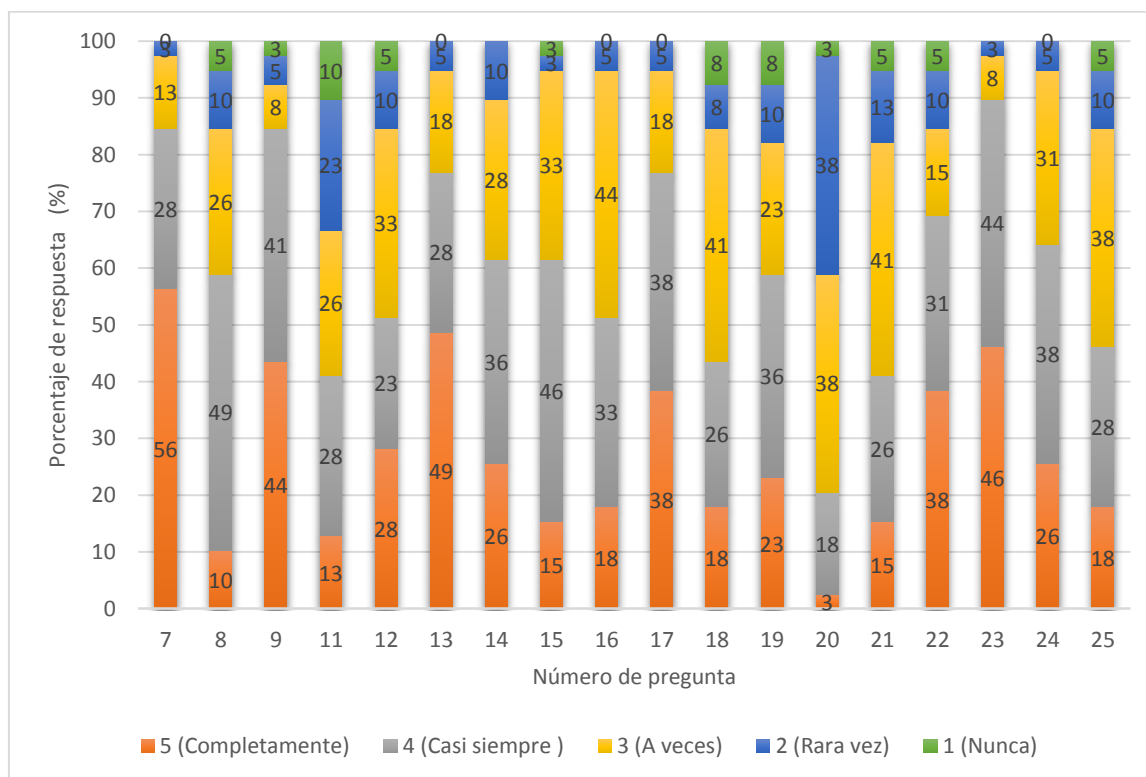
Datos generales sobre los estudiantes encuestados.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 22

Resultados de las preguntas sobre manejo de residuos químicos en laboratorios académicos.



Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

Los estudiantes tienen conocimiento entre la diferencia de residuo y basura. Ya poseen hábitos de separación y clasificación de residuos. Durante el desarrollo de las diferentes prácticas son conscientes de que se generan residuos y que los manuales casi siempre cuentan con información sobre el manejo de residuos, consideran que hay asesoramiento sobre el correcto manejo de residuos y su clasificación. Los contenedores casi siempre cuentan con la información necesaria para su manejo y disposición y casi siempre conocen e identifican los símbolos, nomenclatura y colores de las etiquetas.

Les falta información sobre los protocolos en caso de accidentes y derrames de residuos ya que rara vez lo conocen y están conscientes de los riesgos sobre la exposición y manejo de residuos químicos. También consideran que rara vez conocen los procedimientos para el manejo y almacenamiento de residuos químicos, casi siempre cuentan con el conocimiento sobre el Sistema Globalmente Armonizado.

Falta conocimiento sobre los tratamientos y las normas oficiales mexicanas sobre la clasificación, manejo y disposición de residuos químicos, casi siempre saben que es un plan de gestión integral de residuos. Los estudiantes están comprometidos con la clasificación, manejo y disposición de los residuos y consideran que rara vez se aplica una gestión adecuada de los residuos que se generan en las prácticas de laboratorio. Los estudiantes tuvieron diferentes opiniones sobre que les gustaría tener más información sobre el tema.

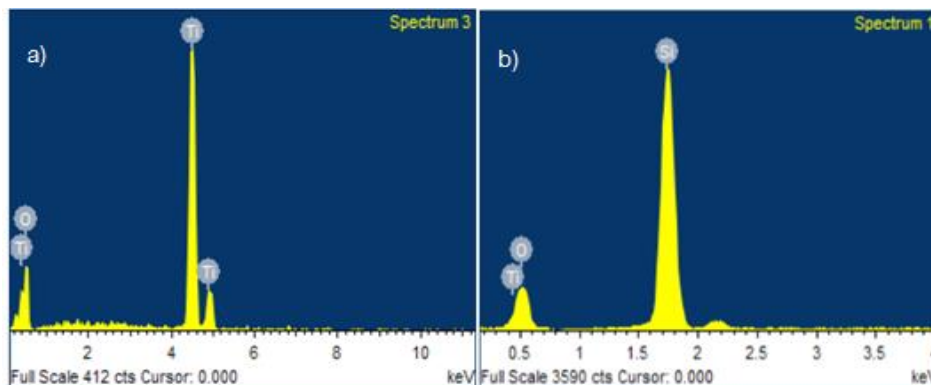
8.2 Degradación de residuos químicos por fotocátalisis

8.2.1 Composición química elemental de los catalizadores TiO_2 y $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

En la Figura 23 se muestra un espectro dispersivo de energía donde se pueden observar picos definidos y se obtuvo el porcentaje en peso de su composición química elemental. En el inciso a) correspondiente al TiO_2 se observa la presencia de dos elementos oxígeno (O) 40.05% y titanio (Ti) 59.95%. En el inciso b) correspondiente al $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ se observa la presencia de tres elementos oxígeno (O) 56.68%, titanio (Ti) 13.68% y silicio (Si) 29.48%. Esto es de importancia para conocer si los catalizadores tienen algunas impurezas o contaminación de la síntesis.

Figura 23

Espectros EDE catalizadores.



Nota: Espectros EDE a) TiO_2 y b) $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$. Fuente: Elaboración propia.

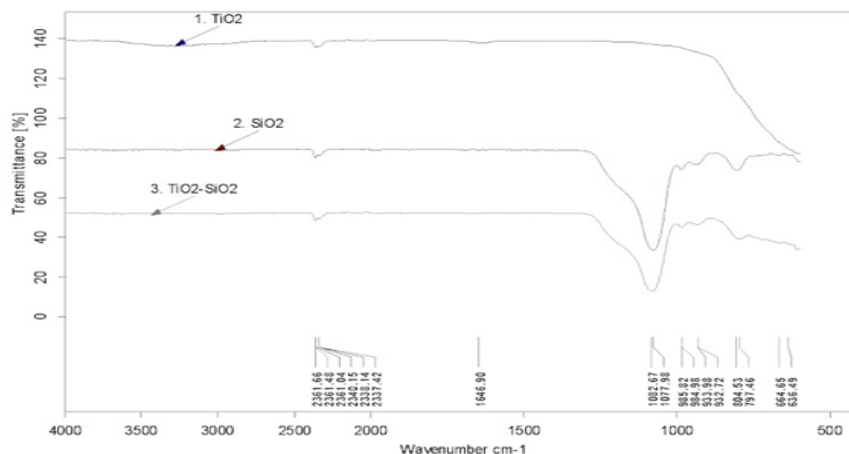
8.2.2 Descripción de grupos funcionales de los catalizadores TiO_2 y $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

En la Figura 24 se muestran los espectros de infrarrojo del TiO_2 con el material comercial Degussa P-25 en comparación con TiO_2 inmovilizado en SiO_2 . El espectro muestra señales que aparecen alrededor de los 3500 a 3000 cm^{-1} las cuales son atribuidas a tensiones vibracionales de grupos $-\text{OH}$ y alrededor de 1600 cm^{-1} a vibraciones de deformación de tipo tijera de los protones del agua adsorbida en la superficie del TiO_2 (Skoog y Leary, 2003); (Wawryzyniak y Morawsky, 2006); (Huang et al., 2007); (Zhiyuan y Anning, 2007). Las bandas que aparecen en el intervalo de 650 - 450 cm^{-1} son características de enlaces Ti-O-Ti (Yoon et al., 2006). Mediante estudios previos realizados por otros autores (Philipp y Phys, 1979), se han identificado tres bandas de absorción características del dióxido de silicio en 1080 , 800 , y 450 cm^{-1} , los cuales corresponden a los modos de estiramiento (stretching), doblamiento (bending) y balanceo (rocking) de los enlaces Si-O , respectivamente.

Durante la síntesis del SiO_2 por sol-gel se generan reacciones de hidrólisis cuando el TEOS y agua se mezclan con un solvente común (etanol) generando grupos llamados silanoles (SiOH), posteriormente se inicia el proceso de condensación que puede ocurrir entre dos grupos silanoles o un silanol y grupo etoxy (OC_2H_5) para formar puentes de oxígeno formando un grupo siloxano (Si-O-Si) estos grupos con el tiempo las partículas se unen para formar redes tridimensionales. La presencia de los grupos silanoles y siloxano permiten las interacciones entre el TiO_2 por puentes de hidrógeno y diferencia de cargas electrostáticas (Hernández, Robles, Ruiz y Martínez, 2000).

Figura 24

Comparación de espectros IR catalizadores.



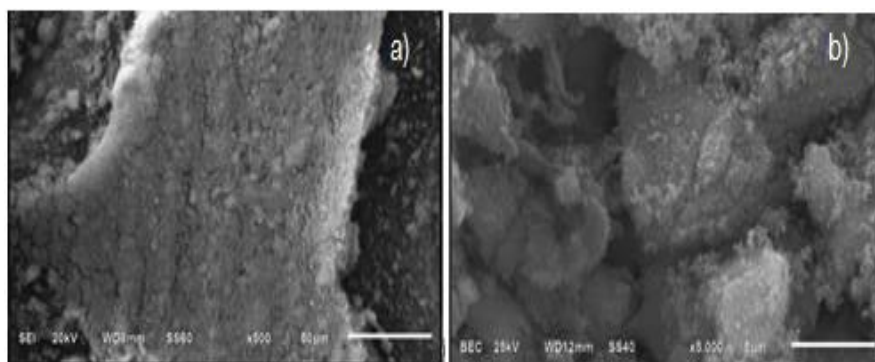
Nota: Comparación de espectros IR de TiO_2 y $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$. *Fuente:* Elaboración propia.

8.2.3 Morfología y estructura cristalina de los catalizadores TiO_2 y $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

En la Figura 25 se muestran las micrografías electrónicas de barrido de a) TiO_2 ampliación x500 con electrones secundarios donde se ven puntos muy finos y pequeños esféricos correspondientes a la formación de cristales, en el b) $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ampliación x5000 con electrones retrodispersados donde se observa material muy fino correspondiente al TiO_2 sobre la superficie de partículas más gruesas con geometría irregular correspondiente al SiO_2 . Esto es de gran importancia para conservar sus propiedades fotocatalíticas ya que se encuentra en la parte superficial de la estructura mesoporosa del soporte SiO_2 con una distribución uniforme. El soporte SiO_2 permite mejorar los procesos fotocatalíticos al ser un material inerte y transparente a la radiación UV (Llano, Marín, Restrepo y Ríos, 2007).

Figura 25

Micrografías electrónicas de barrido de los catalizadores.



Nota: MEB de a) TiO_2 b) $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$. *Fuente:* Elaboración propia.

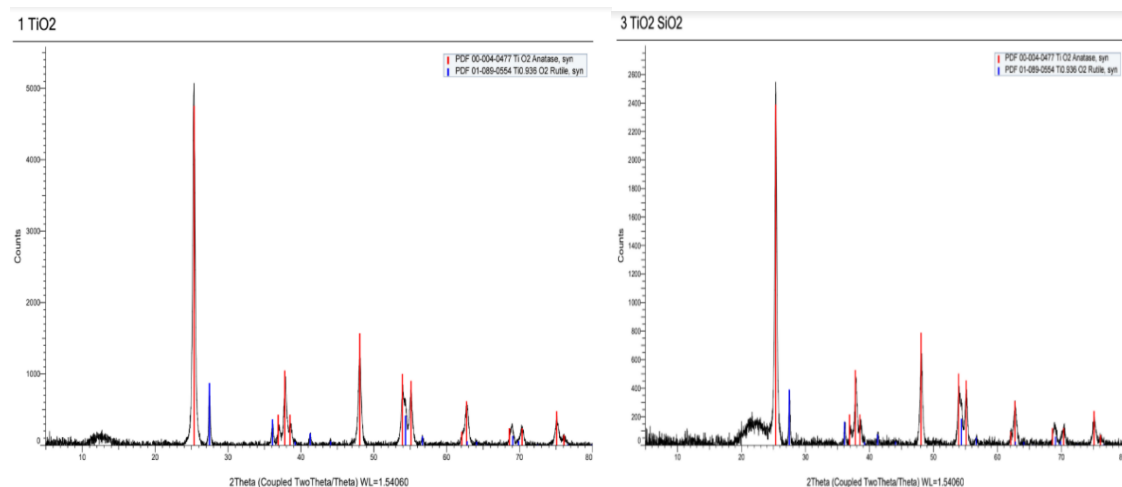
Resultados y discusión

Mediante el análisis de los patrones XRD del TiO_2 (Figura 26) se analizó la estructura del catalizador donde se observan picos estrechos y bien definidos lo que corresponde a una estructura cristalina, se pueden observar dos fases cristalinas la de mayor proporción correspondió a la fase anatasa con una red cristalina tetragonal y en menor proporción corresponde a la fase rutilo con una red cristalina tetragonal dando una mezcla de fases cristalinas. Se alcanzaron puntos máximos en 2θ de 25.35° , 48.07° y 37.78° que corresponde a los índices de Miller (1 0 1), (2 0 0) y (0 0 4) de los planos cristalinos para la fase anatasa y los puntos máximos en 2θ de 27.45° , 54.36° y 36.1° que corresponden a los índices de Miller (1 1 0), (2 1 1) y (1 0 1) de los planos cristalinos para la fase rutilo. En los patrones XRD del $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ se observan las dos fases cristalinas correspondientes al TiO_2 mientras que SiO_2 solo se muestra como una señal de ruido como una banda ancha de baja intensidad debido a que es un material amorfo se observa en la zona entre 20 y $25^\circ \theta$. La cantidad de SiO_2 presente no afecto la cristalización del TiO_2 .

El TiO_2 presenta cuatro fases cristalinas: rutilo (estructura tetragonal), anatasa (estructura octaédrica), brookita (estructura ortorrómbica) y una de alta presión del tipo $\alpha\text{-PbO}_2$ (Müller, 2007). En particular la fase anatasa, es ampliamente utilizada como fotocatalizador por sus propiedades ópticas y electrónicas, bajo costo, estabilidad química y baja toxicidad. Se han reportado que el TiO_2 es un buen fotocatalizador debido a que posee un adecuado valor de banda prohibida ($\sim 3\text{eV}$) (Arconada *et al.*, 2008).

Figura 26

Patrones de difracción de rayos X catalizadores.



Fuente: Elaboración propia.

El tamaño medio de los cristales se calculó mediante la ecuación de Scherrer estimado en base al pico máximo de $2\theta=25.35^\circ$, se calculó la anchura a media altura (FWHM por sus siglas en inglés) para el TiO_2 donde se obtuvo un valor de 0.41926° y para el $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 0.41557° obteniendo un tamaño de cristal para TiO_2 de 18.94 nm y para $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ de 19.58 nm.

