



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

OBTENCIÓN DE UN BIO-NANOCOMPOSITO DE FIBRAS DE LECHUGUILLA Y  
NANOPARTÍCULAS BIMETÁLICAS PLATA-COBRE, MEDIANTE ABLACIÓN LASER  
PARA SU EVALUACIÓN EN LA DEGRADACIÓN DE COLORANTES.

TÉSIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO  
DE INGENIERO PETROQUÍMICO

PRESENTA

GERARDO PIOQUINTO LÓPEZ

ASESOR

DR. RAÚL ALBERTO MORALES LUCKIE

ASESOR EXTERNO

DR. OSCAR FERNANDO OLÉA MEJÍA

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2024



# Índice

Índice	I
Índice de figuras .....	IV
Índice de tablas .....	VIII
Resumen	IX
Abstract	X
Introducción.....	XI
Capítulo I. Preliminares .....	1
1.1 Nanociencia .....	1
1.2 Nanotecnología.....	1
1.2.1 Top-down .....	2
1.2.1.1 Deposición Física de vapor .....	2
1.2.1.2 Deposición Química de vapor.....	3
1.2.1.3 Mecanizado ultrasónico.....	4
1.2.2 Bottom-up .....	5
1.3 Ablación láser .....	8
1.4 Nanomateriales.....	10
1.4.1 Clasificación de los Nanomateriales (NM) .....	11
1.5 Bionanocompositos.....	12
1.6 Nanopartículas.....	13
1.6.1 Síntesis de nanopartículas.....	14
1.7 Nanopartículas Bimetálicas.....	15
1.7.1 Catálisis y fotocatalisis.....	16
1.7.2 Síntesis de las nanopartículas bimetálicas .....	17
1.8 Fibras Naturales.....	17
1.8.1 Fibras de Agave lechuguilla .....	17
1.9 Síntesis Verde .....	18
1.10 Colorantes Sintéticos .....	19
1.11 Características de los Colorantes .....	21
1.11.1 Rojo Congo.....	21

1.11.2	Azul de Metileno .....	22
1.11.3	Verde Malaquita .....	23
II	Capitulo II. Técnicas de Caracterización .....	25
2.1	Microscopia Electronica de Barrido (SEM).....	25
2.2	Espectroscopía UV-visible (Uv-Vis).....	28
	Hipótesis	30
	Objetivos.	30
	General .....	30
	Específicos.....	30
III	Capitulo III. Metodología.....	31
3.1	Síntesis del bionanocomposito .....	31
3.1.1	Preparación de las fibras de Agave lechuguilla .....	31
3.2	Síntesis de NP's, mediante ablación laser.....	31
3.3	Preparación del Bionanocomposito.....	32
3.4	Preparación de los colorantes RC, AM, VM.....	32
3.5	Procedimiento Experimental para la Degradación Catalítica .....	33
3.6	Análisis SEM.....	33
3.6.1	Configuración del Microscopio .....	34
3.7	Análisis UV-Vis.....	34
3.7.1	Preparación del Dispositivo UV-Vis.....	34
3.7.2	Condiciones Experimentales del UV-Vis.....	34
IV	Capitulo IV. Discusión de Resultados.....	35
4.1	Adhesión de nanopartículas bimetálicas en fibras de lechuguilla. ....	35
4.2	Análisis de la Imagen SEM de la Fibra de Agave Lechuguilla sin presencia de NPs.....	36
4.3	Preparación de NPs mediante ablación laser sobre un blanco a diferentes concentraciones en agua destilada.....	43
4.3.1	UV-Vis AgNPs .....	43
4.3.2	UV-Vis Ag 80%- Cu 20% NPs .....	45
4.3.3	UV-Vis Ag 50% - Cu 50% NPs.....	47
4.3.4	UV-Vis CuNPs.....	48

4.4	Degradación catalítica de los colorantes.....	49
4.4.1	Rojo Congo 80% Ag- 20% Cu.....	49
4.4.2	Azul de Metileno 80% Ag- 20% Cu .....	53
4.4.3	Verde Malaquita 80% Ag- 20%Cu.....	57
4.4.4	Rojo Congo empleando un Bionanocomposito 50% Ag - 50% Cu...	61
4.4.5	Azul de Metileno 50% Ag - 50% Cu. ....	64
4.4.6	Verde Malaquita 50% Ag - 50% Cu.....	66
Capitulo V. Conclusiones.....		70
Referencias Bibliográficas .....		71