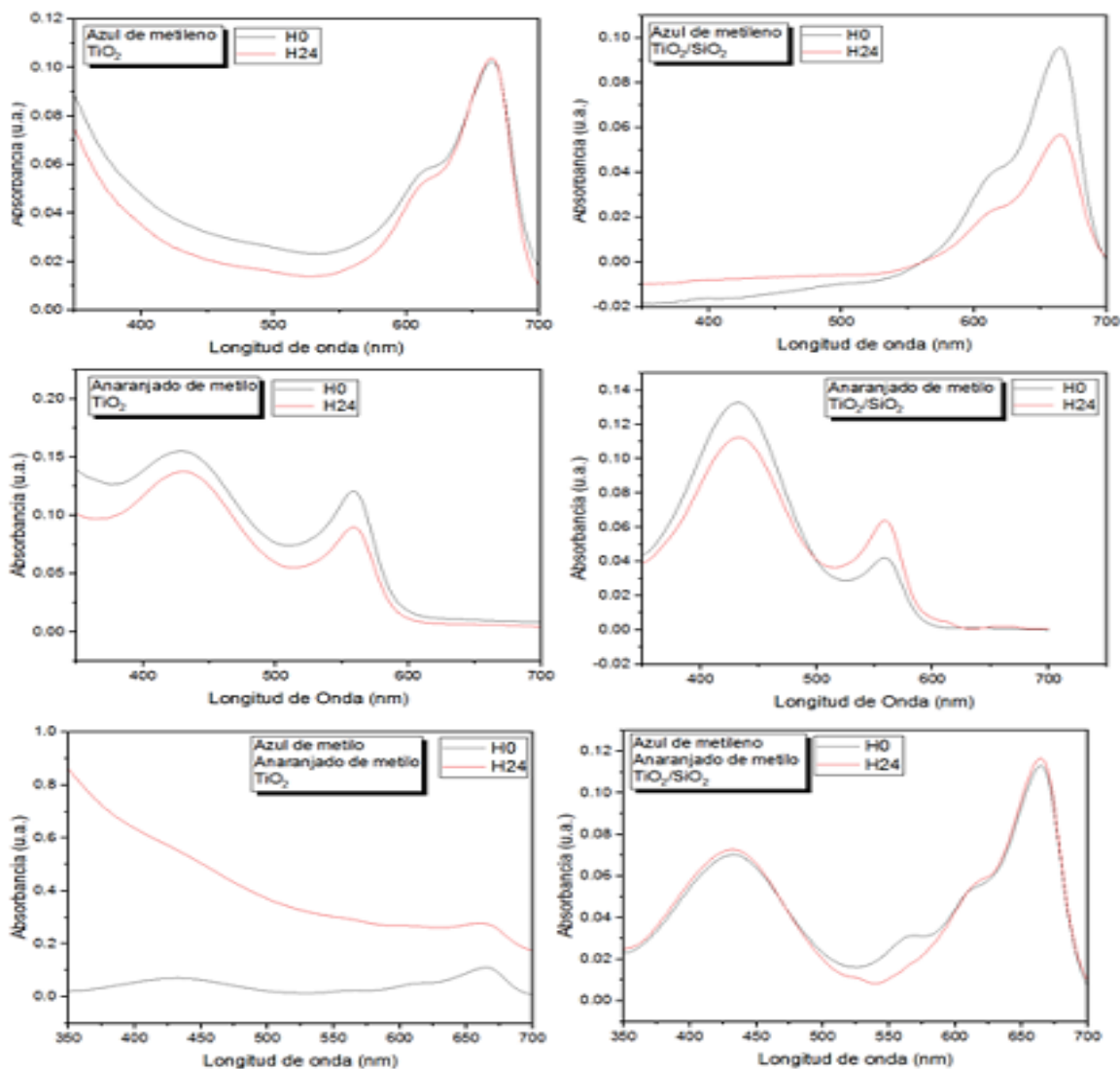
El tamaño de las partículas tiene un efecto en la concentración óptima, en la medida de difusión y la adsorción de la radiación en las partículas cristalinas de acuerdo a Plantard *et al.* Puede ser explicado por la relación entre el tamaño/forma de las partículas en suspensión y la extinción (atenuación) de radiación explicando el comportamiento óptico de los distintos catalizadores (2012). Fernandez-Ibañez *et al.* señala que un exceso de concentración de TiO_2 creará una cierta turbidez que provocará que la radiación penetre hasta una determinada distancia por el efecto de la extinción de la luz. Un mayor tamaño de partícula en suspensión dispersa en menor medida la luz y permite ópticamente una mayor carga del catalizador (1999). Por lo que la concentración óptima de catalizador es más pequeña en el caso de partículas de menor tamaño.

8.2.4 Degradación de los colorantes azul de metileno, anaranjado de metilo y su combinación

Se muestra los espectros UV-Vis antes y después de las 24 h con los catalizadores de TiO_2 y $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ sin luz UV resultados de las pruebas de oscuridad en la Figura 27. Para el colorantes azul de metileno se utilizó la longitud de absorción máxima a 663 nm, anaranjado de metilo a 433 nm y para la combinación de los colorantes a 430 nm. Se observó una mayor disminución del área de la banda de absorción máxima por el catalizador $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ posterior 24 h para el colorante azul de metileno y para el catalizador TiO_2 para la combinación de los dos colorantes. En las bandas de absorción de los colorantes con el catalizador TiO_2 para el azul de metileno y anaranjado de metilo no se observan mayor disminución de absorción por lo que este no se considera la adsorción como un factor en el desempeño fotocatalítico.

Figura 27

Espectros UV-Vis de la prueba de oscuridad de las muestras sintéticas.



Fuente: Elaboración propia.

Las alícuotas obtenidas del proceso fotocatalítico con el catalizador TiO_2 en suspensión se dejaron en sedimentación para separar el catalizador de la muestra acuosa y poder determinar el grado de decoloración mediante espectroscopía UV-Vis.

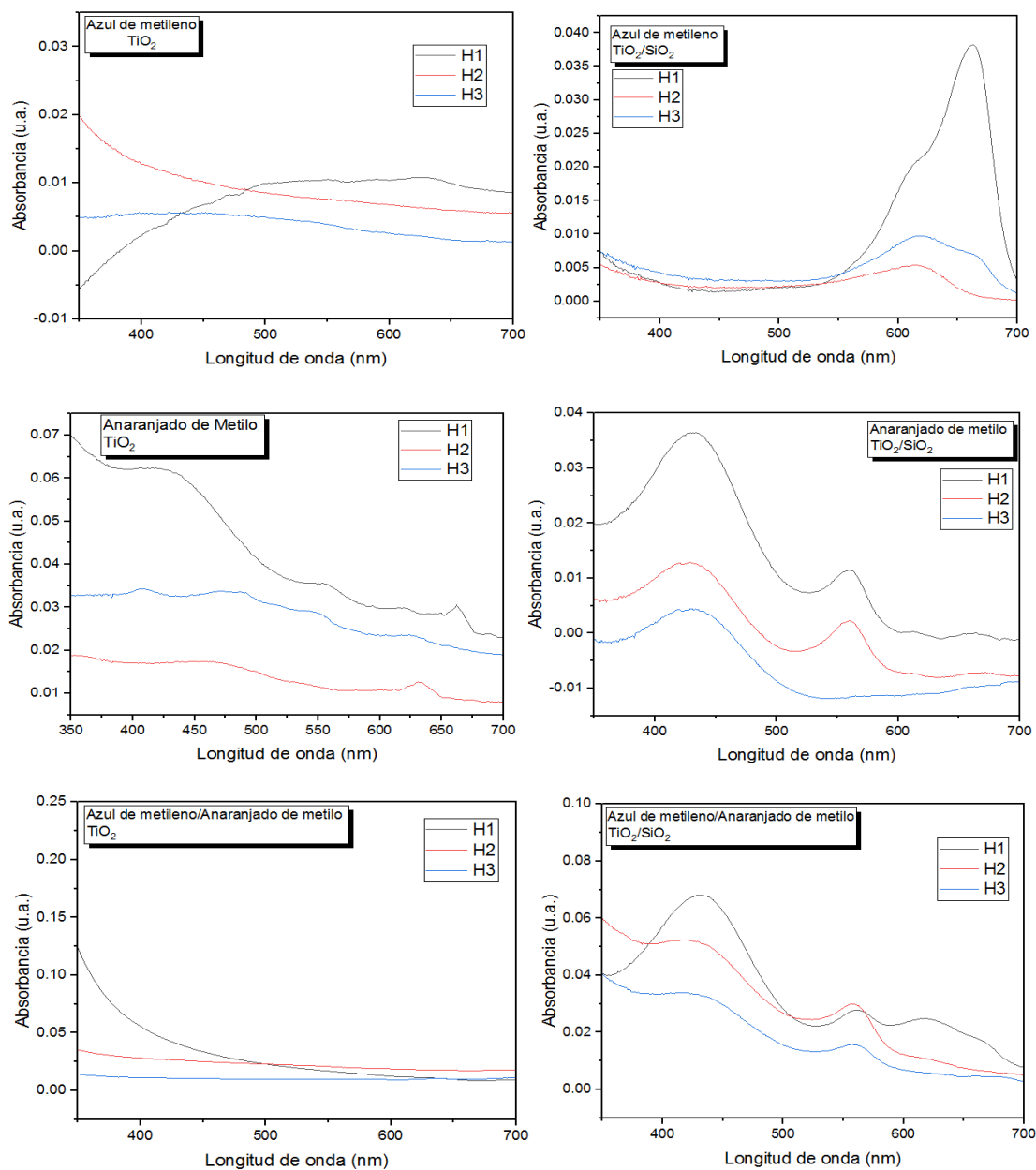
En la Figura 28 se observan los espectros UV-Vis de los colorantes a su longitud de onda representativa de cada colorante, con los catalizadores TiO_2 y $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ durante tres horas de fotocatalisis solar. Se observó que la absorbancia disminuye por cada hora que transcurre del proceso fotocatalítico con ambos catalizadores, para el catalizador TiO_2

Resultados y discusión

dificulta su análisis por la turbidez de las muestras y para el catalizador $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ se pueden observar más claramente las curvas de absorción de los colorantes.

Figura 28

Espectros UV-Vis de la degradación de los colorantes durante las pruebas fotocatalíticas.



Nota: colorantes azul de metileno, anaranjado de metilo y su combinación con los catalizadores TiO_2 y $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$. *Fuente:* Elaboración propia.

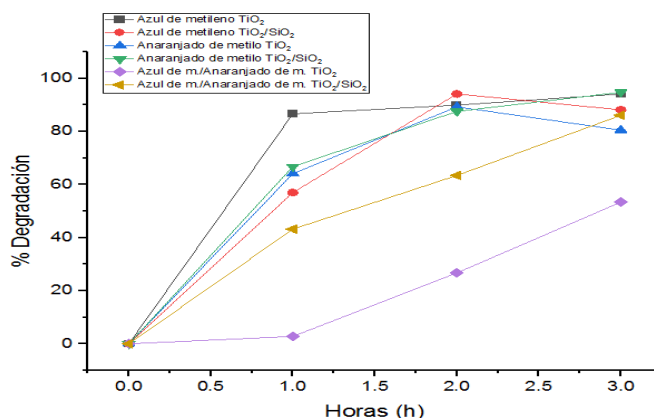
Resultados y discusión

Mediante las curvas de calibración por la lectura de absorbancia de disoluciones seriadas a concentraciones conocidas de azul de metileno, anaranjado de metilo y las mezcla de ambos (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1ppm) se determinaron la absorbancia frente a concentración para determinar la concentración de los colorantes al final del proceso fotocatalítico.

En la Figura 29 se observa el gráfico de la comparación de los porcentajes de remoción utilizando la máxima absorbancia en la longitud de onda de cada colorante, calculando la remoción de los colorantes azul de metileno, anaranjado de metilo y combinados con el catalizador TiO_2 del 94.13%, 97.72% y 53.41% respectivamente y con el catalizador $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ de 88.17%, 80.54% y 86.12% respectivamente.

Figura 29

Comparación de los porcentajes de degradación de los colorantes durante las pruebas fotocatalíticas.



Fuente: Elaboración propia.

La degradación de colorantes mediante fotocátalisis se ha estudiado con diferentes condiciones, cambiando concentraciones del catalizador, colorante y agentes oxidantes, diferentes tiempos de exposición, fuente de luz, pH, etc., obteniendo diferentes porcentajes de degradación. Zhang *et al.* utilizaron 0.1 g/L de catalizador TiO_2 (Degussa P25) para degradar Azul de metileno (20 ppm) con lámparas de mercurio a 310-400 nm en un tiempo de irradiación de 120 min pH 4.0 obtenido una eficiencia de 90% tubo altos rendimiento en un corto tiempo sin embargo implicó el uso de una fuente de luz artificial (2001). Li *et al.* utilizaron TiO_2 soportado en zeolitas 8 g/L para degradar naranja de metilo utilizando lámparas de mercurio a 365 nm con un tiempo de irradiación de 140 min a un pH de 8.0 obteniendo un eficiencia de 96.6% el cual tubo altos rendimiento sin embargo utilizó más

catalizador y uso de fuente de luz artificial aumentado la velocidad de degradación pero implicando un costo económico (2008).

Estudios han demostrado que la actividad fotocatalítica del catalizador TiO_2 puede mejorarse para que pueda aprovechar el rango de luz visible (>400 nm) de la luz solar mediante modificaciones como: implantación de iones de metales, dopaje con no metales, formación de compuestos con semiconductores o metales nobles, sensibilización con colorantes, etc. (Nevares *et al.*, 2017). Se realizó la comparación de degradación del colorante naranja de metilo (10 ppm) con el catalizador TiO_2 (Degussa P25) y el material composito TiO_2/Au (2%) en un fotorreactor a un pH de 4 con 8 lámparas de 352 nm y 8 lámparas de 540 nm obteniendo con el catalizador en suspensión una degradación de 40% en un tiempo de 30 min mientras que con el material composito la concentración del naranja de metilo disminuyó considerablemente a los 10 min bajo irradiación llegando a un valor de eficiencia de degradación de 93.6% (Morales, 2022).

El desarrollo de fotocatalizadores de TiO_2 activos para mejorar la eficiencia de degradación, maximizar el uso de la longitud de onda de iluminación en la región de luz visible y mejorar la recuperación y reutilización es de gran interés académico y comercial (Han *et al.*, 2009).

La Tabla 6 muestra el grado de las constantes de cinéticas degradación de los colorantes con el catalizador TiO_2 e inmovilizado $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ con su coeficiente de correlación (R^2) de los datos experimentales. Es común tener en las reacciones catalíticas heterogéneas constantes cinéticas de orden cero indicando que la velocidad de reacción fue constantes independiente de la concentración como se observó en la degradación del azul de metileno con el catalizador en suspensión y la combinación de azul de metileno y anaranjado de metileno con los dos catalizadores. También se observaron cinéticas de primer orden en la degradación del azul de metileno con el catalizador inmovilizado y del anaranjado de metilo con ambos catalizadores indicando que la velocidad de reacción fue directamente proporcional a la concentración del catalizador.

La velocidad de reacción en los procesos catalíticos heterogéneos es proporcional a la concentración de catalizador empleada. Sin embargo, en fotocátalisis heterogénea, a un cierto valor de concentración de TiO_2 catalizador, la velocidad de reacción disminuye y se hace constante e independiente de la concentración por el efecto de apantallamiento como consecuencia de la disminución del grado de iluminación alcanzado en el interior del reactor (Carbajo, 2013).

Tabla 8

Constantes cinéticas de la degradación de los colorantes.

Colorante	Catalizador	k_0	R^2	k_1	R^2	k_2	R^2
Azul de metileno	TiO ₂	0.05527	0.99556	0.41023	0.98824	3.21915	0.95371
Azul de metileno	TiO ₂ /SiO ₂	0.21652	0.61002	0.64539	0.95823	2.20609	0.76805
Anaranjado de metilo	TiO ₂	0.30849	0.41147	0.305651	0.97213	0.31238	0.86475
Anaranjado de metilo	TiO ₂ /SiO ₂	0.34365	0.92729	0.92875	0.94443	3.32006	0.75128
Azul de metileno- Anaranjado de metilo	TiO ₂	0.394	0.99891	0.70479	0.96786	1.48381	0.83329
Azul de metileno- Anaranjado de metilo	TiO ₂ /SiO ₂	0.46426	0.9990	0.36797	0.98972	0.30505	0.74935

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó la recuperación de los catalizadores para las pruebas de fotocatalisis heterogénea con luz solar de las muestras sintéticas, en las que se ocuparon 0.5 g de cada catalizador obteniendo una recuperación del catalizador TiO₂ del 23.6% que corresponde a 0.1180 g y para el catalizador inmovilizado TiO₂/SiO₂ del 61.1% correspondiente a 0.3055 g.

8.2.5 Degradación de residuos químicos generados en la práctica de determinación de acidez y alcalinidad

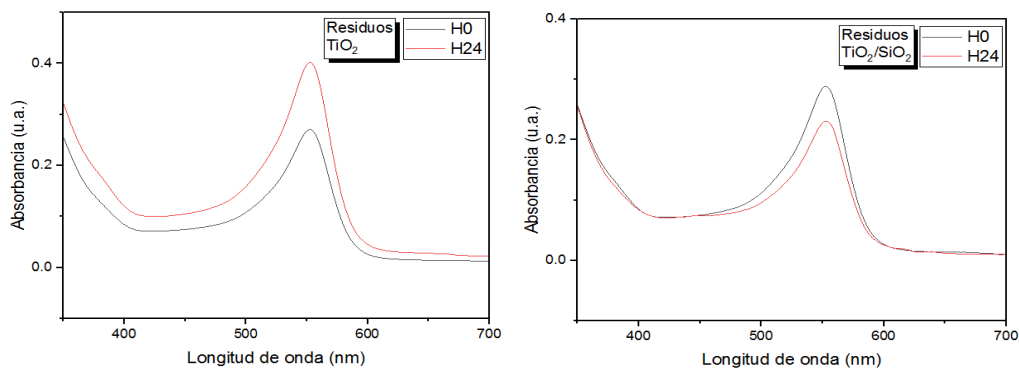
Las muestras de residuos obtenidas de las prácticas de acidez y alcalinidad se neutralizaron con ácido acético glacial ya que tenían un pH alcalino con un valor de 8. Posteriormente se realizaron las pruebas de oscuridad. En la Figura 30 se observan los espectros UV-Vis en la cual se observa que hubo mayor disminución en el área bajo la curva con la longitud de 553 nm de los residuos con el catalizador TiO₂.

Resultados y discusión

La disminución de la absorbancia en ambos casos se asocia con una moderada interacción mediante adsorción de las moléculas contaminantes de los residuos tratados, con la superficie de los catalizadores.

Figura 30

Espectros UV-Vis de la prueba de oscuridad de los residuos químicos de la práctica de acidez y alcalinidad.



Nota Espectros UV-Vis de los residuos de la práctica de determinación de acidez y alcalinidad con los catalizadores TiO_2 y $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ antes y después de la prueba de oscuridad. *Fuente:* Elaboración propia.

En la Figura 31 se observa el resultado de las pruebas de fotocátalisis solar aplicada a los residuos de laboratorio de determinación de acidez y alcalinidad.

Figura 31

Resultado de las pruebas de fotocátalisis heterogénea de residuos laboratorio de acidez y alcalinidad.



Fuente: Elaboración propia.

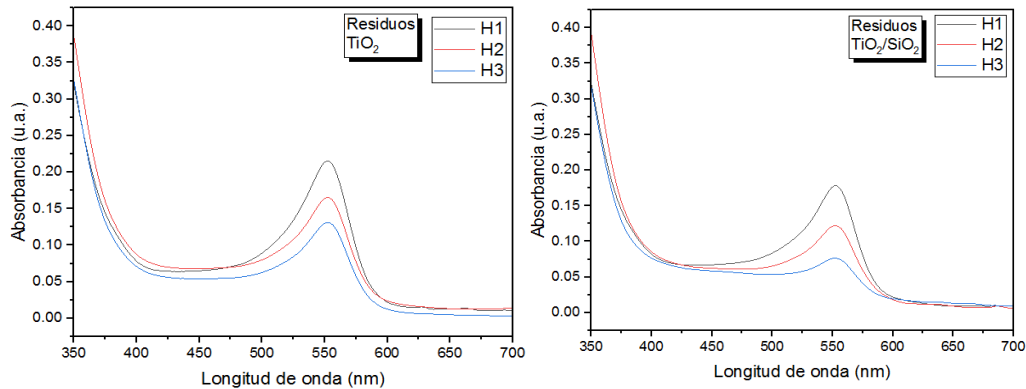
En la Figura 32 se observan los espectros UV-Vis de los residuos en cada hora de la fotocátalisis solar con ambos catalizadores TiO_2 y $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ durante tres horas, se observa que la absorbancia de la banda característica de estos residuos químicos (553 nm)

Resultados y discusión

disminuye notablemente por cada hora que transcurre del proceso fotocatalítico con ambos catalizadores.

Figura 32

Espectros UV-Vis de la degradación de los residuos químicos de la práctica de acidez y alcalinidad.

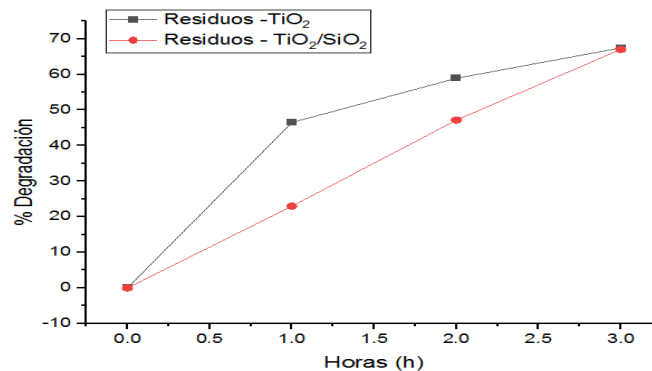


Nota: Espectros UV-Vis de la degradación de los residuos con los catalizadores TiO_2 y $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ durante el proceso foto catalítico. *Fuente:* Elaboración propia.

En la Figura 33 se observan el gráfico de comparación de porcentajes degradación de residuos químicos de la práctica de acidez y alcalinidad con los dos catalizadores alcanzando una remoción para el TiO_2 de 67.44% y para el $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 67.04%.

Figura 33

Comparación de los porcentajes de degradación de los residuos químicos de la práctica de acidez y alcalinidad.



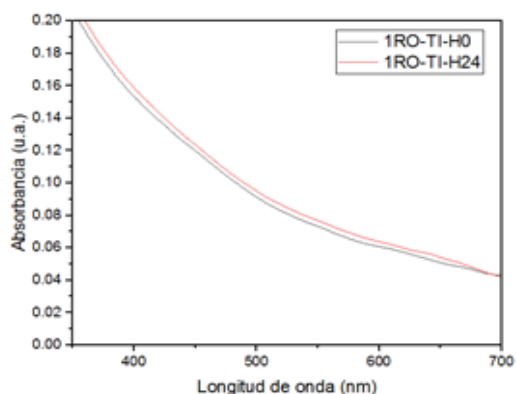
Nota: Porcentajes de degradación de los residuos de la práctica de acidez y alcalinidad con los catalizadores TiO_2 y $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ durante el proceso fotocatalítico. *Fuente:* Elaboración propia.

8.2.6 Degradación de residuos químicos generados en las prácticas de determinaciones de cloruros, acidez y alcalinidad y nitrógeno total

En la Figura 34 se muestran los espectros de absorción UV-Vis de la prueba de oscuridad con el catalizador $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ en la cual se observa que no hay un cambio significativo en la absorbancia al transcurso de las 24 h, por lo que se asume que no hay adsorción de contaminantes en la superficie del catalizador.

Figura 34

Espectros UV-Vis de la prueba de oscuridad de la combinación de residuos de laboratorio.



Nota: Espectros UV-Vis con la combinación de residuos de laboratorio con el catalizador $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ antes y después de la prueba de oscuridad. *Fuente:* Elaboración propia.

En la Figura 35 se observa la imagen del resultado de las pruebas de fotocátalisis solar a los residuos combinados de las prácticas de determinación de dureza, acidez y alcalinidad y nitrógeno.

Figura 35

Resultado de las pruebas de fotocátalisis heterogénea de la combinación de residuos químicos de laboratorio.



Fuente: Elaboración propia.

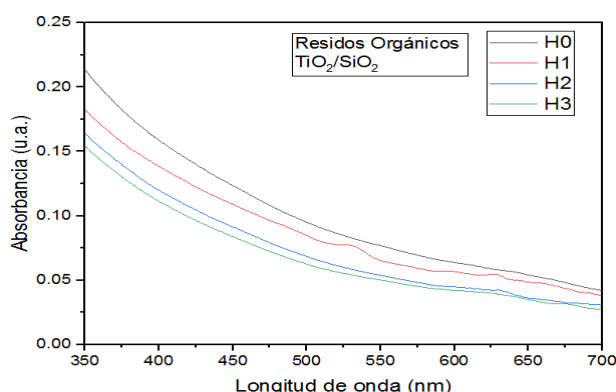
En la Figura 36 se observan los espectros UV-Vis de los residuos combinados del laboratorio al transcurso de cada hora de la fotocátalisis solar con el catalizador $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

Resultados y discusión

durante tres horas, se observa que la absorbancia disminuye por cada hora que transcurre del proceso fotocatalítico.

Figura 36

Espectros UV-Vis de la degradación de la combinación de residuos de laboratorio durante la prueba fotocatalítica.



Nota: Espectros UV-Vis de la degradación de la combinación de residuos de laboratorio con el catalizador inmovilizado $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ durante el proceso fotocatalítico. *Fuente:* Elaboración propia.

Se observa en la Tabla 7 una reducción de las áreas bajo la curva de la absorbancia al transcurso de cada hora de la prueba fotocatalítica aunque su reducción final es del 32% no hay una degradación mayor de los componentes debido a la alta carga de contaminantes presentes en la muestra real de los residuos químicos. La caracterización fisicoquímica de las aguas analizadas en dicho curso se presenta en el Anexo a, de tal forma que su complejidad proviene del origen y composición química de estas, además de los reactivos utilizados en las determinaciones.

Tabla 9

Porcentaje de reducción del área de los residuos químicos combinados al transcurso de la prueba fotocatalítica.

Hora	Área	% Reducción
H0	34.73348	0
H1	30.54296	12.065
H2	25.42442	26.801
H3	23.60852	32.029

Nota: Porcentaje de reducción del área bajo la curva de absorbancia de los residuos químicos combinados con el catalizador $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$. *Fuente:* Elaboración propia.

Resultados y discusión

En la Tabla 8 se hace un concentrado de los resultados y parámetros medidos durante las pruebas de fotocatalisis heterogénea con luz solar de las muestras sintéticas y reales.

Tabla 10

Resultados finales de pruebas fotocatalíticas de muestras sintéticas y residuos de las prácticas de laboratorio.

#	Muestra	Catalizador	Índice UV	Hora	pH	% degradación -coloración – disminución de área
1	Azul de metileno	TiO ₂	10	H0	5.8	94.13
				H3	5.7	
2	Anaranjado de metilo	TiO ₂	11	H0	5.9	97.72
				H3	6	
3	Azul de m./anaranjado de m.	TiO ₂	10	H0	5.6	53.41
				H3	5.5	
4	Azul de metileno	TiO ₂ /SiO ₂	9	H0	5.7	88.17
				H3	5.2	
5	Anaranjado de metilo	TiO ₂ /SiO ₂	10	H0	5.2	80.54
				H3	5.1	
6	Azul de m./anaranjado de m.	TiO ₂ /SiO ₂	10	H0	5.5	86.12
				H3	5.7	
7	Residuos práctica de acidez y alcalinidad	TiO ₂	14	H0	4.2	67.44
				H3	4.2	
8	Residuos determinación de acidez y alcalinidad	TiO ₂ /SiO ₂	14	H0	4.3	67.04
				H3	4.2	
9	Residuos combinados de prácticas	TiO ₂ /SiO ₂	12	H0	8	32.02%

Fuente: Elaboración propia.

8.2.7 Evaluación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Posterior a las pruebas fotocatalíticas de las muestras sintéticas y muestras de residuos de prácticas de laboratorios y se determinó la DQO, evaluando su calidad de acuerdo con la

Resultados y discusión

escala de color CONAGUA conforme al criterio de la DQO que se observa en la Figura 37 y los resultados de las lecturas se muestran en la Tabla 9.

Figura 37

Criterios y clasificación de la calidad del agua con base de la DQO.

Criterio (mg/l)	Clasificación	Color
$DQO \leq 10$	EXCELENTE No CONTAMINADA	AZUL
$10 < DQO \leq 20$	BUENA CALIDAD AGUAS SUPERFICIALES CON BAJO CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA BIODEGRADABLE Y NO BIODEGRADABLE	VERDE
$20 < DQO \leq 40$	ACEPTABLE CON INDICIO DE CONTAMINACIÓN. AGUAS SUPERFICIALES CON CAPACIDAD DE AUTODEPURACIÓN O CON DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS BIOLÓGICAMENTE	AMARILLO
$40 < DQO \leq 200$	CONTAMINADA AGUAS SUPERFICIALES CON DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CRUDAS, PRINCIPALMENTE DE ORIGEN MUNICIPAL	NARANJA
$DQO > 200$	FUERTEMENTE CONTAMINADA AGUAS SUPERFICIALES CON FUERTE IMPACTO DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CRUDAS MUNICIPALES Y NO MUNICIPALES	ROJO

Fuente: CONAGUA, 2016.

Tabla 11

Evaluación de la calidad del agua con base en los criterios de DQO de la CONAGUA.

#	Muestra	Catalizador	DQO mg/L	Clasificación	Color
1	Azul de Metileno	TiO ₂	0	EXCELENTE NO CONTAMINADA	Azul
2	Anaranjado de metilo		0	EXCELENTE NO CONTAMINADA	
3	Azul de M. /Anaranjado de M.		0	EXCELENTE NO CONTAMINADA	
4	Azul de Metileno	TiO ₂ /SiO ₂	0	EXCELENTE NO CONTAMINADA	Azul
5	Anaranjado de metilo		0	EXCELENTE NO CONTAMINADA	
6	Azul de M. /Anaranjado de M.		0	EXCELENTE NO CONTAMINADA	
7	Residuos de práctica de acidez y alcalinidad	TiO ₂	401	FUERTEMENTE CONTAMINADA	Rojo
8	Residuos de práctica de acidez y alcalinidad	TiO ₂ /SiO ₂	429	FUERTEMENTE CONTAMINADA	Rojo
9	Residuos combinados de prácticas		142	CONTAMINADA	Naranja

Fuente: Elaboración propia

Se observa que las muestras finales de las muestras sintéticas cumplen con una excelente calidad por lo cual se puede decir que después de las pruebas fotocatalíticas no tienen una

Resultados y discusión

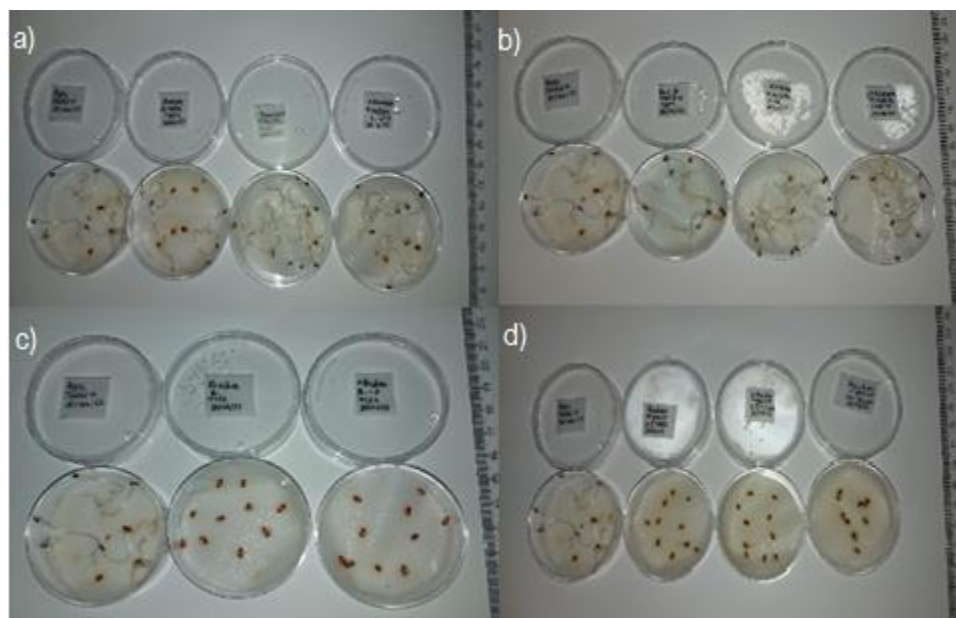
carga orgánica significativa y se encuentra clasificadas como no contaminadas. Mientras que la muestra finales de los residuos combinado de las prácticas de laboratorio su calidad se encuentra clasificada como contaminada por lo que posterior a las pruebas fotocatalíticas todavía cuenta con una carga de contaminantes significativa, las muestras de residuos de la práctica de determinación de acidez y alcalinidad se clasifico como fuertemente contaminada por lo que con tiene una mayor carga de contaminantes. Nuevamente se asume, que la alta contaminación se debe al origen y composición química de las muestras de agua analizadas, además de los reactivos utilizados en las determinaciones del curso.

8.2.8 Evaluación de la toxicidad aguda con semillas de alfalfa (*Medicago sativa*)

Posterior a las pruebas fotocatalíticas de las muestras sintéticas y muestras de los residuos de las prácticas de laboratorio, se determinó su toxicidad aguda mediante el porcentaje de germinación de las semillas de alfalfa como se observa en la Figura 38 y en la Tabla 10.

Figura 38

Prueba de toxicidad aguda de productos finales.



Nota: Determinación de porcentaje de germinación de semillas de alfalfa (*Medicago sativa*)
 a) anaranjado de metilo b) azul de metileno c) residuos de prácticas de acidez y alcalinidad
 d) residuos de combinación de prácticas. *Fuente:* Elaboración propia.

Se puede observar que las muestras sintéticas finales obtienen un porcentaje mayor al 80% de germinación por lo que las muestras después de las pruebas fotocatalíticas se

Resultados y discusión

consideran muestras no tóxicas ya que tienen una germinación correspondiente al control positivo con agua destilada. Sin embargo ocurre lo contrario con las muestra finales de los residuos de las prácticas de laboratorio las cuales muestra una alta toxicidad por su bajo o nulo porcentaje de germinación. Los residuos de determinación de acidez y alcalinidad del laboratorio de análisis de agua tuvieron el 0% de germinación de semillas por lo que se consideran que tienen una toxicidad aguda. Los residuos combinados de las prácticas de determinación de cloruros, acidez y alcalinidad y nitrógeno total solo alcanza un promedio de 20% se son consideran con toxicidad aguda. Por lo no cumplen con la calidad para ser vertidas al alcantarillado ya que tienen altas concentraciones de contaminantes que pueden ocasionar problemas ecotoxicológicos al ser vertidos a efluentes de aguas residuales.