## Índice de figuras

Figura 1. Diagrama Top Down, el cual se aplica a precursores grandes para poder formar diferentes tipos de puntos C. (Renner, 2022) .....	2
Figura 2. Geometrías típicas del sistema de evaporación. Ambos esquemas están simplificados y dejan componentes típicos.(Rockett, 2008) .....	3
Figura 3. Representación esquemática del proceso CVD.(Pliego Osorio et al., s/f) 4	
Figura 4. Cabezal de Mecanizado Ultrasónico. (Nath et al., 2012) .....	5
Figura 5. Síntesis mecanoquímica de nanopartículas: enfoques de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba (De Oliveira et al., 2020a).....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 6. Diagrama Bottom up, emplea moléculas pequeñas y puede formar diferentes tipos de puntos C.(Renner, 2022) .....	6
Figura 7. Diagrama esquemático de un arreglo típico de LP-LA. (E. Velarde Granados & Olea Mejía, 2013) .....	10
Figura 8. Representación de los estados de las NP's formados por ablación laser en medios líquidos.(Rivera Esteban & Mejía Uriarte, 2016).....	10
Figura 9. Clasificación de los nanomateriales (a) esferas y cúmulos 0D; (b) Nanofibras, alambres y varillas 1D; (c) Películas, placas y redes 2D; (d) Nanomateriales 3D. (Trotta & Mele, 2019) .....	12
Figura 10. Composición de un Bionanocomposito y sus usos en las diferentes industrias. (Joseph et al., 2020) .....	13
Figura 11. Np's orgánicas; (a) Dendrimeros; (b) Liposomas; (c) Micelas. (Ealias & Saravanakumar, 2017) .....	13
Figura 12. Np's a base de carbono; (a) fullerenos; (b) grafeno; (c) nanotubos de carbono; (d) nanofibras de carbono; (e) negro de humo. (Ealias & Saravanakumar, 2017)	14
Figura 13. Tipos de nanopartículas bimetálicas. (A) aleadas; (B) intermetálicas; (C) Subagrupaciones; (D) núcleo-capa multicapa; (F) materiales de núcleo multiple recubiertos por una sola capa. (Arora et al., 2020) .....	16
Figura 14. Síntesis de NPs usando la rutina de síntesis química y verde. (Aravind et al., 2021) .....	18

Figura 15. Estructura química del colorante Rojo Congo (HERNÁNDEZ ZAMORA, 2014)	21
Figura 16. Estructura molecular del azul de metileno (Moreno et al., 2012).....	23
Figura 17. Estructura molecular del verde malaquita (Tewari et al., 2018).....	24
Figura 18. Cañon de electrones (Mohammed & Abdullah, 2018).....	25
Figura 19. Lentes electromagnéticas (Mohammed & Abdullah, 2018) .....	26
Figura 20. Detectores de electrones en el sistema SEM. (Mohammed & Abdullah, 2018)	26
<i>Figura 21. Componentes SEM</i> (Mohammed & Abdullah, 2018).....	27
Figura 22. Esquema del Espectrofotómetro UV-vis. La radiación electromagnética se dirige a un monocromador que elige las longitudes de onda de la muestra. (Rocha et al., 2018).....	29
Figura 23. Laser Continuum II. ....	32
Figura 24. Imagen 1) Fibras de <i>Agave Lechuguilla</i> antes de la ablación laser sin impregnación de Ag-CuNPs, imagen 2) Fibras de <i>Agave Lechuguilla</i> después de la ablación laser con impregnación de Ag-CuNPs, imagen 3) <i>Fibras de Agave Lechuguilla</i> con presencia de Ag-CuNPs después de 24 horas.....	35
Figura 25. Imagen SEM de las fibras de <i>Agave Lechuguilla</i> sin presencia de Ag-CuNPs en su superficie.....	36
Figura 26. Imagen SEM de las fibras de <i>Agave Lechuguilla</i> con presencia de Ag-CuNPs en su superficie.....	37
Figura 27. Mapeo químico de las fibras de <i>Agave lechuguilla</i> con Ag-CuNPs <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 28. Espectro UV-Vis AgNPs .....	44
Figura 29. Muestra de las AgNPs en agua destilada.....	44
Figura 30. Espectro UV-Vis Ag 80%- Cu 20% NPs .....	45
Figura 31. Muestra de las Ag 80%- Cu 20% NPs en agua destilada.....	46
Figura 32. Espectro UV-Vis Ag 50% - Cu 50% NPs. ....	47
Figura 33. Muestra de las Ag 50%- Cu 50% NPs en agua destilada.....	48

Figura 34. Espectro UV-Vis CuNPs .....	48
Figura 35. Muestras de las CuNPs en agua destilada.....	49
Figura 36. Espectro UV-Vis del colorante RC con una concentración de 50 ppm.50	
Figura 37. Espectro UV-Vis del colorante RC después de la degradación del bionanocomposito 80% Ag-20% Cu. ....	51
Figura 38. Reacción general de reducción de CR utilizando NaBH <sub>4</sub> (Naseem et al., 2018)      53	
Figura 39. Muestra inicial del colorante RC, después de la degradación. ....	53
Figura 40. Espectro UV-Vis del colorante AM con una concentración de 50 ppm.55	
Figura 41. Espectro UV-Vis del colorante AM después de la degradación del bionanocomposito 80% Ag-20% Cu. ....	55
Figura 42. Esquema de reacción de la conversión de azul de metileno, por borohidruro de sodio en presencia de nanopartículas bimetálicas. (Stephanie Stolle et al., 2021) .....	56
Figura 43. Muestra inicial del colorante AM, después de la degradación .....	57
Figura 44. Espectro UV-Vis del colorante VM con una concentración de 50 ppm 58	
Figura 45. Espectro UV-Vis del colorante VM después de la degradación del bionanocomposito 80% Ag-20% Cu. ....	59
Figura 46. Mecanismo de reacción de reducción de enlaces azo utilizando nanopartículas y NaBH <sub>4</sub> . (Kolya & Kang, 2022).....	60
Figura 47. Muestra inicial del colorante VM, después de la degradación .....	60
Figura 48. Espectro UV-Vis del colorante RC con una concentración de 50 ppm.62	
Figura 49. Espectro UV-Vis del colorante RC después de la degradación del bionanocomposito 50% Ag-50% Cu. ....	62
Figura 50. Muestra inicial del colorante RC 50% Ag-50 %Cu, después de la degradación.....	63
Figura 51. Espectro UV-Vis del colorante AM después de la degradación del bionanocomposito 50% Ag-50% Cu. ....	65
Figura 52. Muestra inicial del colorante AM 50% Ag-50 %Cu, después de la degradación.....	66