Lo anterior evidencia que el origen de las muestras analizadas en el laboratorio influye directamente en la toxicidad de los residuos de las diferentes determinaciones. Por lo anterior, se considera como punto importante para el tratamiento de los residuos químicos que las muestras de agua no provengan de sitios con contaminación evidentemente alta como la del río Atoyac.

Tabla 12

Porcentajes de germinación de residuos químicos acuosos posterior a las pruebas fotocatalíticas de muestras sintéticas y muestras reales.

Muestra control	% Germinación	
Agua +	80	
AN 1 ppm-	50	
AM 1 ppm -	80	
AM/AN 1 ppm	70	

Muestras sintéticas	Catalizador	% Germinación	Residuos químico	Catalizador	% Germinación
Azul de metileno	TiO ₂	100	Residuos de la práctica de determinación de acidez y alcalinidad	TiO ₂	0
	* TiO ₂	100		* TiO ₂	0
	TiO ₂ /SiO ₂	100		TiO ₂ /SiO ₂	0
	* TiO ₂ /SiO ₂	90		* TiO ₂ /SiO ₂	0
	Blanco	90		Blanco	0
	*Blanco	90		*Blanco	0

Nota: * duplicado de la muestra *Fuente:* Elaboración propia.

Tabla 13

Porcentajes de germinación de residuos químicos acuosos posterior a las pruebas fotocatalíticas de muestras sintéticas y muestras reales (continuación).

Muestras sintéticas	Catalizador	% Germinación	Residuos químico	Catalizador	% Germinación
	TiO ₂	100		TiO ₂ /SiO ₂	10
	* TiO ₂	100	Residuos	* TiO ₂ /SiO ₂	30
Anaranjado de metilo	TiO ₂ /SiO ₂	100	combinados	Blanco	10
	* TiO ₂ /SiO ₂	80	de prácticas	*Blanco	0
	Blanco	80	de laboratorio		
	*Blanco	70			
	TiO ₂	80			
Azul de metileno/ Anaranjado de metilo	* TiO ₂	100			
	TiO ₂ /SiO ₂	100			
	* TiO ₂ /SiO ₂	100			
	Blanco	80			
	*Blanco	90			

Nota: * duplicado de la muestra *Fuente:* Elaboración propia.

8.3 Plan de gestión de los residuos químicos generados en laboratorios Ingeniería Ambiental FIQ, BUAP

Introducción

¿Qué es un residuo?

Según la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR, 2004) un residuo es todo material cuyo propietario o poseedor desecha,

¿Qué es un residuo peligroso?

De acuerdo LGPGIP un residuo peligroso es aquel que posea alguna de las características CRETIB (corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contenga agentes infecciosos) que le confiera peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio.

¿Qué es un plan de manejo?

De acuerdo con el artículo 5 de la LGPGIR para efectos de esa ley se entiende por plan de manejo:

“Instrumento cuyo objetivo es minimizar la generación y maximizar la valorización de residuos sólidos urbanos, residuos de manejo especial y residuos peligrosos específicos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, con fundamento en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos, diseñado bajo los principios de responsabilidad compartida y manejo integral, que considera el conjunto de acciones, procedimientos y medios viables e involucra a productores, importadores, exportadores, distribuidores, comerciantes, consumidores, usuarios de subproductos y grandes generadores de residuos, según corresponda, así como a los tres niveles de gobierno” (Carbajal, 2014).

Generadores de residuos

En el artículo 151 de la LGEEPA especifica que: “La responsabilidad del manejo y disposición final de los residuos peligrosos corresponde a quien los genera”, mientras que la LGPGIR en su artículo 45 delega las responsabilidades de identificación, clasificación y manejo de los residuos generados para lo cual cataloga a los generadores en 3 grupos.

Gran generador: persona física o moral que genere una cantidad igual o superior a 10 toneladas en peso bruto total de residuos al año.

Pequeño generador: persona física o moral que genere una cantidad igual o mayor a cuatrocientos kilogramos y menor a diez toneladas en peso bruto total de residuos al año.

Microgenerador: establecimiento industrial, comercial o de servicios que genere una cantidad de hasta cuatrocientos kilogramos de residuos peligrosos al año.

Normas oficiales mexicanas sobre el manejo e identificación de los residuos peligrosos

- ✚ La NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. El residuo es peligroso si presenta al menos una de las siguientes características: Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad Ambiental, Inflamabilidad y Biológico-

Resultados y discusión

Infecciosa de acuerdo con lo establecido por los códigos de peligrosidad de los residuos (CPR) como se muestra en la Tabla 11.

Un residuo es peligroso si se encuentra en alguno de los listados presentes en esta norma:

Listado 1: clasificación de residuos peligrosos por fuente específica.

Listado 2: clasificación de residuos peligrosos por fuente no específica.

Listado 3: clasificación de residuos peligrosos resultado del desecho de productos químicos fuera de especificaciones o caducos (Tóxicos Agudos).

Listado 4: clasificación de residuos peligrosos resultado del desecho de productos químicos fuera de especificaciones o caducos (Tóxicos Crónicos).


Listado 5: clasificación por tipo de residuos, sujetos a Condiciones Particulares de Manejo.

Tabla 14

Códigos de peligrosidad de los residuos (CPR). Fuente: NOM-052-SEMARNAT., 2005

Características	Código de Peligrosidad de los Residuos (CPR)
Corrosividad	C
Reactividad	R
Explosividad	E
Toxicidad	T
Ambiental	Te
Aguda	Th
Crónica	Tt
Inflamabilidad	I
Biológico-Infeccioso	B

Nota: cuando se trate de una mezcla de residuos peligrosos de los listados 3 y 4 se identificarán con la característica del residuo de mayor volumen, agregándole al CPR la letra "M". *Fuente:* NOM-052-SEMARNAT., 2005

-  NOM-018-STPS-2015, Sistema para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo tiene el objetivo de establecer los requisitos mínimos de un sistema para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas que, de acuerdo con sus características físicas, químicas, toxicidad, concentración y tiempo

Resultados y discusión

de exposición, pueden afectar la salud de los trabajadores o dañar el centro de trabajo. Su campo de aplicación de esta norma rige en todo el territorio nacional y aplica en todos los centros de trabajo en los que se manejen, transporten o almacenen sustancias químicas peligrosas.

El sistema globalmente armonizado (GHS por sus siglas en inglés) de clasificación y etiquetados de productos químicos establecen criterios armonizados sobre los peligros de las sustancias químicas dentro de los centros de trabajo donde se incluye lo siguiente:

a) El listado actualizado de las sustancias químicas peligrosas y mezclas, en su caso, que contenga al menos:

- ✚ El nombre de la sustancia química peligrosa o mezcla;
- ✚ El número CAS para la sustancia y para las mezclas el número CAS de los componentes,
- ✚ La clasificación de sus peligros físicos y para la salud, específicos, relacionados con sus correspondientes divisiones o categorías.

b) Las hojas de datos de seguridad de las sustancias químicas peligrosas y mezclas;

c) La señalización o el etiquetado;

d) La capacitación y adiestramiento proporcionado a los trabajadores sobre el contenido de las hojas de datos de seguridad y de la señalización.

La señalización se deberá ubicar en lugares visibles del contenedor, anaquel o área del centro de trabajo, de tal manera que siempre puedan ser observadas por los trabajadores o servicios de atención de emergencias. Los elementos de la señalización de la sustancia química peligrosa o mezcla deberán coincidir con la información utilizada en la hoja de datos de seguridad.

La señalización deberá estar marcada, impresa, pintada, adherida o colocada al depósito, recipiente, anaquel o al área, y ser de material resistente e indeleble, que soporte las condiciones a las que deberá estar expuesta, para que no se altere la información y los colores de esta.

Los elementos que deberá integrar la señalización son los siguientes:

a) El nombre de la sustancia química peligrosa y mezcla;

Resultados y discusión

b) La palabra de advertencia, cuando se utilice la palabra “Peligro”, no deberá aparecer la palabra “Atención”.

Los elementos se presentan en dos apartados: 1) Peligros físicos y 2) Peligros para la salud.

Peligros físicos: explosivos, gases inflamable y gases químicamente inestables, aerosoles, gases comburente, gases a presión, líquidos inflamables, sólidos inflamables, sustancias y mezclas que reaccionan espontáneamente autorreactivas, líquidos pirofóricos, sólidos pirofóricos, sustancias y mezclas que experimentan calentamiento espontáneo, sustancias y mezclas que en contacto con el agua, desprenden gases inflamables, líquidos comburentes, sólidos comburentes, peróxidos orgánicos y sustancias y mezclas corrosivas para los metales

Peligros para la salud: toxicidad aguda, corrosión/irritaciones cutáneas, lesiones oculares graves/irritación ocular, sensibilización respiratoria y cutánea, mutagenicidad en células germinales, carcinogenicidad, toxicidad para la reproducción, toxicidad específica de órganos blanco (exposición única), toxicidad específica de órganos blanco (exposiciones repetidas), peligro por aspiración

c) Los pictogramas o símbolos que apliquen que se observan en la Tabla 12, de acuerdo con la categoría de sus peligros físicos y para la salud. En los casos en que el peligro no tiene asociado un símbolo, solamente se colocarán las palabras de advertencia y la indicación de peligro; en ningún otro caso deberá haber pictogramas sin símbolo.

Los pictogramas deben de cumplir con las características de tener forma de rombo con borde rojo o borde negro (usada de manera interna) y contener el símbolo en color negro con fondo de color blanco.

d) El Código de identificación de peligro H y su indicación de peligro físico y para la salud. Con base en lo dispuesto en el Apéndice C, Tabla C1 y Tabla C2, de la presente Norma. Se resume lo siguiente:

Las frases H están compuestas por la clave alfanumérica que consistirá en una letra y tres números:










La letra “H” por indicación de peligros del inglés “Hazard statement”, el primer dígito designa el tipo de peligro al que se le asigna la indicación, la cual puede ser “2” peligros físicos y “3” para peligros para la salud, los dos siguientes números corresponden a la numeración

Resultados y discusión

consecutiva de los peligros según las propiedades intrínsecas de las sustancias química peligroso y mezcla. Ejemplo H200 (Explosión inestable)- H300 (Mortal en caso de ingesta).

Tabla 15

Símbolos, descripción y código GHS de los diferentes pictogramas de identificación.

Bomba explotando- Explosivo-GHS01	Llama-Inflamable-GHS02	Llama sobre círculo - Oxidante-GHS03
		
Botella de Gas-Gas Presurizado-GHS04	Corrosión-Corrosivo- GHS05	Calavera y Tibias Cruzadas -Veneno o Peligro de muerte-GHS06
		
Signo de Exclamación- Irritante-GHS07	Pecho agrietado-Peligro de Salud, Mutagénico, Cancerígeno, Reprotóxico- GHS08	Medio Ambiente -Dañino para el ambiente-GHS09
		

Fuente: NOM-018-STPS, 2015.

Resultados y discusión

En el caso de la etiqueta, se adicionarán los Códigos de identificación P y su consejo de prudencia para los peligros físicos y para la salud, conforme a lo que establece el Apéndice D, Tabla D.1 de la norma de referencia. Se resume lo siguiente:

Las frases P para los consejos de prudencia están compuestas por la clave alfanumérica que consistirá en una letra y tres números:

La letra “P” corresponden a los consejos de prudencia que proviene del inglés “precautinary statement”, el primer dígito designa el tipo de prudencia al que se asigna la indicación; “1” Consejos de prudencia de carácter general; “2”, Consejos de prudencia relativos a la prevención; “3”, Consejos de prudencia relativos a la intervención/respuesta; “4”, Consejos de prudencia relativos al almacenamiento, y “5”, Consejos de prudencia relativos a la eliminación. Los dos números siguientes corresponden a la numeración consecutiva de los consejos de prudencia.

Los consejos de prudencia se clasifican en cinco apartados: generales, prevención, intervención/respuesta, almacenamiento y eliminación. Ejemplo P101 (Si se necesita consultar a un médico) -P201 (Procurarse las instrucciones antes del uso) -P301 (en caso de ingestión)-P401 (almacenar conforme a.) -P501 (eliminar el contenido/recipiente).

Como sistema complementario a la NOM-018-STPS-2015 se establece la NMX-R-019-SCFI-2011 Sistema Armonizado de Clasificación y Comunicación de peligros de los productos químicos.

- ✚ NOM-054-SEMARNAT-1993, Que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos.

La cual muestra listas de compuestos químicos divididos en distintos grupos reactivos identificados en el anexo 1 de la norma conformados por un total de 41 grupos estos se describen en la Tabla 13. En el anexo 2 de la norma se muestra la Tabla de incompatibilidad de acuerdo con los grupos enlistados se lee su incompatibilidad en las intersecciones donde se muestran los diferentes códigos de reactividad que se especifican en el anexo 3 código de reactividad con sus consecuencias de reacción que se muestran en la Tabla 14.

Tabla 16

Número y nombre de los grupos reactivos.

Número	Nombre del grupo reactivo	Número	Nombre del grupo reactivo
1	Ácidos minerales no oxidantes	22	Otros metales elementales o mezclados en forma de polvos, vapores o partículas
2	Ácidos minerales oxidantes	23	Otros metales elementales y aleaciones tales como láminas, varillas y moldes
3	Ácidos orgánicos	24	Metales y compuestos de metales tóxicos
4	Alcoholes y glicoles	25	Nitruros
5	Aldehídos	26	Nitrilos
6	Amidas	27	Compuestos nitrados
7	Aminas, alifáticas y aromáticas	28	Hidrocarburos alifáticos no saturados
8	Azo compuestos, diazo compuestos e hidracinas	29	Hidrocarburos alifáticos saturados
9	Carbamatos	30	Peróxidos e hidroperóxidos orgánicos
10	Caústicos	31	Fenoles y cresoles
11	Cianuros	32	Organofosforados, fosfotiatos y fosfoditiatos
12	Ditiocarbamatos	33	Sulfuros inorgánicos
13	Ésteres	34	Epóxidos
14	Éteres	101	Materiales inflamables y combustibles
15	Fluoruros inorgánicos	102	Explosivos
16	Hidrocarburos aromáticos	103	Compuestos polimerizables
17	Órgano-halogenados	104	Agentes oxidantes fuertes
18	Isocianatos	105	Agentes reductores fuertes
19	Cetonas	106	Agua y mezclas que contienen agua
20	Mercaptanos	107	Sustancias reactivas al agua
21	Metales alcalinos, alcalinotérreos, elementales o mezclas		

Fuente: NOM-054-SEMARNAT, 1993.

Tabla 17

Código de reactividad y su descripción.

Código de reactividad	Consecuencias de la reacción
H	Genera calor por reacción química.
F	Produce fuego por reacciones exotérmicas violentas y por ignición de mezclas o de productos de la reacción.
G	Genera gases en grandes cantidades y puede producir presión y ruptura de los recipientes cerrados.
gt	Genera gases tóxicos.
gf	Genera gases inflamables.
E	Produce explosión debido a reacciones extremadamente vigorosas o suficientemente exotérmicas para detonar compuestos inestables o productos de reacción
P	Produce polimerización violenta, generando calor extremo y gases tóxicos e inflamables
S	Solubilización de metales y compuestos metales tóxicos
D	Produce reacción desconocida. Sin embargo, debe considerarse como incompatible la mezcla de los residuos correspondientes a este código, hasta que se determine la reacción específica.

Fuente: NOM-054-SEMARNAT, 1993.

Datos del Generador

La Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla se encuentra ubicada en Av. San Claudio y 18 sur Ciudad Universitaria Col. Jardines de San Manuel C.P. 72570 Puebla, Pue. Tel. 2295500, Ext: 725.

Se seleccionaron los laboratorios de análisis de agua, análisis de suelo, química ambiental con laboratorio y residuos sólidos y peligroso de Ingeniería Ambiental como generadores de residuos químicos peligrosos ubicados en los edificios FIQ5106-107 y FIQ9 301-302.

Objetivo del Plan de Gestión de Residuos Químicos

Establecer una propuesta de gestión de residuos químicos de los laboratorios de Ingeniería Ambiental: análisis de agua, análisis de suelo, química ambiental con laboratorio y residuos sólidos y peligrosos con las medidas preventivas y correctivas que permitan la minimización de residuos peligrosos, así como las acciones que permitan su correcto manejo y disposición.

Objetivos específicos

- ✚ Llevar un control y seguimiento de los inventarios de reactivos que se utilizan en los laboratorios de estudio.
- ✚ Minimizar la generación de los residuos con reducciones en las alícuotas de muestras y reactivos de las prácticas experimentales.
- ✚ Propuesta de diseño de etiquetas y formatos de control y verificación de generación de residuos.
- ✚ Establecer personal responsable sobre el control y manejo de residuos.
- ✚ Establecer una propuesta de tratamiento de los residuos químicos orgánicos.

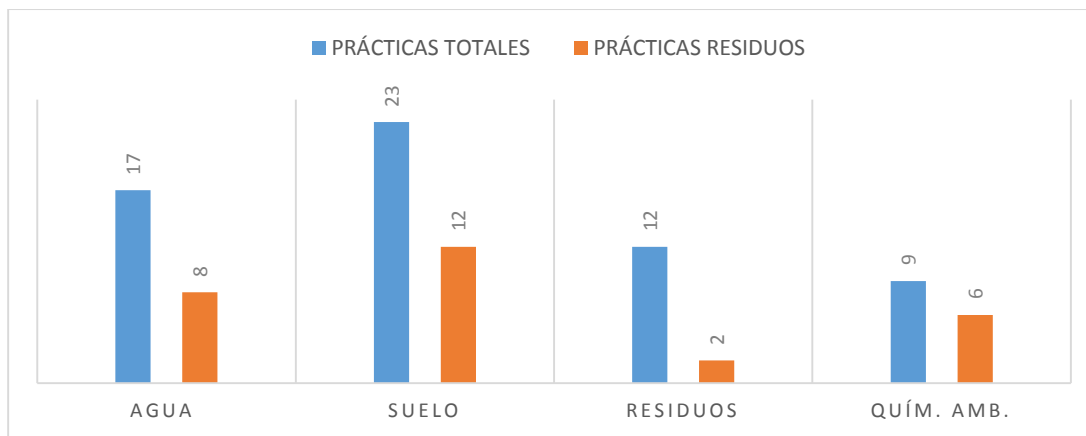
La gestión y el manejo de residuos químicos generados en un laboratorio implican una serie de acciones encaminadas a la reducción, reaprovechamiento, tratamiento y disposición final de los mismos, con la finalidad de contribuir al ahorro y conservación de los materiales, proteger la salud y preservar el ambiente.

1. Diagnóstico

Mediante el análisis de los manuales de prácticas de los laboratorios en estudio se realizó el reconocimiento de las prácticas, reactivo, material, procedimientos y la generación de los residuos derivadas de las mismas, así como su manejo y disposición final. En la Figura 39 se muestra las prácticas generadoras de residuos.

Figura 39

Número de prácticas totales y numero de prácticas que generan residuos químicos.



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 15 se muestran las prácticas, procedimientos o métodos y los residuos que se generan a partir de la revisión y análisis de los manuales de los laboratorios de estudio.

Tabla 18

Prácticas y procedimientos generadoras de residuos de los laboratorios de estudio.

Laboratorio	Prácticas Totales	Prácticas generadoras de residuos	Norma/ Procedimiento	Residuos
Análisis de agua	17	10 Determinación de DQO5	NMX-AA-028-SCFI-2001	Sales Inorgánicas
		11 Determinación de Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001	Sales inorgánicas
		12 Determinación de dureza total por calcio y magnesio	NMX-AA-072-SCFI-2001	Sales inorgánicas
		13 Determinación de acidez y alcalinidad	NMX-AA-036-SCFI-2001	Sales inorgánicas
		14 Determinación de grasas y aceites	NMX-AA-005-SCFI-2001	Residuos inorgánicos
		15 Determinación de nitrógeno total	NMX-AA-026-SCFI-2000 - Método micro kjeldahl	Desechos ácidos se deben de neutralizar
		16 Determinación de Fósforo total	NMX-029-SCFI-2001	Desechos ácidos se deben de neutralizar
Análisis de suelo	23	17 Determinación de DQO	NMX-AA-030-SCFI-2001- M. Reflujo Abierto	Residuos de mercurio
		10 Determinación de textura del Suelo	Procedimiento de Bouyucos - NOM-021-SEMARNAT-2000	El suelo con agua -y con Hexafosfato de sodio
		12 Porcentaje de Carbono Orgánico y materia orgánica	Método Walkley Y Black -oxidación por dicromato de potasio	El dicromato de potasio
		13 Obtención del extracto de saturación por vacío	Método por filtrado al vacío	Solución de hexametáfosfato de sodio 1%-Suelo en pasta
		15 Determinación de CE en el extracto saturado	Conductividad eléctrica	El suelo con agua
		16 Determinación de Carbonatos	Análisis cualitativo de carbonatos de calcio con una solución de ácido clorhídrico	Solución de ácido sulfúrico

Tabla 19

Prácticas y procedimientos generadoras de residuos de los laboratorios de estudio (continuación).

Laboratorio	Practicas Totales	Practicas generadoras de residuos	Norma/ Procedimiento	Residuos
Análisis de suelo		17 Determinación de Bicarbonatos		Extracto de suelo y ácido sulfúrico
		18 Determinación de cloruros	Método relación de los cloruros con nitrato de plata (precipitado estable)	Extracto de suelo -Nitrato de plata 0.05N -Cromato de potasio
		19 Determinación de calcio	Titulación EDTA	EDTA-Extracto de suelo
		20 Determinación de Magnesio	Titulación EDTA	EDTA y Extracto de suelo
		21 Determinación de acidez extraíble	Método AS-32	Cloruro de bario, TEA y HCL
		22 Determinación de Capacidad de Intercambio iónico (CIC)	Método de saturación con acetato de sodio pH8.2	Acetato de sodio -EDTA - NH4CL -NH4OH
		23 Determinación de nitrógeno total	Procedimiento micro Kjeldahl	CuSO45H2O-HgO-H3BO4- Referise al Manual Interno de Gestión de Residuos
Residuos sólidos y peligrosos	12	10 Determinación de materia orgánica	NMX-AA-21-1985 Método de Walkley y Black	No se mencionan residuos en la practica
		11 Determinación de Nitrógeno Total	NMX-AA-24-1982 Método Kjeldahl	No se mencionan residuos en la practica

Tabla 20

Prácticas y procedimientos generadoras de residuos de los laboratorios de estudio (continuación).

Laboratorio	Prácticas Totales	Prácticas generadoras de residuos	Norma/ Procedimiento	Residuos
Química ambiental con laboratorio	9	3 Efecto invernadero 1	Dióxido de carbono Método de B. Mattson	Residuos ácidos
		5 Determinación de la DQO	Método de reflujo NMX-AA-030-SCFI-2001	Residuos ácidos y sales inorgánicas (mercurio, plata y cromo)
		6 Determinación de Hierro	Método colorimétrico de la fenantrolina	Soluciones acidas
		7 Obtención de óxido nítrico		Residuos de sales más ácidos
		8 Lluvia ácida	Comprobación daños corrosión	Residuos ácidos
		9 Efecto invernadero 2	Cambio de temperatura en una simulación del efecto invernadero	Residuos carbonatos y ácidos

Fuente: Elaboración propia

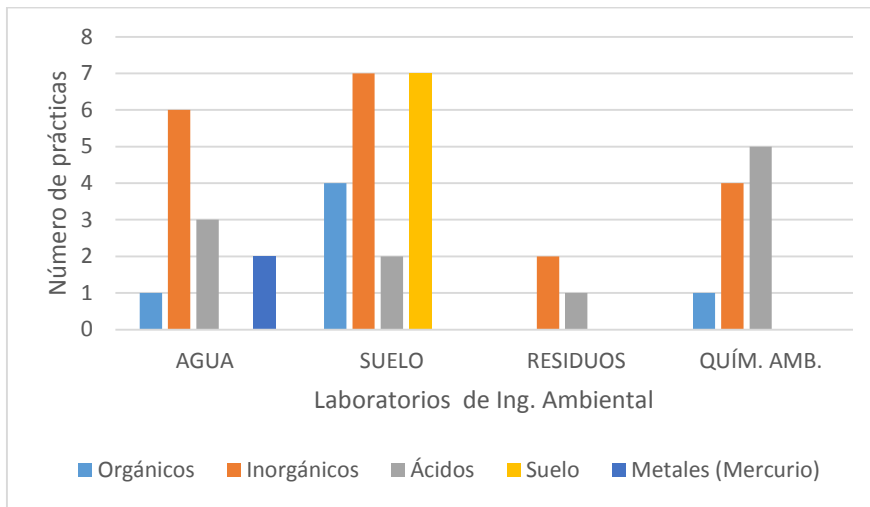
Resultados y discusión

2. Segregación o clasificación:

Se identificó la generación de residuos orgánicos e inorgánicos. También se pueden identificar residuos ácidos, residuos de suelo y aunque en poca cantidad residuos de metales tóxicos como el mercurio (Figura 40).

Figura 40

Número de prácticas que generan residuos químicos clasificados en 5 grupos.



Fuente: Elaboración propia.

También se realizó la identificación de los reactivos e indicadores más utilizados en las diferentes prácticas Tabla 16.

Tabla 21

Reactivos e indicadores más utilizados en los laboratorios de estudio.

Reactivos	Indicadores
Ácido Sulfúrico	Negro de ericroma T
Ácido clorhídrico	Anaranjado de metilo
Hidróxido de Sodio	Fenolftaleína
Dicromato de potasio	Murexida
Cromato de Potasio	Fenantrolina
EDTA	

Fuente: Elaboración propia

Se realizó el análisis de incompatibilidad de los residuos de acuerdo con lo establecido por la NOM-054-SEMARNAT-1993 que se muestra en la Tabla 17.

Tabla 22

Incompatibilidad de los residuos de los laboratorios de estudio.

Grupos reactivos y ejemplos	Num.	1	2	3	9	10	21	24	104
Ácido minerales no oxidantes (ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico, ácido fosfórico, etc.)	1				H G	H F	gf H F	S	H gt
Ácido minerales oxidantes (ácido nítrico, ácido sulfúrico, ácido perclórico, ácido crómico, etc.)	2			G H	H gt		H F gf H F	S	
Ácidos orgánicos (ácido fórmico, ácido etanoico, ácido benzoico, ácido cítrico)	3		G H			H	gf H F	S	H gt
Carbamatos (aldicarb, carbaryl, carbofan, landrín, etc)	9	H G	H gt				gf H F		H F gt
Cáusticos (hidróxido de calcio, amoníaco, hipoclorito sódico, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, ácido nítrico, etc.)	10	H F	H F	H			gf H F	S	
Metales alcalinos, alcalinotérreos (familia IIA grupo 2 –grupo1)	21	gf H F	gf H F	gf H F	gf H F	gf H F			H F E
Metales y comp. metales tóxicos (mercurio, plomo, cadmio, níquel, cromo, cobre, arsénico, etc.)	24	S	S	S		S			
Agente Oxidante fuerte (permanganato de potasio, peróxido de hidrogeno, halógenos, etc.)	104	H gt		H gt		H F gt	H F E		

Fuente: Elaboración propia

3. Cuantificación de los residuos

Se cuenta con un registro de recolección de residuos de la FIQ, BUAP en los cuales clasifican sus residuos en orgánicos e inorgánicos (Tabla 18) generando un costo para su disposición final por parte de una empresa particular.

Tabla 23

Registro de recolección de residuos químicos de la FIQ 2020.

Residuos	Cantidad (Porrones 20 L)
Inorgánicos	8
Orgánicos	20
Reactivos caducos	7
Laboratorio Alimentos	40
Costo recolección	\$23,000.00 MXN

Fuente: Elaboración propia


De acuerdo con las cantidades reportadas anualmente en los laboratorios de estudios se entra dentro de la categoría de microgeneradores.

4. Registro y control

Se proponen 3 formatos se registró y control: el formato de control de residuos Figura 41, el formato de control de reactivos Figura 42 y el formato de identificación de bidones con residuos Figura 43 y una propuesta de su llenado en la Figura 44.

Figura 41

Formato de seguimiento y verificación de generación de residuos.

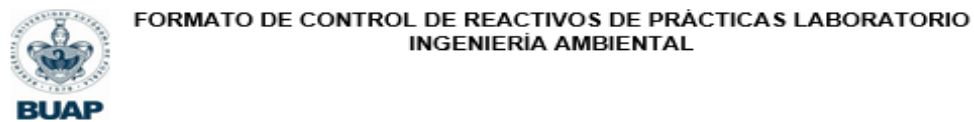

**FORMATO DE CONTROL DE RESIDUOS DE PRÁCTICAS LABORATORIO
INGENIERÍA AMBIENTAL**

No.	Fecha	Lab.	Práctica	Profesor	Residuo	Cantidad

Fuente: Elaboración propia.

Figura 42

Formato de seguimiento de inventario de reactivos.



No.	Fecha	Lab.	Reactivo	Cantidad	Ubicación	Fecha de caducidad

Fuente: Elaboración propia.

Propuesta de formato de etiquetado conforme a los establecido en la NOM-052-SEMARNAL-2005 y NOM-018-STPS-2015.

Figura 43

Formato de etiquetas de identificación de residuos peligrosos.

The diagram shows a hazardous waste identification label template with the following fields:

- Generador :** (Field for generator name)
- Laboratorio:** (Field for laboratory name)
- Palabra de advertencia:** (Field for warning word)
- Nombre del Residuo por compatibilidad :** (Field for residue name)
- Código de identificación H:** (Field for H-codification)
- Código de identificación P:** (Field for P-codification)
- Código de Peligrosidad CPR :** (Field for hazard code)
- Nombre/Contacto del Responsable :** (Field for responsible person name)
- PICTOGRAMA DE PELIGROSIDAD** (Hazard pictogram area)

Fuente: Elaboración propia.

Figura 44

Propuesta de llenado de etiquetas de identificación de residuos peligroso con la clasificación propuesta por tipo de residuos generados.

<p>Generador : FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA INGENIERÍA AMBIENTAL</p> <p>Laboratorio: ANÁLISIS DE AGUA</p> <p>Palabra de advertencia: PELIGRO</p> <p>Nombre del Residuo por compatibilidad : Orgánicos</p> <p>Código de identificación H: Peligro físico -H226 Líquidos y vapores inflamables Peligro a la salud - H303 + H313 + H333 Puede ser nocivo en caso de ingestión, en contacto con la piel o si se inhala Código de identificación P: P210 Mantener alejado del calor, chispas, llamas al descubierto y otras fuentes de ignición. No fumar P280 Usar guantes/ropa de protección/equipo de protección para la cara /los ojos P404 Almacenar en un recipiente cerrado</p>	 <p>Código de Peligrosidad CPR : T (Th) - I</p> <p>Nombre/Contacto del Responsable :</p>	<p>Generador : FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA INGENIERÍA AMBIENTAL</p> <p>Laboratorio: ANÁLISIS DE AGUA</p> <p>Palabra de advertencia: PELIGRO</p> <p>Nombre del Residuo por compatibilidad : Ácidos</p> <p>Código de identificación H: Peligro físico - H290 Puede ser corrosiva para los metales Peligro a la salud - H314 Provoca graves quemaduras en la piel y lesiones oculares H304 Puede ser mortal en caso de ingestión y de penetración en las vías respiratorias Código de identificación P: P280 Usar guantes/ropa de protección/equipo de protección para la cara /los ojos P404 Almacenar en un recipiente cerrado</p>	 <p>Código de Peligrosidad CPR : C - T (Th)</p> <p>Nombre/Contacto del Responsable :</p>
<p>Generador : FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA INGENIERÍA AMBIENTAL</p> <p>Laboratorio: ANÁLISIS DE AGUA</p> <p>Palabra de advertencia: PELIGRO</p> <p>Nombre del Residuo por compatibilidad : Inorgánicos</p> <p>Código de identificación H: Peligro físico - H290 Puede ser corrosiva para los metales Peligro a la salud - H314 Provoca graves quemaduras en la piel y lesiones oculares H315 + H320 Provoca irritación cutánea y ocular Código de identificación P: P262 Evitar todo contacto con lo ojos, la piel y la ropa P280 Usar guantes/ropa de protección/equipo de protección para la cara /los ojos P404 Almacenar en un recipiente cerrado</p>	 <p>Código de Peligrosidad CPR : C - T (Th)(Ta)</p> <p>Nombre/Contacto del Responsable :</p>	<p>Generador : FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA INGENIERÍA AMBIENTAL</p> <p>Laboratorio: ANÁLISIS DE AGUA</p> <p>Palabra de advertencia: PELIGRO</p> <p>Nombre del Residuo por compatibilidad : Metales Tóxicos</p> <p>Código de identificación H: Peligro a la salud - H300 Mortal en caso de ingestión H311 + H331 Tóxico en contacto con la piel o se inhala H371 Provoca daños en los órganos (vías respiratorias riñón - sistema nervioso)-Toxicidad específica de órganos blanco (exposición única) H372 Provoca daños en los órganos (vías respiratorias riñón - sistema nervioso)-Toxicidad específica de órganos blanco (exposiciones repetidas) Código de identificación P: P273 No dispersar en el medio ambiente P280 Usar guantes/ropa de protección/equipo de protección para la cara /los ojos.</p>	 <p>Código de Peligrosidad CPR : T (Th) (Ta)</p> <p>Nombre/Contacto del Responsable :</p>

Fuente: Elaboración propia.