Figura 53. Espectro UV-Vis del colorante VM con una concentración de 50 ppm 67

Figura 54. Espectro UV-Vis del colorante VM después de la degradación del bionanocomposito 50% Ag-50% Cu..... 68

Figura 55. Muestra inicial del colorante VM 50% Ag-50 %Cu, después de la degradación..... 69

## Índice de tablas

- Tabla 1. Diferentes combinaciones de nanopartículas bimetálicas y el método de síntesis. (Idris & Roy, 2023).....**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 2. Clasificación de los tintes sintéticos según sus aplicaciones (Affat, 2021)
- Tabla 3. Diagrama del procedimiento experimental de degradación catalítica.. 33

## Resumen

La generación de aguas residuales por parte de las grandes industrias constituye un problema significativo, ya que estas aguas suelen contener colorantes tóxicos que representan un grave riesgo tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Este desafío ha impulsado la búsqueda de soluciones efectivas para el tratamiento de estos contaminantes.

Existen diversos métodos de tratamiento que, sin embargo, resultan costosos y requieren un alto consumo de energía y reactivos. En este contexto, la nanotecnología se presenta como una alternativa prometedora, ofreciendo sistemas de tratamiento tanto químicos como físicos. Por ello, se han explorado tecnologías más accesibles que han demostrado ser eficaces en la degradación y mineralización completa de colorantes.

Entre estas tecnologías, destaca la degradación catalítica de colorantes, reconocida por su seguridad, eficiencia y economía. El presente trabajo se centra en la elaboración de un bionanocomposito mediante la incorporación de nanopartículas bimetalicas de plata y cobre (Ag-CuNPs) sobre fibras de *Agave lechuguilla*, las cuales fueron adheridas utilizando la técnica de ablación láser. El objetivo es desarrollar un catalizador eficaz para la degradación de colorantes como el rojo Congo, azul de metileno y verde malaquita.

El bionanocomposito fue caracterizado mediante microscopia electrónica de barrido con dispersión de energía (SEM-EDS), lo que permitió observar los cambios en la superficie de las fibras. Las Ag-CuNPs también fueron analizadas a través de espectroscopía UV-visible. Durante los experimentos, el bionanocomposito actuó como catalizador, utilizando borohidruro de sodio como agente reductor. Los resultados mostraron una tasa de degradación superior al 90%, lo que destaca la efectividad del método propuesto.

## Abstract

The generation of wastewater by large industries is a significant issue, as this water often contains toxic dyes that pose a serious risk to both human health and the environment. This challenge has driven the search for effective solutions for treating these pollutants.

There are several treatment methods that, however, are costly and require high energy and reagent consumption. In this context, nanotechnology emerges as a promising alternative, offering both chemical and physical treatment systems. Therefore, more accessible technologies have been explored that have proven effective in the degradation and complete mineralization of dyes.

Among these technologies, catalytic degradation of dyes stands out, recognized for its safety, efficiency, and cost-effectiveness. This work focuses on the development of a bionanocomposite by incorporating silver-copper bimetallic nanoparticles (Ag-CuNPs) onto *Agave lechuguilla* fibers, which were attached using the laser ablation technique. The goal is to develop an effective catalyst for the degradation of dyes such as Congo red, methylene blue, and malachite green.

The bionanocomposite was characterized by scanning electron microscopy with energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS), which allowed observation of the changes in the surface of the fibers. The Ag-CuNPs were also analyzed by UV-visible spectroscopy. During the experiments, the bionanocomposite acted as a catalyst, with sodium borohydride used as a reducing agent. The results showed a degradation rate of over 90%, highlighting the effectiveness of the proposed method.

## Introducción

El presente trabajo se llevó a cabo de manera experimental en el laboratorio de Nanomateriales del Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS) UAEMéx-UNAM. Su propósito es proponer una alternativa para la degradación de colorantes residuales provenientes de la industria textil, empleando nanopartículas bimetálicas de plata y cobre (Ag-CuNPs), que ofrecen numerosas ventajas. Este problema tiene consecuencias significativas para el medio ambiente y la salud humana, ya que los colorantes suelen encontrarse en altas concentraciones en las aguas residuales, lo que contribuye a un desafío ambiental crítico.

La degradación de estos contaminantes mediante un bionanocomposito, que actúa como catalizador, se presenta como una opción más económica, eficaz y eficiente. En este estudio, las fibras de *Agave lechuguilla* se prepararon mediante la técnica de ablación láser, lo que facilitó la adherencia de las nanopartículas y la formación del bionanocomposito. Para asegurar que este material cumpla con las características necesarias para su efectividad, se realizó una caracterización utilizando SEM-EDS, lo que permitió observar la superficie y la distribución de las Ag-CuNPs.

La microscopía electrónica de barrido (SEM) es una técnica clave para la caracterización de nanopartículas, ya que permite observar su morfología y distribución a nivel nanométrico. En este método, un haz de electrones incide sobre la muestra, lo que genera señales secundarias que permiten obtener imágenes detalladas de la superficie de las nanopartículas. Estas imágenes proporcionan información sobre el tamaño, la forma y la dispersión de las nanopartículas en el material.