5. Verificación y cumplimiento

Al inicio de cada año escolar se realizará la propuesta y selección del responsable de la verificación y control de los residuos químicos procedentes de los laboratorios de estudio. Se encargara de la verificación de los formatos de registros y las etiquetas de identificación de residuos, así también se encargará de contar con la información de servicios de emergencia en caso de derrames accidentales y los procedimientos a seguir para seguridad de personal académico y estudiantil.

También verificará que los bidones sean de un material apropiado y que los residuos no rebasen el 80-90% de su capacidad y se encuentren dentro de un lugar seguro fuera del paso, así como de inclemencias ambientales libres de fugas o rupturas.

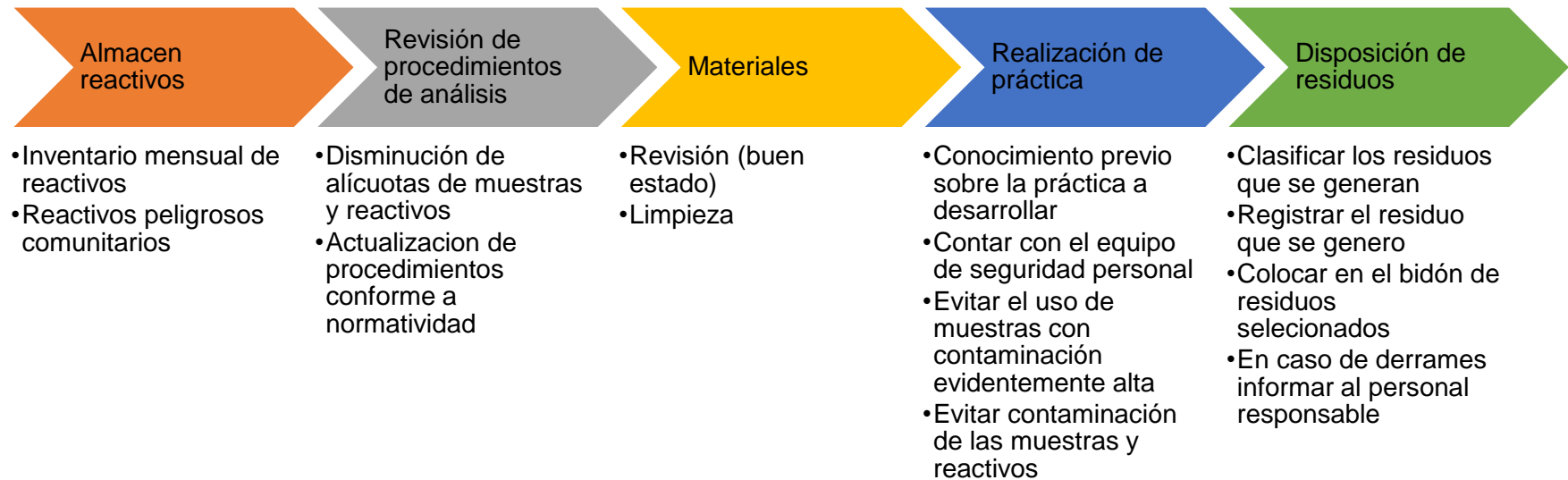
La verificación se realizará al final de cada periodo de realización de prácticas de acuerdo a los periodos escolares en primavera (mayo), verano (julio) y otoño (diciembre).

Propuesta de acciones de minimización en cada etapa del proceso de generación de residuos

Las propuestas de minimización (Figura 45) van encaminadas a la disminución de la generación y peligrosidad de residuos químicos peligrosos. Estas acciones se pueden aplicar y evaluar su funcionabilidad mediante los registros de control y verificación. Se pueden replantear estas medidas de acuerdo con las necesidades actuales con la institución.

Figura 45

Propuestas de acciones de minimización en cada etapa del proceso de generación de residuos químicos.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24

Descripción de las acciones de minimización propuestas en cada etapa del proceso de generación de residuos químicos peligrosos.

Etapa	Acciones	Descripción	Beneficio
Almacén reactivos	Inventario	Realizar el inventario de los reactivos en almacén mensualmente	-Conocer las cantidades necesarias para la programación de compras futuras -Utilización de reactivos de acuerdo con su fecha de caducidad
	Reactivos peligrosos comunitarios	Identificar los reactivos con alta peligrosidad que sean utilizados en los laboratorios de estudio: dicromato de potasio, cromato de potasio, EDTA, ácido sulfúrico y clorhídrico e hidróxido de sodio, etc.	-Utilizar comunitariamente reactivos considerados como peligrosos en los laboratorios de estudio -Limitar su compra y cantidades de almacenamiento
	Disminución de alícuotas de muestras y reactivos	Determinar los procedimientos con los volúmenes mínimos necesarios	-Disminución de generación de residuos y utilización de reactivos
Revisión de procedimientos de análisis	Actualización de procedimientos conforme a la normatividad	Revisar las actualizaciones de las normas y procedimientos	-Contar con procedimientos actuales
Materiales	Revisión	Revisar el estado actual de los materiales	-Evitar contaminación y derrames de las muestras y reactivos
	Limpieza	Revisar la limpieza de los materiales	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25

Descripción de las acciones de minimización propuestas en cada etapa del proceso de generación de residuos químicos peligrosos (continuación).

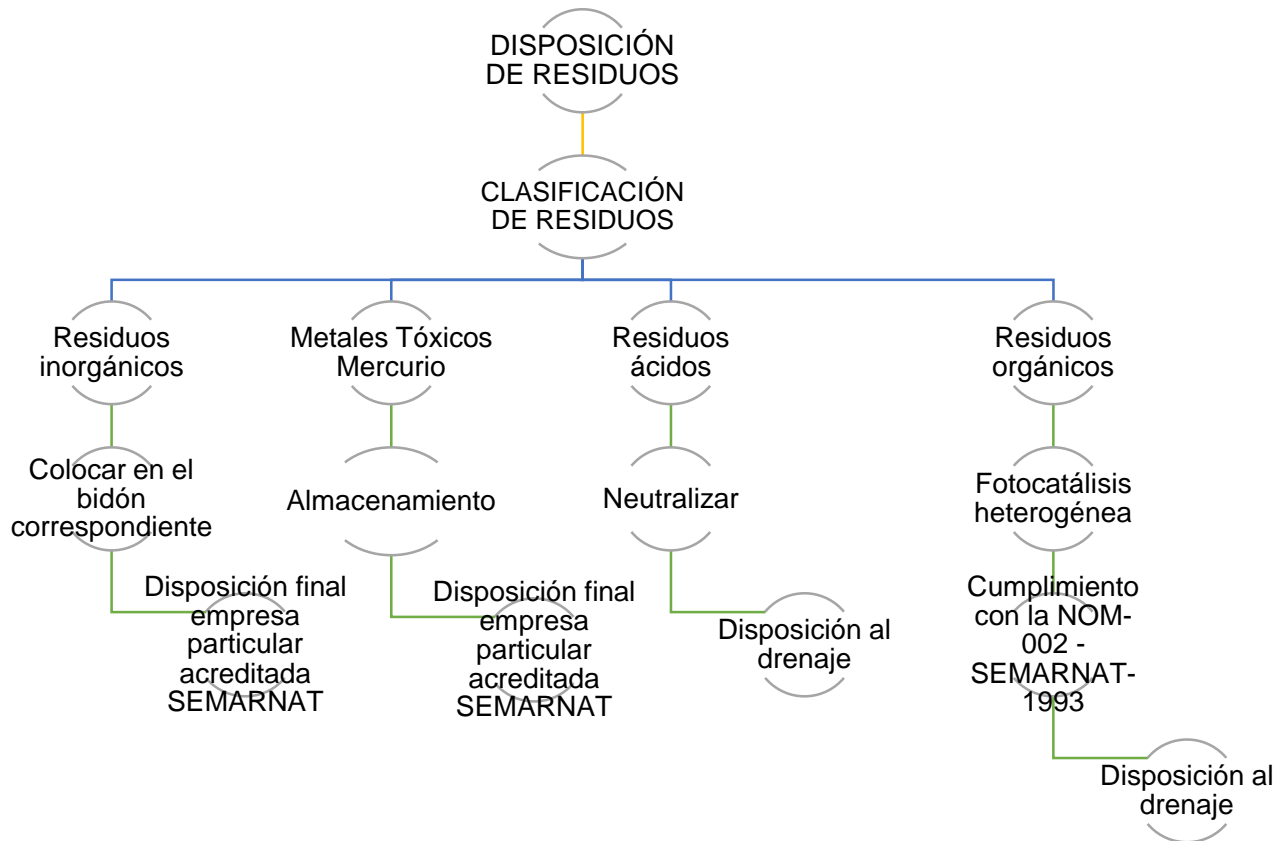
Etapa	Acciones	Descripción	Beneficio
Realización de practicas	Conocimiento previo sobre la práctica a desarrollar	Lectura y estudio del manual de prácticas con los conocimientos básicos del objetivo del análisis	-Conocimiento de los reactivos, materiales y procedimiento a seguir para la realización de la practica
	Contar con el equipo de seguridad personal	Profesores y alumnos portar con el equipo de protección personal: bata, guantes, gafas, etc.	-Evitar el contacto directo de los reactivos
	Evitar el uso de muestras con contaminación evidentemente alta.	Selección de muestras sin alta cantidad evidente de contaminantes	-Evitar el uso de grandes volúmenes de reactivos para su análisis
	Evitar la contaminación de muestras y reactivos	Manejar las muestra y reactivos con las condiciones de seguridad para evitar su contaminación	-Evitar las interferencias de contaminación de las muestras y reactivos para su contaminación y desperdicio

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 46 se muestran la descripción del procedimiento de clasificación o segregación de los residuos identificados, su tratamiento y disposición final.

Figura 46

Clasificación o segregación de los residuos químicos acuosos y su propuesta de tratamiento y disposición final.



Fuente Elaboración propia

Tratamientos propuestos

- + **Almacenamiento de residuos de mercurio:** Los residuos de mercurio deben diluirse con ácido aproximadamente dos veces su volumen original, ajustar su pH a un valor mayor de 7 adicionando lentamente dilución de hidróxido de sodio (40 % a 50 %, peso/volumen) con agitación, Los residuos combinados deben tener un pH de 10 o mayor (de lo contrario agregar hidróxido de sodio hasta un pH 10 a 11). Agitar con pequeñas cantidades de disolución de tiosulfatos de sodio (40 % a 50 %, peso/volumen) mientras el residuo alcalino este aún tibio y hasta que no ocurra ninguna precipitación. Dejar que sedimente el precipitado y drenar unos cuantos mililitros de la disolución sobrenadante asegurando que el

pH esté aún arriba de 10, adicionar un volumen igual de disolución de tiosulfato de sodio (si el sobrenadante aún contiene mercurio disuelto), se forma un precipitado, indicando que debe adicionarse más tiosulfato de sodio. Decantar o sifonear el sobrenadante y descartar después que el precipitado se ha sedimentado. Lavar el precipitado dos veces con agua que contenga trazas de hidróxido de sodio, dejar sedimentar y descartar los lavados. Secar el precipitado (primero con aire y después en una estufa a temperatura no mayor de 110°C), almacenar en un contenedor hermético los sólidos secos hasta que haya una cantidad suficiente para ser recolectada por una empresa especializada para su disposición final (NMX-030-SCFI, 2001, p.15).

✚ **Neutralización:** se aplica a bases y ácidos minerales/orgánicos para alcanzar un pH neutro de 7. Primero se realiza una dilución de la solución para alcanzar una concentración no mayor de 1 M, posterior se agrega una solución diluida de carbonato de sodio, hidróxido de sodio, ácido sulfúrico o ácido clorhídrico, etc. dependiendo si es un ácido o base, se agita la solución. Si la reacción es exotérmica puede añadirse un poco de hielo a la solución para que la temperatura no exceda los 40°C. Una vez ajustado el pH a la neutralidad, el residuo puede ser vertido al drenaje bajo chorro de agua (Álvarez, Arce y Parra, 2003, p.36).

✚ **Fotocatálisis heterogénea:** es un proceso de fotodegradación se basa en el uso de semiconductores que contribuye a la formación de especies altamente oxidantes como lo es el radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), el cual se encarga de mineralizar la materia orgánica hasta dióxido de carbono y agua (CO_2 , H_2O). Este proceso es capaz de degradar diversos compuestos orgánicos no biodegradables ya que es un proceso no selectivo. (Gálvez *et al.*, 2001).

8.4 Diseño y descripción del tratamiento fotocatalítico de residuos químicos generados en laboratorios FIQ, BUAP

La propuesta del diseño de un fotorreactor tubular con colector solar FR01 consiste en un tubo transparente o translucido a la luz solar de borosilicato o acrílico de un diámetro de 10 cm y una longitud de 64 cm para un volumen 5 L que tiene dos válvulas una de entrada en la parte superior y una de salida en la parte inferior colocado sobre una superficie reflejante de lámina de aluminio anodizada, sujetadas a un marco metálico con una inclinación de 19°

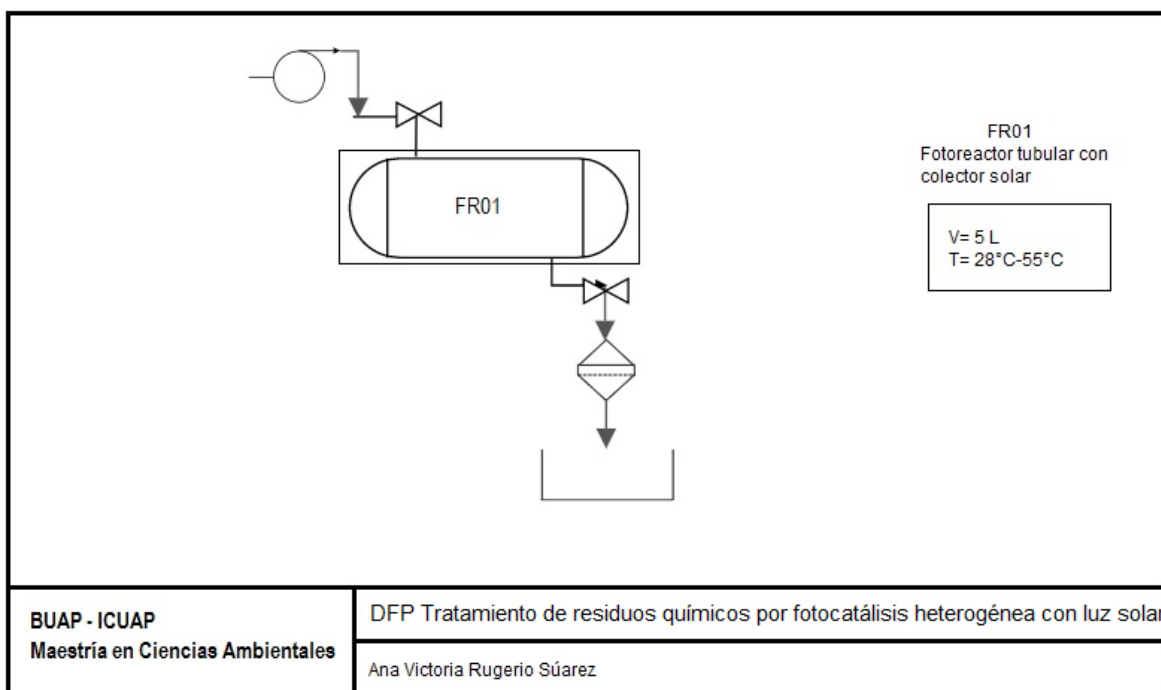
Resultados y discusión

para la recuperación máxima de radiación ultravioleta. Para la aeración del proceso se coloca una bomba de difusión de aire con un volumen de O_2 6 L/min. En la parte inferior se conecta a un filtro para la recuperación del catalizador inmovilizado TiO_2/SiO_2 .

Se seleccionará previamente el día de las pruebas fotocatalíticas verificando que se encuentre soleado y despejado de nubosidad con los valores de máxima intensidad de radiación UV. El fotorreactor se instalaría en una parte despejada de la FIQ en una orientación norte a sur para el tratamiento de residuos de los laboratorios de estudio. La Figura 47 representa el diagrama de flujo para las pruebas de fotocátalisis heterogénea con luz solar.