Además, las Ag-CuNPs fueron caracterizadas mediante espectroscopía UV-visible. Para evaluar la eficiencia del bionanocompuesto en la degradación de los colorantes, se utilizó borohidruro de sodio como agente reductor, y se monitorearon las muestras a través de espectroscopía UV-visible, lo que permitió determinar el

porcentaje de remoción o degradación de cada colorante. Los resultados obtenidos son fundamentales para validar la eficacia de la metodología propuesta.

## **Capítulo I. Preliminares**

### **1.1 Nanociencia**

Nano; es un prefijo proveniente del vocablo griego “νάνος”, que significa enano, diminuto o pequeño, el cual denota una amplia gama de fenómenos y objetos cuyas dimensiones son de una millonésima parte de un milímetro ( $1 \times 10^{-9} \text{m}$ ). Este prefijo se emplea en el Sistema Internacional (SI) de unidades. Entonces bien, nanociencia se refiere al estudio de los fenómenos y la manipulación de materiales a escala nanométrica. (Mendoza & Luis Rodríguez-López, 2007)

### **1.2 Nanotecnología**

La nanotecnología se centra en la comprensión y el dominio de las propiedades de la materia a escala nanométrica. La nanotecnología suele ser potencialmente “disruptiva” o “revolucionaria” esto debido a sus grandes efectos que posee en los métodos de producción industrial, puesto que ofrece soluciones a grandes problemas actuales mediante materiales más pequeños, más ligeros y más rápidos; no dejando de lado que contribuye de manera esencial a la solución de problemas medioambientales de carácter mundial, esto gracias al desarrollo de productos y procesos, con un mayor ahorro de recursos en su producción, generando una menor cantidad de emisiones y residuos contaminantes. (Nanociencias-N. Y. & GENER, 2009)

La nanotecnología ofrece un gran potencial para el desarrollo de nuestros conocimientos de una manera sustentable, puesto que posee un gran impacto en muchas de las áreas como lo son la medicina, sector agrícola, energético, alimenticio, industrial entre otros. Algunos de los materiales fabricados a partir de la nanotecnología se caracterizan por tener menos defectos y que son de una mejor calidad, manteniendo las mismas propiedades, divisiones, longitud y diámetro. Los métodos de síntesis de nanomateriales se dividen en dos enfoques, según la técnica de aplicación (Top-down) técnica de arriba hacia abajo y (Bottom-up) técnica de abajo hacia arriba (Quintili, 2012).

### 1.2.1 Top-down

El enfoque *Top-down* se basa en la trituración de materiales; emplea estructuras macroscópicas iniciales. Posee la ventaja de producir enormes cantidades de nanopartículas, esto debido a los diferentes métodos que van desde partículas muy grandes, las cuales se van reduciendo mediante una secuencia de operaciones realizadas sobre ellas. (Patil et al., 2021)

#### Método de arriba hacia abajo



Figura 1. Diagrama Top Down, métodos de las rutas de síntesis de nanomateriales.

(Mares Briones, 2021)

#### 1.2.1.1 Deposición Física de vapor

Es un proceso tecnológico de deposición de películas delgadas en donde el recubrimiento crece sobre el sustrato átomo a átomo. El cual se centra esencialmente en el recubrimiento de herramientas, implica la atomización o vaporización de una fuente sólida. Se ha vuelto esencial para el desarrollo de

tecnologías reconocidas como la pulverización catódica, la tecnología de plasma, la química de gases, evaporización térmica. Estas tienen como objetivo principal, eliminar los posibles contaminantes de la superficie de las tasas de deposición así obteniendo una mejora en las características del recubrimiento. Los procesos utilizados en esta técnica requieren poco mantenimiento y su proceso suele ser más amigable con el medio ambiente. (Baptista et al., 2018)



Figura 2. Recubrimiento duro de las herramientas de producción en serie mediante la Deposición Física de Vapor" PVD". (Berajano, 2000)

### 1.2.1.2 Deposición Química de vapor.

Para la técnica CVD es necesario activar los gases para poder iniciar la reacción. Sintetiza directamente películas delgadas orgánicas sobre un sustrato a partir de reactivos en fase de vapor. Ha sido posible el crecimiento de capas de alta pureza, gracias a la ausencia de disolvente en esta técnica CVD, lo cual evita la posibilidad de fenómenos de deshumectación que provocan defectos por agujeros. Lo cual lo

vuelve adecuado para sintetizar polímeros conductores insolubles. Al suministrar temperaturas bajas en el procesamiento, la polimerización evita daños a los sustratos y las capas subyacentes del dispositivo, Los polímeros CVD tienen la capacidad de cubrir superficies rugosas como las de papel y sustratos textiles. (Wang et al., 2017)

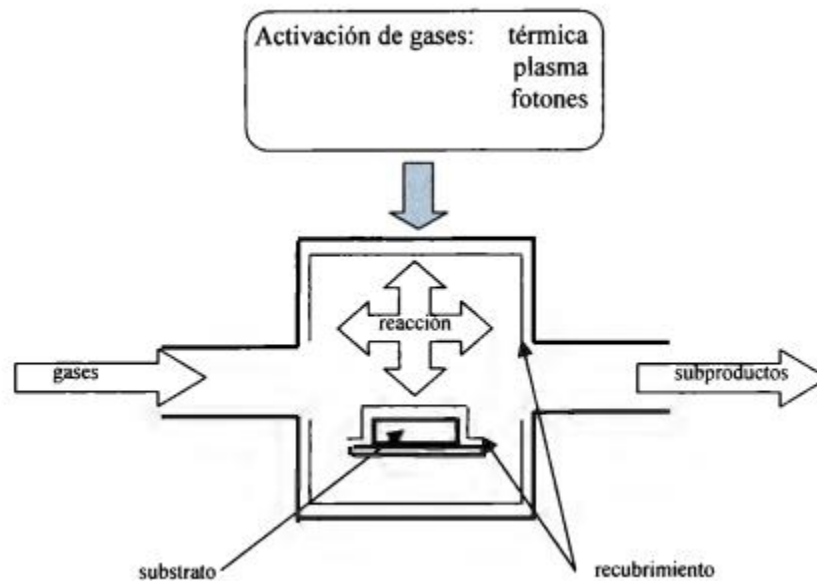


Figura 3. Representación esquemática del proceso CVD. (Pliego Osorio et al., s/f)

En la figura 3 se puede observar el reactor, el flujo de gas de entrada la reacción, la capa del recubrimiento, el sustrato y el finalmente la salida de subproductos.

### 1.2.1.3 Mecanizado ultrasónico.

Es un proceso que se emplea para mecanizar materiales tanto conductores como no metálicos, preferiblemente aquellos con baja ductilidad y una dureza superior a 40 HRC, como lo son vidrios inorgánicos, cerámicas, cuarzo, etc. Para lograr un mecanizado eficiente, la herramienta y la bocina deben diseñarse teniendo en cuenta la masa y la forma esto con el propósito de que se pueda lograr una resonancia dentro del rango de frecuencia. La energía de alta frecuencia se

convierte en vibraciones mecánicas lo cual se lleva a cabo mediante una combinación de transductor/acelerador. (Thoe et al., 1998)

## MECANIZADO POR ULTRASONIDO (USM)



Figura 4. Cabezal de Mecanizado Ultrasónico. (Vásquez More, 2018)

Molienda de bolas. Los molinos de bolas poseen una capa cónica o cilíndrica la cual gira sobre un eje horizontal, el cual se carga con un medio de molienda (bolas de acero, pedernal o porcelana). (Bolaños Valencia., 2006)

### 1.2.2 Bottom-up

Se pueden obtener a partir de pequeños precursores moleculares, que pueden sufrir deshidratación y luego carbonización, para formar las nanoestructuras. Consiste en los métodos sol-gel, precipitación controlada; para la producción de nanopartículas; emplea agentes químicos los cuales ensamblan átomos en núcleos, denominados “semillas” los cuales tendrán la capacidad de crecer hasta convertirse en partículas a nanoescala formando grupos, como métodos químicos y biológicos. (Jiang et al., 2022) Existen materiales que contienen los precursores deseados los cuales se mezclan para formar una solución coloidal. (Baño Morales, 2017)

### Método de abajo hacia arriba

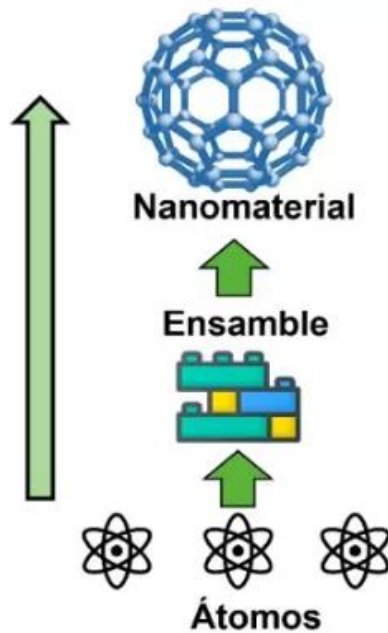


Figura 5. Diagrama Bottom up, síntesis de nanomateriales.(Mares Briones, 2021)

Método sol-gel. Se parte de los alcóxidos metálicos. Es un método de síntesis cuyo objetivo es obtener un esqueleto a partir de precursores moleculares como lo son los alcóxidos metálicos o sales inorgánicas, mediante reacciones de Hidrolisis y polimerización a una baja temperatura. Los soles y geles poseen características que permiten la síntesis de fibras, laminas, cadenas, geles y polímeros tridimensionales. Se emplea fundamentalmente en la obtención de materiales inorgánicos. Este método posee ciertas ventajas como lo son:

- Baja temperatura del procesado, lo que conlleva.
- Ahorro de energía.
- Mínima pérdida de evaporación.
- Mínima contaminación del aire.
- Obtención de nuevos solidos cristalinos y no-cristalinos. (Rojas Cervantes, 2012)

Precipitación Controlada. Es un proceso de precipitación de dos o más reactivos formando un producto. La solubilidad de este producto es muy baja generando una alta sobresaturación, obteniendo un crecimiento de cristales, esto gracias a que la sobresaturación va dirigida a la nucleación. Cabe destacar que el número de núcleos formados gobierna la distribución del tamaño de partículas del precipitado. (Mersmann et al., 1994)