Figura 47

Diagrama de flujo de proceso para pruebas de fotocátalisis solar de residuos químicos de laboratorios de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Se realiza previamente la recolección de residuos de los laboratorios y se verifica que el pH este en un valor menor o aproximado a neutro (4-7) y que no exceda la concentración del material orgánico contaminante (Carbono Orgánico Total) ya que a concentraciones superiores a 100 mgL^{-1} se debe hacer una dilución. Se colocan los residuos en el fotorreactor tubular FR01 ($V= 5000 \text{ cm}^3$), posterior se coloca dentro del fotorreactor el

Resultados y discusión

catalizador inmovilizado ($0.25 \text{ g TiO}_2/\text{SiO}_2$), se conecta la bomba difusora de aire al fotorreactor para la aeración del proceso y se permita el contacto del catalizador con los residuos. Se deja un tiempo de retención $t_r = 3-5 \text{ h}$ en horarios de 10 am a 4 pm donde se encuentre la intensidad máxima de radiación UV. Para el seguimiento del proceso de degradación de contaminantes orgánicos se tomarán muestras ($V=10 \text{ mL}$) abriendo la válvula inferior del fotorreactor al transcurso de cada hora y se verificara la degradación de los contaminantes mediante espectrofotometría UV-Vis. Terminado el t_r se apaga la bomba difusora de aire y se abrirá la válvula de salida, los residuos pasan por un filtro para la recuperación del catalizador inmovilizado y se almacenan en un tanque abierto.

A los productos finales de las pruebas fotocatalíticas se le realizarán estudios de seguimiento de la DQO o COT y pruebas de determinación de toxicidad aguda para verificar que cumplan con parámetros para ser vertidos al sistema de alcantarillado y sigan el proceso de tratamiento de aguas residuales urbanas.

IX. Conclusiones

Mediante la revisión de la legislación y normatividad existente se pudo observar que ya existen bases sobre la gestión de los residuos químicos sin embargo estas se concentran en actividades industriales por lo que se requiere normatividad más específica a los laboratorios académicos para poder apegarse a sus lineamientos y cumplirse.

Con la revisión de los manuales de laboratorio se pudieron identificar los procedimientos, reactivos y residuos que se generan de acuerdo con el laboratorio y práctica, con estos datos se puede proponer una mejor clasificación para evitar mezclas complejas así poder hacer una propuesta de tratamiento de acuerdo a su composición y compatibilidad.

El proceso de fotocátalisis heterogénea con luz solar logró la remoción de los colorantes en las muestras sintéticas alcanzando un porcentaje de degradación mayor al 80% a excepción de la muestra combinada de colorantes con el catalizador TiO_2 . El catalizador TiO_2 presenta mayor remoción de colorantes, con desventaja de la generación de turbidez en las muestras, lo que dificulta su análisis por espectrofotometría UV-Vis y requiere de un proceso posterior para su separación del agua. El $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ también logra una alta remoción de colorante lo que indica que su inmovilización por el método sol-gel no afectó su actividad fotocatalítica, lo que representa una alternativa de tratamiento sin generar turbiedad y de fácil recuperación.

Se logró la degradación de los residuos químicos generados en las prácticas de laboratorio, en menor proporción debido a que los residuos son más complejos al ser combinados con diferentes muestras contaminadas y presentan mayor concentración de contaminantes. Por lo que se hace la propuesta de la separación de residuos de acuerdo con su compatibilidad y que las muestra no tengan un alto contenido de contaminantes.

Para la propuesta del plan de gestión de residuos es fundamental hacer un diagnóstico mediante el análisis de factores instituciones como los manuales de laboratorio, planes de manejo de residuos, disposición, final, etc. ya que permite ver la situación actual y establecer propuestas de mejora que permitan acciones de minimización de residuos, una mejor identificación y clasificación de los residuos, y permitan establecer un tratamiento de estos de acuerdo con características identificadas.

Conclusiones

El plan de gestión de residuos de laboratorio debe de contar con el respaldo administrativo, académico y estudiantil para su implementación y su mejora continua mediante registros, controles y verificación de este permitiendo así el cuidado de la salud e integridad humana y del medio ambiente.

La propuesta del diseño y operación del fotorreactor representa una tecnología eficaz y de operación sencilla con aprovechamiento de la energía solar para el tratamiento a mediana escala de los residuos químicos generados en los laboratorios de estudio. Permitiendo también el saneamiento del recurso agua para su cuidado y aprovechamiento en otras actividades.

X. Bibliografía

- Acosta Garcíá. L. (2009) *Proceso Fotofenton de oxidación química para el tratamiento de aguas industriales*. (Tesis de pregrado). Universidad Calor III de Madrid, Madrid, España.
- Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A. -, Elsamahy, T., Sun, J. (2022). *A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231
- Alvarez, R. Arce, E., Parra, V. (2003). *Manual de manejo de Residuos Peligrosos Químicos para la Universidad de Sonora*. Hermosillo, México.
- Arconada N., Castro Y., Durán A., (2008). *Síntesis y propiedades fotocatalíticas de recubrimientos porosos de TiO₂ -anatasa producidos por sol-gel*. X Congreso Nacional de Materiales. Donostia. San Sebastián España. pp. 1-7.
- Avedoy, V. J. G. (2006). *Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos*. Instituto Nacional de Ecología.
- Bedoya, L. A. F., & Muñoz, B. C. (2020). *Fabricación de capas antirreflejantes y absorbedores solares mediante la técnica Sol-gel: Un resumen sobre la variación de síntesis y condiciones experimentales realizadas en la UTP*.
- Beltrán, O., Berrio, L., Cardona, S., & Agudelo, E. (2012). *Sistemas de tratamiento para residuos líquidos generados en laboratorios de análisis químico*. *Gestión y Ambiente*, 15(3), 113-124.
- Bertini, L. M., & Cicerone, D. S. (2009). *Gestión de residuos generados en laboratorios de enseñanza de química en entidades universitarias con participación activa del alumnado*. In Conferencia llevada a cabo en congreso FINTDI "Fomento e Innovación con Nuevas Tecnologías en la Docencia de la Ingeniería", La Sociedad de Educación del IEEE (IEEE Education Society).
- Bojalil Carrillo, J., Hernández Flores, M. F., & Segura López, L. R. (2021). *Tecnologías microbianas de remoción de colorantes azoicos en la industria textil*. *RD-ICUAP*, 7(20), 186-201. Recuperado a partir de <http://rd.buap.mx/ojs-dm/index.php/rdicuap/article/view/608>.
- Bousselmi, L., Geissen, S. U., & Schroeder, H. (2004). *Textile wastewater treatment and reuse by solar catalysis: results from a pilot plant in Tunisia*. *Water Science and Technology*, 49(4), 331-337.
- Candal, R. J., Rodríguez, J., Colón, G., Gelover, S., Santos, E. V., González, A. J., & Blesa, M. A. (2001). *Materiales para fotocatalisis y electrofotocatalisis*. *Red CYTED VIII-G*, 143-163.
- Cantú Sifuentes, L., Múzquiz Ramos, E. M., & Valdez Flores, M. A. (2016). *Fundamentos de las Buenas Prácticas de laboratorio*. México. Universidad Autónoma de Coahuila.

Bibliografía

- Carbajo Olleros, J. (2013). Aplicación de la fotocatalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de TiO₂. (Tesis doctoral). Instituto de Catálisis y Petroleoquímica. Madrid.
- Chávez V. R. M. (2018). Manual de manejo de residuos peligrosos en los laboratorios de química básica. Universidad Veracruzana, Coatzacoalcos. Recuperado de: <https://www.uv.mx/coatza/cq/files/2020/09/MANUAL-DE-MANEJO-DE-RESIDUOS-PELIGROSOS.pdf>
- Cirelli, A. F. (2012). *El agua: un recurso esencial*. Química viva, 11(3), 147-170.
- Cisneros, B. E. J. (2001). *Contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México: Limusa, Colegio de Indenéros Ambientales de México, A. C.
- CONAGUA. (2016). Monitoreo de la calidad del agua, Subdirección general técnica gerencia de calidad del agua. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/145524/Monitoreo_de_calidad_del_agua_en_Mexico_2012-2015.pdf
- Cortazar Martínez, A., Coronel Olivares, C., Escalante Lozada, A., and González Ramírez, C. (2014). *Contaminación generada por colorantes de la industria textil*. Publicación Semestral VIDA CIENTÍFICA No.3. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Recuperado de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html>
- Cuenca, E. A., & de Nava, C. C. (2000). *Comunicación de riesgos: para el manejo de sustancias peligrosas, con énfasis en residuos peligrosos: manual*. Instituto Nacional de Ecología.
- DOF 08-01-2021 *Ley de Aguas Nacionales* Diario Oficial de la Federación el 1º de diciembre de 1992 Última reforma publicada DOF 06-01-2020. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_060120.pdf
- DOF 08-01-2021 *Ley General de Salud* Diario Oficial de la Federación el 7 de febrero de 1984 Última reforma publicada DOF 01-06-2021. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf_mov/Ley_General_de_Salud.pdf
- DOF 09/01/2012 *Ley Federal del Trabajo* Diario Oficial de la Federación el 1º de abril de 1970 Última reforma publicada DOF 09-04-2012. https://www.senado.gob.mx/comisiones/desarrollo_social/docs/marco/Ley_FT.pdf
- DOF 18-01-2021 *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente* Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988 Última reforma publicada DOF 18-01-2021. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_180121.pdf
- DOF 18-01-2021 *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos* Diario Oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003 Última reforma publicada DOF 18-01-2021. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_180121.pdf
- DOF 20-05-2021 *Ley Federal de Responsabilidad Ambiental* Diario Oficial de la Federación el 7 de junio de 2013, Última reforma publicada DOF 20-05-2021.
- DOF, 2014e. *Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. Diario Oficial de la Federación, publicado el 31 de octubre. México.
- DOF, 2014f. *Ley de Aguas Nacionales*. Última modificación. Diario Oficial de la Federación, publicado el 11 de agosto. México.

Bibliografía

- DOF, 2014g. *Reglamento Federal de Seguridad y Salud en el Trabajo. Diario Oficial de la Federación*, publicado el 13 de noviembre. México.
- Doménech, X., Jardin, W. F., & Litter, M. I. (2001). *Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. por fotocatalisis heterogénea*, 3-23.
- Elizalde, J. H., del Carmen Lallana, M., Foti, M. N., Gómez, S., & Fernández, F. J. (2016). *Evaluación de la fitotoxicidad de aguas residuales del municipio de Oro Verde, entre ríos, mediante el ensayo de toxicidad aguda en semillas*. Revista Científica Agropecuaria, 20(1-2), 67-77.
- Escuadra, S., Gómez, J., Altabás, L., Lasheras, A. M., Bezdicek, J., & Ormad, M. P. (2011). *Aplicación de nano-fotocatalisis con TiO₂ como tratamiento final de agua de salida de depuradora*.
- Fernández A., Guzmán A. (2007). *Obtención de recubrimientos con propiedades ópticas utilizando el método Sol-Gel*, trabajo de grado programa Ingeniería Física. Universidad del Cauca. pp. 19.
- Fernández-Ibáñez, P., Malato, S., & De Las Nieves, FJ (1999). Relación entre el tamaño de partícula de TiO₂ y el diámetro del reactor en la eficiencia de los fotorreactores solares. *Catalisis hoy*, 54 (2-3), 195-204.
- Foti, M. N., Billard, C., & Lallana, V. H. (2005). *Bioensayos de germinación con semillas de rúcula y lechuga para monitoreo de calidad de agua*. Revista Científica Agropecuaria, 9(1), 47-53.
- Gálvez, J. B., Rodríguez, S. M., Gasca, C. A. E., Bandala, E. R., Gelover, S., & Leal, T. (2001). *Purificación de aguas por fotocatalisis heterogénea: estado del arte. Purificación de aguas por fotocatalisis heterogénea: estado da arte*. La Plata.
- Garcés Giraldo, L. F., Mejia Franco, E. A., & Santamaria Arango, J. J. (2004). *La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales*. LASALLISTA DE INVESTIGACIÓN, 83-92.
- García, A. M. F., Guzman, A. M., Vera, E., & Páez, J. E. R. (2008). *Efectos de fotodegradación propiciados por recubrimientos de TiO₂ y TiO₂-SiO₂ obtenidos por Sol-Gel*. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 47(5), 259-266.
- Gavilán Garcia I., Gavilán García A., Cano Díaz G.S., Alcántara Concepción. (2012) *Guía Técnica de acción para residuos químicos*. Universidad Autónoma de México.
- Gaya, U. I., & Abdullah, A. H. (2008). *Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: a review of fundamentals, progress and problems*. *Journal of photochemistry and photobiology C: Photochemistry reviews*, 9(1), 1-12.
- Gil Pavas, E., Quintero Olaya, L., Rincón Uribe, M., & Rivera Agudelo, D. (2007). *Degradación de colorantes de aguas residuales empleando UV/TiO₂/H₂O₂/Fe*. Revista Universidad EAFIT, 43(146), 80-101.
- Gil, M. (2019). *Naranja de metilo: características, síntesis y aplicaciones*. Lifeder. Recuperado de <https://www.lifeder.com/naranja-de-metilo/>

Bibliografía

- Giraldo, L. F. G., Ángel, M. L. H., Mesa, G. A. P., Restrepo, A. R., & Palacio, J. A. S. (2005). *Degradación de aguas residuales de la industria textil por medio de fotocátalisis*. Revista Lasallista de investigación, 2(1), 15-18.
- Giraldo, L. F. G., Franco, E. A. M., & Arango, J. J. S. (2004). La fotocátalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de investigación, 1(1), 83-92.
- Gómez Umaña, J. C., & Chacón Páez, L. F. (2014). *Degradación fotocatalítica Homogénea de vapor condensado de cocción generado en el procesamiento de subproductos avícolas* (Tesis de pregrado). Universidad Libre. Bogotá.
- González, V. G., Velasco, F. E. H., & Candelo-Becerra, J. E. (2020). *Strategies for use, treatment, management and final disposition of wastes in academic laboratories*. TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control), 18(6), 3130-3141.
- Han, F., Kambala, VSR, Srinivasan, M., Rajarathnam, D. y Naidu, R. (2009). *Fotocatalizadores de dióxido de titanio adaptados para la degradación de tintes orgánicos en el tratamiento de aguas residuales: una revisión*. Catálisis aplicada A: General, 359 (1-2), 25-40.
- Harfaoui, SE, Driouich, A., Mohssine, A., Belouafa, S., Zmirli, Z., Mountacer, H., & Chaair, H. (2022). *Modelización y optimización del tratamiento del colorante reactivo negro-5 de efluentes industriales mediante metodología de diseño experimental*. Científico Africano, e01229.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la investigación* Capítulo 9 Recolección de datos cuantitativos.
- Hernández, J. G., Robles, J. P., Ruiz, F., & Martínez, J. R. (2000). *Vidrios SiO₂ nanocompuestos preparados por sol-gel: revisión*. Superficies y vacío, (11), 1-16.
- Hernando Ortega, N. (2017). *Estudio de la eliminación de diclofenaco en aguas residuales mediante fotocátalisis heterogénea con TiO₂*.
- Huang Y., Xuxu Z., Zhongyi Y., Feng T., Beibei F. y Keshan H., (2007) *Preparation of nitrogen-doped TiO₂ nanoparticle catalyst and its catalytic activity under visible light*, Chin. J. Chem. Eng., 15(6), 802-807.
- Ibarluzea, J., Aurrekoetxea, J. J., Porta, M., Sunyer, J., & Ballester, F. (2016). *La biomonitorización de sustancias tóxicas en muestras biológicas de población general*. Gaceta Sanitaria, 30, 45-54.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2017 Martínez Arroyo A., Paramo Figueroa V. H., Gavilán García A., Martínez Cordero M. A., Mendoza Cantú A., Cano Robles F. K. *Perfil Nacional de Sustancias Químicas*. México. 250-257 pp.
- Ize I., Zuk M. y Bracho Rojas L. (2010). *Introducción al análisis de riesgos ambientales*. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México, 219 pp.
- Jung S.M., Grange P., (2002). *TiO₂-SiO₂ mixed oxide modified with H₂SO₄: II. Acid properties and their SCR reactivity*, Appl. Catal. A, 228, p.p. 65-73.