Métodos Químicos. Los métodos químicos proporcionan una manera sencilla de sintetizar nanopartículas de plata en solución. Algunos de los métodos más populares son la reducción química que emplea una amplia variedad de agentes reductores orgánicos e inorgánicos; técnicas electroquímicas, reducción fisicoquímica y radiolisis, pero existe una enorme desventaja de todos estos métodos mencionados, puesto que la mayoría se encuentra en etapa de desarrollo y los problemas experimentados son la estabilidad, agregación de las nanopartículas, el control del crecimiento de los cristales, la morfología, el tamaño y la distribución del tamaño. Y lo más importante es que emplear estos métodos es muy costoso. (García-Barrasa et al., 2010)

Métodos físicos. La evaporación-condensación y la ablación laser son los enfoques físicos más importantes. Estos métodos poseen enormes ventajas a diferencia de los métodos químicos, algunas de ellas son la ausencia de contaminación por disolventes en las películas delgadas preparadas y la uniformidad de la distribución de las nanopartículas. Cabe destacar que la ablación laser sintetiza materiales metálicos a granel en solución. La eficiencia de la ablación y sus características que posee dependen de varios parámetros, incluida la onda del láser que incide en el objetivo metálico que se encuentra en la superficie de nuestra solución, la duración de los pulsos laser (en el régimen de femto, pico y nanosegundos), la fluencia del láser, duración del tiempo de ablación y el medio líquido efectivo con o sin la presencia de surfactantes. La ventaja más importante de esta técnica a comparación con otros métodos es la presencia de reactivos químicos en soluciones. (Iravani & Zolfaghari, 2013)

### 1.3 Ablación láser

La ablación láser es un método de síntesis de nanomateriales de arriba hacia abajo, confiable, que proporciona una solución alternativa a la reducción química convencional de metales para sintetizar nanopartículas a base de metales. Consiste en focalizar un haz de láser pulsado sobre una muestra sólida para la formación de nanopartículas; método físico aplicado para la obtención de materiales que poseen componentes estructurados, en los que al menos una dimensión tiene una longitud de 1-100 nanómetros, en donde se incluyen los nanocompositos, los nanotubos y los nanocables. Un pequeño volumen del blanco, cercano a la superficie, se supercalienta, produciendo una explosión que expulsa material. El material expulsado interactúa con la radiación láser incidente, formándose un plasma o "pluma" que se propaga en la dirección normal a la superficie del blanco. Proporciona una síntesis estable de nanopartículas en disolventes orgánicos y agua, que no requiere ningún agente estabilizador ni productos químicos, es un proceso "verde". Es importante considerar que, para poder efectuar dicho método, se requiere de un medio estabilizante en soluciones líquidas, ya que, de esta manera, se evita la aglomeración de las nanopartículas generadas, dando lugar a la formación de coloides. Se debe considerar que el láser se rige bajo ciertos parámetros, los cuales inducen la ablación. Tales parámetros son: la cantidad de impactos que recibe nuestro material. Dicha metodología presenta algunas ventajas, como son: eficiencia en la generación de nanopartículas, la cual se lleva a cabo a presión atmosférica, temperatura ambiente y agua como solvente. (Echeverría, 2008)

Este método se emplea para la obtención de capas delgadas, el cual posee diversas ventajas, entre las cuales destacan:

- La posibilidad de evaporar compuestos de elevada complejidad, conservando la estequiometría.
- La capacidad de controlar el espesor de la capa con buena precisión, lo que ha permitido trabajar en sistemas de baja dimensionalidad, donde se requieren espesores de unas cuantas monocapas.

- La limpieza del proceso, debida, por un lado, a que la fuente de energía se encuentra fuera de la cámara de evaporación y, por otro, al bajo nivel de incorporación de impurezas, debido a la corta duración del proceso, típicamente del orden de unos cuantos microsegundos.

El láser opera de manera continua, actuando como una fuente de excitación y una cámara de vacío, donde se lleva a cabo la evaporación. Se emplean diferentes tipos de láseres, con frecuencias que van desde el infrarrojo hasta el cercano ultravioleta. Las altas frecuencias favorecen la evaporación y reducen el salpicado, que se produce al apuntar el haz al blanco en el medio líquido. Los láseres más utilizados son los de excímero y los de Nd:YAG, teniendo densidades de energía por pulso entre  $10^6$  y  $10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>, y pulsos de nanosegundos de duración.

El blanco y el sustrato se encuentran situados en el interior de la cámara, con una distancia de 5 centímetros entre sí. El blanco se coloca en rotación con la intención de eliminar la formación de un cráter, mientras tanto el sustrato se calienta para obtener y mejorar dos parámetros: la adherencia y el crecimiento epitaxial.(Ponce et al., 1993)