Bibliografía

- Li, B., Hou, Y., Xu, D., Wu, Y., Sun, W., Hu, F., Deng, (2005). *Comparative study of sol-gel-hydrothermal and sol-gel synthesis of titania-silica composite nanoparticles*, "Journal of Solid State Chemistry, 178, p.p. 1395-1405.
- Li, F., Sun, S., Jiang, Y., Xia, M., Sun, M., and Xue, B. 2008. *Photodegradation of an azo dye using immobilized nanoparticles of TiO₂ supported by natural porous mineral*. Journal of Hazardous Materials, 152, 1037-1044.
- Llano, B., Marín, J. M., Restrepo, G., & Ríos, L. A. (2007). *Síntesis, caracterización y evaluación fotocatalítica de óxidos mixtos titanio-silicio*. Scientia et Technica, 1(36).
- Malato, S. (2004). *Definición de los POAS; Fotocatálisis (homogénea y heterogénea), aplicaciones de la luz solar en fotocatalisis, tecnología de los colectores solares*. Colombia.
- Martínez, J., Mallo, M., Lucas, R., Alvarez, J., & Salvarrey, A. (2005). *Guía para la gestión integral de residuos peligrosos: Fundamentos*. Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe. Montevideo Uruguay
- Mendoza Cantú, A., & Ize Lema, I. A. R. (2017). *Las sustancias químicas en México. Perspectivas para un manejo adecuado*. Revista internacional de contaminación ambiental, 33(4), 719-745.
- Mera Benavides, D. A., & Mera Benavides, A. C. (2011). *Tratamiento fotocatalítico de aguas residuales generadas en laboratorios con presencia del indicador verde de bromocresol*. Revista Lasallista de investigación, 8(1), 28-41.
- Mora, J. C., & Benavides, D. (2011). *Clasificación de residuos químicos en laboratorios de la Universidad Nacional*. Revista de Ciencias Ambientales, 41(1), 61-69.
- Morales, L. G. M. (2022). *Combinación de ZnO o TiO₂ con nanopartículas de oro para la remoción del colorante Naranja de Metilo del agua*. (Tesis de grado). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.. México.
- Mosquera, E., Rosas, N., Debut, A., & Guerrero, V. H. (2015). *Síntesis y caracterización de nanopartículas de dióxido de titanio obtenidas por el método de sol-gel*. Revista Politécnica, 36(3), 7-7.
- Müller U., (2007). *Inorganic Structural Chemistry*. 2^a ed. Ed. John Wiley & Sons. Ltda. England. pp. 57.
- Naciones Unidas. (mayo, 2016) *Objetivos de Desarrollo Sostenible* Recuperado de: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Nevárez Martínez, M. C., Espinoza Mntero, P. J., Quiroz Chavez, F. J., & Bunsho Ohtani. (2017). *Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO₂*. Avances en Química, 45-59.
- Norma Mexicana, NMX-030-SCFI-2001. *Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. Recuperado de: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2011/01/nmx-aa-030-scfi-2001.pdf>.
- Norma Oficial Mexicana, NOM-018-STPS-2015, Sistema armonizado para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros

Bibliografía

- de trabajo. Recuperado de:
https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5411121&fecha=09/10/2015#gsc.tab=0
- Norma Oficial Mexicana, NOM-052-SEMARNAT-2005. *Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.* Recuperado de:
<https://dof.gob.mx/normasOficiales/1055/SEMARNA/SEMARNA.htm>
- Norma Oficial Mexicana, NOM-054-SEMARNAT-1993, *Que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos.* Recuperado de:
<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD02/054.pdf>
- Organización Internacional de Normalización. (2015). *Sistemas de gestión de la calidad-Requisitos (ISO 9001).*
<http://www.itvalledelguadiana.edu.mx/ftp/Normas%20ISO/ISO%209001-2015%20Sistemas%20de%20Gesti%C3%B3n%20de%20la%20Calidad.pdf>
- Organización Internacional de Normalización. (2015). *Sistemas de gestión ambiental-Requisitos con orientación para su uso (ISO 14001).*
- Organización Internacional de Normalización. (2018). *Sistemas de administración/gestión en seguridad y salud ocupacional- Requisitos con guías para su uso (ISO 14001).*
- Orozco, C., Pérez, A., Gonzales, M. N., Rodríguez, F., Alfayate, J., (2005) *Contaminación Ambiental. Una visión desde la Química.* Tercera edición, Thomson Editoriales Spain. Paraninfo, S.A.
- Osicka, R. M., Benitez, M. E., & Giménez, M. C. (2004). *Gestión y manejo de residuos químicos en el laboratorio: una manera de prevenir la contaminación del medio ambiente. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas.* Universidad Nacional del Nordeste.
- Pérez, J. E. L. (2005). *Gestión de Residuos en los Laboratorios de Química.* Revista de Química, 19(2), 71-78.
- Pérez, OG., Gómez, FDRH, Morales, JA, Morales, MC, & Hernández, JCM (2020). *Degradación del colorante azul en medio acuoso mediante un proceso combinado de biodegradación fotocatalítica y bacteriana.* Revista turca de química, 44 (1), 180-193.
- Philipp H. R., Phys J. (1935). Chem. Solids 32.
- Plantard, G., Janin, T., Goetz, V. y Brosillon, S. (2012). *Tratamiento de fotocatalisis solar de residuos fitosanitarios: Eficiencia de fotocatalizadores industriales.* Catálisis aplicada B: ambiental , 115 , 38-44
- Ramírez, M. A. Y., Lema, I. I., & García, A. G. (2003). *El universo de las sustancias químicas peligrosas y su regulación para un manejo adecuado.* Gaceta ecológica, (69), 57-66.
- Rodriguez, J., Candal, R. J., Solís, J., Estrada, W., & Blesa, M. A. (2005). *El fotocatalizador: síntesis, propiedades y limitaciones.* Solar Safe Water, 9, 135-152.
- Romero, P. R., & Cantú, A. M. (2008). *Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo: la experiencia en México.* Instituto Nacional de Ecología.

Bibliografía

- Rueda-Marquez, J. J., Levchuk, I., Ibañez, P. F., & Sillanpää, M. (2020). *A critical review on application of photocatalysis for toxicity reduction of real wastewaters*. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120694.
- SEMARNAT. (2008). *Informe de la situación del medio ambiente en México Compendio de Estadísticas Ambientales*. México. Recuperado de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap7.html>
- SEMARNAT. (2020). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos*. Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/555093/DiagnosticoBasicoGestionIntegralResiduosF.pdf.pdf>
- Sierra Ramírez, C. A. (2011). *Calidad del agua evaluación y diagnóstico*. Medellín, Colombia. ediciones de la U, 2011.
- SINA-CONAGUA. (2019). Obtenido de <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=plantasTratamiento&n=nacional#&ui-state=dialog>
- Skoog D.A. y Leary J.J., (2003) *Espectroscopía de absorción en el infrarrojo, en Análisis instrumental*, Mc-Graw Hill, México, pp. 328.
- Sobrero, M. C., & Ronco, A. (2004). *Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga (Lactuca sativa L.)*. Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas: estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 63-70.
- Solano, J. A. V. (2015). *Formulación de una propuesta metodológica para la gestión integral de residuos químicos peligrosos en instituciones de educación superior*. *Informador técnico*, 79(2), 169-178.
- Sun, Q., & Xu, Y. M. (2009). *Sensitization of TiO₂ with aluminum phtalocyanine: factors influencing the efficiency for chlorophenol in water under visible light*. *J. Phys. Chem. C* 113, 12387-1294.
- Vargas Marcos, F. (2005). *La contaminación ambiental como factor determinante de la salud*. *Revista española de salud pública*, 79, 117-127.
- Vives S., Meunier C., (2006). *Influence of the synthesis route on sol-gel SiO₂-TiO₂ (1:1) xerogels and powders*, *Ceramics International*, Article in Press.
- Wawrzyniak B. y Morawski A.W., (2006) *Solar-light-induced photocatalytic decomposition of two azo dyes on new TiO₂ photocatalyst containing nitrogen*, *Appl. Catal. B*, 62, 150-158.
- Yoon K.H., Noh J.S., Kwon Ch.H. y Muhammed M., (1979). *Photocatalytic behavior of TiO₂ thin films prepared by sol-gel process*, *Mater. Chem. Phys.*, 95, 79-83.
- Zafra, A. S. (2008). *Efectos de los trihalometanos sobre la salud*. *Hig. Sanid. Ambient*, 8, 280-285.
- Zhang X., Zhang F., Chan K. (2005) *Synthesis of titania-silica mixed oxide mesoporous materials, characterization and photocatalytic properties*, *Applied Catalysis A: General*, 284, p.p. 193-198.

Bibliografía

- Zhang, T., Oyama, T., Aoshima, A., Hidaka, H., Zhao, J., and Serpone, N. (2001). *Photooxidative Ndemethylation of methylene blue in aqueous TiO₂ dispersions under UV irradiation*. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 140, 163-172.
- Zhiyuan Y. y Anning Z., (2007). *Effects of nitrogen doping on microstructure and photocatalytic activity of nanocrystalline TiO₂ Powders*, J. Wuhan Univ. Technol., 10, 457-461.

XI. Anexos

a. Caracterización fisicoquímica de muestras de agua analizada en los cursos de análisis de agua de los periodos de primavera y verano 2022

Se recolectaron residuos del laboratorio de análisis de agua del curso de primavera y verano 2022 las muestras de agua iniciales fueron analizadas durante cada curso se pueden conocer sus parámetros fisicoquímicos, los resultados se muestran en las Tablas 1a y 2a.

Tabla 1a

Caracterización fisicoquímica de las muestras primavera 2022 laboratorio de análisis de agua.

Parámetros	Unidades	Equipo 1 Planta de tratamiento de CU	Equipo 2 Laguna de CU	Equipo 3 Agua de riego-pozo	Equipo 4 Laguna de CU	Equipo 5 Laguna de CU	Equipo 6 Canaleta de campo
pH	sn	5.9275	7.25	7.17	8.65	7.545	7.01
Temperatura	°C	19.3	19.95	21.05	10.75	21.55	19.35
Conductividad	µS/cm	448	515	527	637	1720	229
Sol. Totales (ST)	mg/L	180	427.5	-220000	960	1256.66	22.2005
Sol. Disueltos Totales (SDT)	mg/L	135	402.4995	-243125	947.505	880.41	22.1586
Sol. Suspendidos Totales (SST)	mg/L	45	24.9995	23125	12.495	376.25	0.0419
Sol. Volátiles Totales (SVT)	mg/L	55	60	-415000	520	213.3	0.00195
Sol. Fijos Totales (SFT)	mg/L	125	367.5		440	1043.36	22.19855
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	6.2	5	6.65	8.05	6.25	5.25
DBO ₅	mg/L	1.8	4.2	7.75	1.2	4.9	4.8
Grasas y aceites	mg/L	901.52	184.444	79.2	1317	6813	0.49
Acidez	mgCaCO ₃ /L	120	52	N/A	18	154	31
Alcalinidad	mgCaCO ₃ /L	40	N/A	22	88	N/A	N/A
Dureza Total	mg/L	8.3	190	170.73	260.224	700	7.00637
Cloruros	mg/L	24.9922	11.4149	0.0113	21.4933	67.98	0.00199

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2a

Caracterización fisicoquímica de las muestras verano 2022 laboratorio de análisis de agua.

Parámetros	Unidades	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3
		Río Atoyac	Laguna de CU	Laguna de CU
pH	sn	7.23	6.75	8.015
Temperatura	°C	15.4	15.4	23.55
Conductividad	μS/cm	260	69	527
Sol. Totales (ST)	mg/L	592.5	85.665	428.5
Sol. Disueltos Totales (SDT)	mg/L	517.5	40	426
Sol. Suspendidos Totales (SST)	mg/L	75	45.665	2.5
Sol. Volátiles Totales(SVT)	mg/L	74.5	36.665	40
Sol. Fijos Totales (SFT)	mg/L	516.5	48.9985	388.5
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	6.15	18.35	6.35
DBO ₅	mg/L	2.15	312	20.9
Grasas y aceites	mg/L	94	374	205
Acidez	mgCaCO ₃ /L	120	N/A	N/A
Alcalinidad	mgCaCO ₃ /L	40	32	96
Dureza	mg/L	164.14	0.5	197
Cloruros	mg/L	0.0399876	1.99938	28.78
Nitrógeno	mg/L	5.2104	0.504	1.68

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó el análisis estadístico de la caracterización de las muestras recolectadas en primavera y verano 2022 mediante RCommander obteniendo con resultado la Figura 1.A

En la Figura 1 a. se muestran los parámetros analizadores en las muestras de agua en los dos periodos primavera y verano 2022 se determinaron las medias, las desviaciones estándar, el coeficiente de variación cv indicador de variabilidad relativa de los datos, medidas de asimetría y apuntalamiento, así como la medición de los cuartiles.

Figura 1 a.

Análisis estadístico de los parámetros de caracterización de los residuos.

	mean	sd	se (mean)	IQR	cv	skewness	kurtosis	0%	25%	50%	75%	100% n
C	550.625000	508.0953053	179.6388179	302.25000	0.9227611	2.07511692	5.0888086	69.00000	252.250000	481.50000	554.50000	1720.000 8
CL	19.550220	22.6776957	8.0177762	24.42962	1.1599714	1.53032394	2.7476433	0.00199	1.509532	16.30410	25.93915	67.980 8
D	190.896296	229.3327376	81.0813669	204.82941	1.2013472	1.78544636	3.8720595	0.50000	7.976593	177.07000	212.80600	700.000 8
DBO5	43.993750	108.4772538	38.3525009	6.83750	2.4657424	2.80951981	7.9166128	1.20000	2.062500	4.50000	8.90000	312.000 8
GYA	1236.181750	2297.9428871	812.4454991	843.55700	1.8589037	2.62346936	7.0787875	0.49000	161.833000	289.50000	1005.39000	6813.000 8
OD	7.700000	4.3982951	1.5550322	0.85000	0.5712072	2.59907093	6.9849413	5.00000	5.925000	6.22500	6.77500	18.350 8
PH	7.297187	0.8169143	0.2888228	0.71750	0.1119492	0.03610428	0.6695304	5.92750	6.945000	7.24000	7.66250	8.650 8
SDT	421.384138	355.3619610	125.6394262	496.97750	0.8433207	0.42717346	-1.1507424	22.15860	111.250000	414.24975	608.22750	947.505 8
SFT	369.007131	330.4000529	116.8140590	353.12538	0.8953758	1.16830285	1.8840578	22.19855	105.999625	378.00000	459.12500	1043.360 8
SST	72.743925	125.2159720	44.2705315	43.00250	1.7213255	2.60577832	7.0344538	0.04190	9.996250	34.99975	52.99875	376.250 8
ST	494.128188	431.7984210	152.6637958	527.95875	0.8738591	0.80585319	-0.2399270	22.20050	156.416250	428.00000	684.37500	1256.660 8
SVT	124.933369	171.6098937	60.6732598	70.03375	1.3736114	2.19940092	4.9139929	0.00195	39.166250	57.50000	109.20000	520.000 8
T	18.156250	4.0814421	1.4430077	4.95000	0.2247954	-0.68121382	0.1871738	10.75000	15.400000	19.32500	20.35000	23.550 8

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las medias de los parámetros fisicoquímicos y conforme a las normas NOM-002-SEMARNAT-1996 donde se establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal y la NOM-001-SEMARNAT-2021 donde se establecen los límites máximos permisibles para cuerpo receptores (embalses, lagos y lagunas). Se observa que los parámetros como pH se encuentra dentro de los límites 6-9 pH, la temperatura se encuentra por debajo del límite de 35°C, también se observa que tiene una conductividad baja aunque este parámetro no se encuentra dentro de los contaminantes de las normas 001 y 002. La DBO₅ entra dentro de los límites promedio mensual de 60 mg/L y se sale del promedio diario de 30 mg/L. Los SST de acuerdo con la CONAGUA sistema indicador de la Calidad del Agua (ICA) se encuentra dentro de la clasificación de buena calidad 25-75 mg/L. Los cloruros de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994 establece los límites máximos permisibles de 250 mg/L por lo que se encuentran por debajo de este, conforme al parámetro de dureza se establece en esta norma como límite máximo permisible de 500 mg/L de CaCO₃ por lo que se encuentran por debajo de este límite. El parámetro de grasa y aceites rebasan por mucho el límite máximo permisible de 75 mg/L promedio mensual.

b. Participación de eventos académicos

- Presentación virtual al Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología e Investigación CYTI 2021, que se desarrolló en los días 17, 18 y 19 de noviembre 2021 en Veracruz.



Anexos

- Presentación Foro de Buenas Prácticas Ambientales de la BUAP, que se llevó a cabo los días 29 y 30 de noviembre 2021.



Anexos

- Presentación 6th Congreso YWP México, que se llevó a cabo los días 26 y 17 de mayo 2022 en Culiacán.



6TH CONFERENCE
IWA-MEXICO
YOUNG WATER
PROFESSIONALS
2022

LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE CULIACÁN
Y EL COMITÉ ORGANIZADOR DEL
6TH CONFERENCE IWA-YWP MEXICO 2022,
LE EXTIENDE EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A:

**Ana Victoria Rugerio Suárez ,
Gabriela Pérez Osorio,
José Eligio Moisés Gutiérrez Arias**

por su participación con la PONENCIA ORAL titulada
“Evaluación de la decoloración de azul de metileno y
anaranjado de metilo en agua mediante fotocatalisis
solar con TiO_2 y TiO_2/SiO_2 ”,
en el marco del congreso que se llevó a cabo del 25 al 27 de mayo de 2022.

CULIACÁN, SINALOA
MÉXICO
MAYO DE 2022



Dra. Aurora Margarita Pal Espadas
Presidenta YWP México
Investigadores por México
ERNO-Instituto de Geología UNAM



Dra. Adriana Roé Sosa
Presidenta Comité organizador
Profesora Tiempo Completo
Universidad Tecnológica de Culiacán






Anexos

- Presentación Foro Investigación y Desarrollo Sostenible de la BUAP, que se llevó a cabo los días 17 y 18 de agosto 2022.