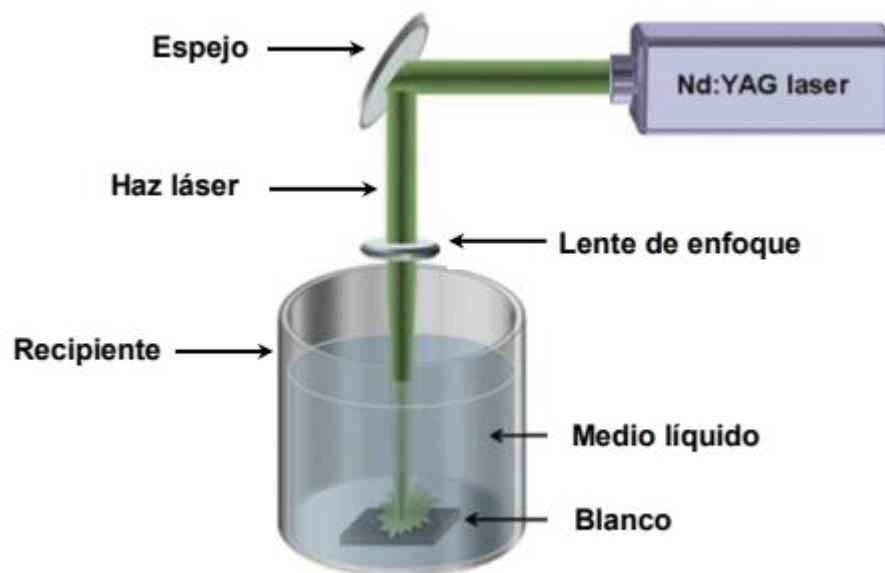


Figura 6. Diagrama esquemático de un arreglo típico de LP-LA. (Velarde Granados & Olea Mejia, 2013)

Durante la síntesis de NP's por ablación laser se presentan varios mecanismos.

- Extracción de material
- Formación del Plasma
- Formación de ondas de choque
- Evolución de la burbuja de cavitación, colapso y formación de las NP's.

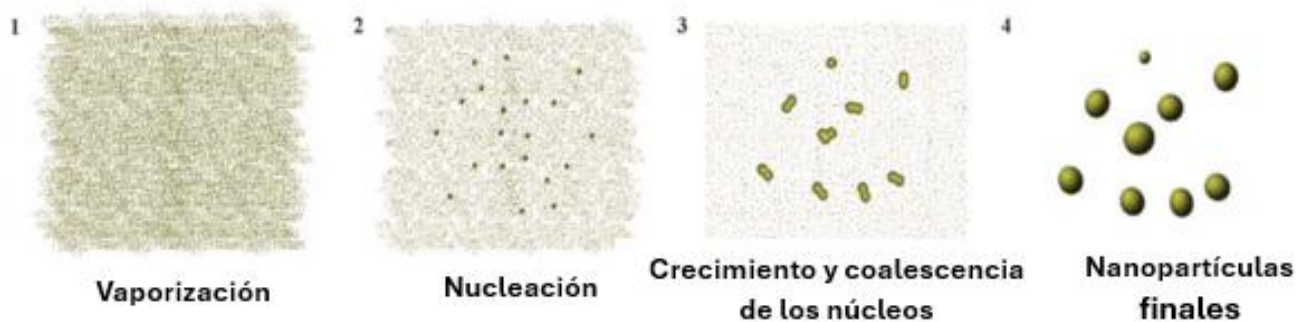


Figura 7. Representación de los estados de las NP's formados por ablación laser en medios líquidos.(Rivera Esteban & Mejía Uriarte, 2016)

## 1.4 Nanomateriales

Los primeros nanomateriales descubiertos se prepararon mediante la evaporación al vacío de hierro en un gas inerte, proceso en el cual el hierro se condensó sobre sustratos enfriados.(Tzeng Lue, 2007). Dado que los nanomateriales poseen una gran área superficial, es común caracterizarlos utilizando herramientas diseñadas específicamente para analizar superficies. Esto les permite obtenerse detalles precisos de sus características estructurales y morfológicas a nivel nanoscópico..(Baer et al., 2008).

### 1.4.1 Clasificación de los Nanomateriales (NM)

Los NM se clasifican según su morfología, estado, dimensionalidad y composición química. El tamaño también depende de esta clasificación puesto que oscila entre 1-100 nm en al menos una de sus dimensiones. Los NM, según sus propiedades químicas y electromagnéticas están presentes en forma dispersa, suspensiones y coloides. Los NM según su composición química pueden ser clasificados en varias categorías como nanopartículas de componente único. Los NM metálicos se preparan a partir de metales como lo son la plata, hierro, zinc, mientras que los NM que están formados a base de carbono como lo son fullerenos, grafenos se denominan carbonosos. Los NM se pueden dividir en cuatro clases, los cuales son; dimensión cero (0D), con un tamaño inferior a los 100 nm; unidimensionales (1D) son materiales que poseen una dimensión que no está a nanoescala; bidimensionales (2D) los cuales contienen solo una dimensión en nanoescala; tridimensionales (3D), tienen varias dimensiones mas allá de los 100 nm. (Saleh, 2020)

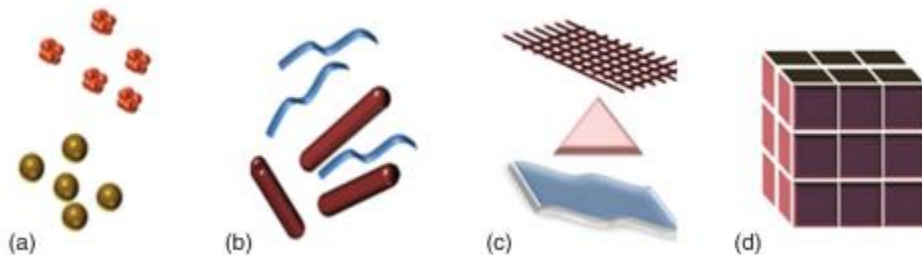


Figura 8. Clasificación de los nanomateriales (a) esferas y cúmulos 0D; (b) Nanofibras, alambres y varillas 1D; (c) Películas, placas y redes 2D; (d) Nanomateriales 3D. (Trotta & Mele, 2019)

### 1.5 Bionanocompositos

Los bionanocompositos se componen de una matriz de biopolímero, que actúa como la fase continua, y un agente de refuerzo, que representa la fase dispersa y está formado por partículas de tamaño entre 1 y 100 nanómetros. Estos materiales tienen aplicaciones extensas en áreas como el envasado de alimentos, la industria automotriz, la electrónica, los cosméticos, la industria textil, la purificación de agua y la ingeniería de tejidos. Para su fabricación, se han empleado diversas técnicas, como la fundición en solución y la impresión 3D. No obstante, es necesario desarrollar métodos de procesamiento más ecológicos y avanzados para su uso en aplicaciones industriales. (Joseph et al., 2020)

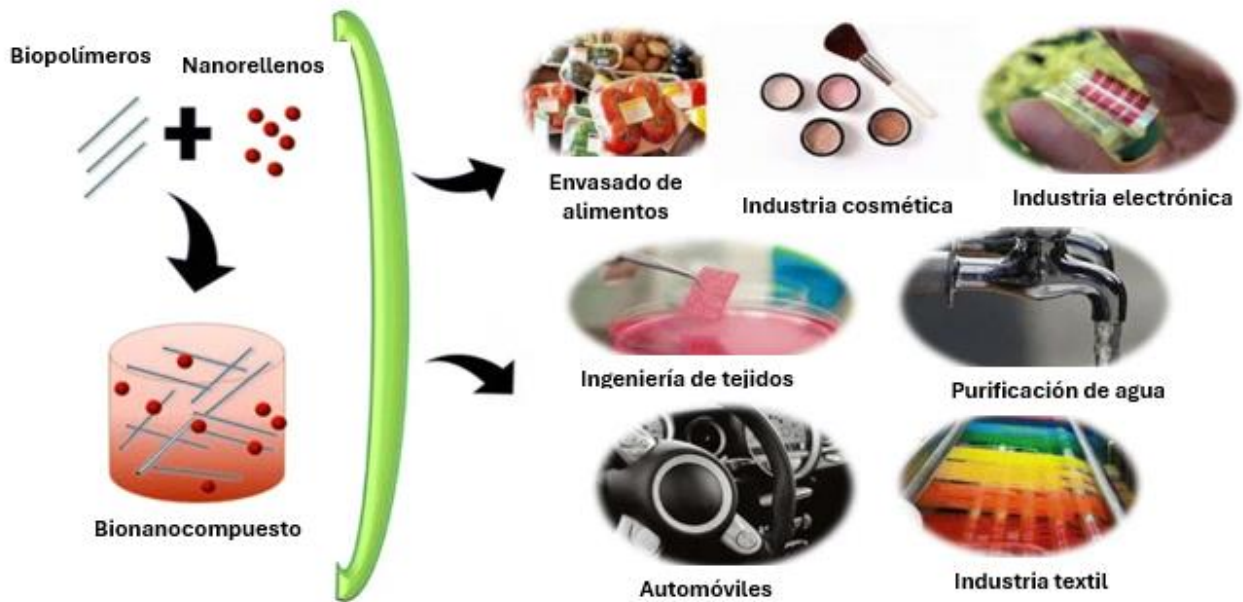


Figura 9. Composición de un Bionanocomposito y sus usos en las diferentes industrias.

(Joseph et al., 2020)

Es importante considerar que ciertos materiales biológicos, como el nácar, marfil, huesos y dientes, pueden ser considerados bionanocompositos naturales. Además, la biocompatibilidad y la biodegradabilidad son algunas de las propiedades más destacadas de estos materiales, lo que los convierte en opciones prometedoras para el desarrollo de materiales amigables con el medio ambiente. (Ruiz-Hitzky et al., 2008)

### 1.6 Nanopartículas

Las Np's son una clase de materiales con propiedades claramente diferentes de sus contrapartes moleculares y en masa, se definen como dispersiones de partículas o partículas sólidas con un tamaño en el rango de 10 a 1000 nm. Se clasifican generalmente en partículas orgánicas, inorgánicas y basadas en carbono en escala nanométrica. (Biswas & Wu, 2005)

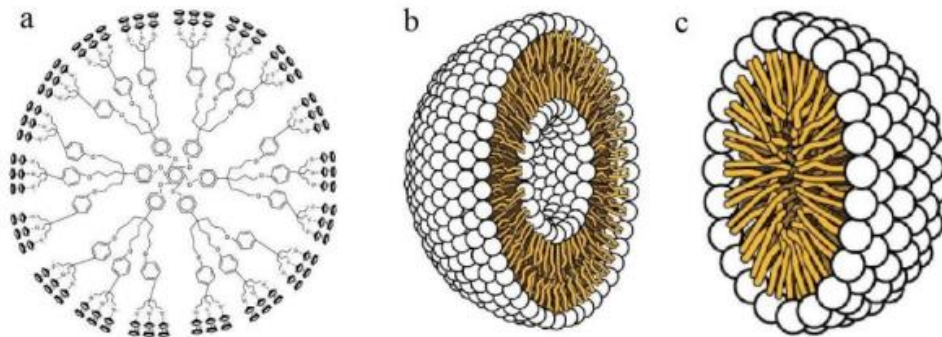


Figura 10. Np's orgánicas; (a) Dendrímeros; (b) Liposomas; (c) Micelas. (Ealias &

Saravanakumar, 2017)

Las Np's inorgánicas son partículas que no están formadas por carbono. Basadas en metales y óxidos metálicos.

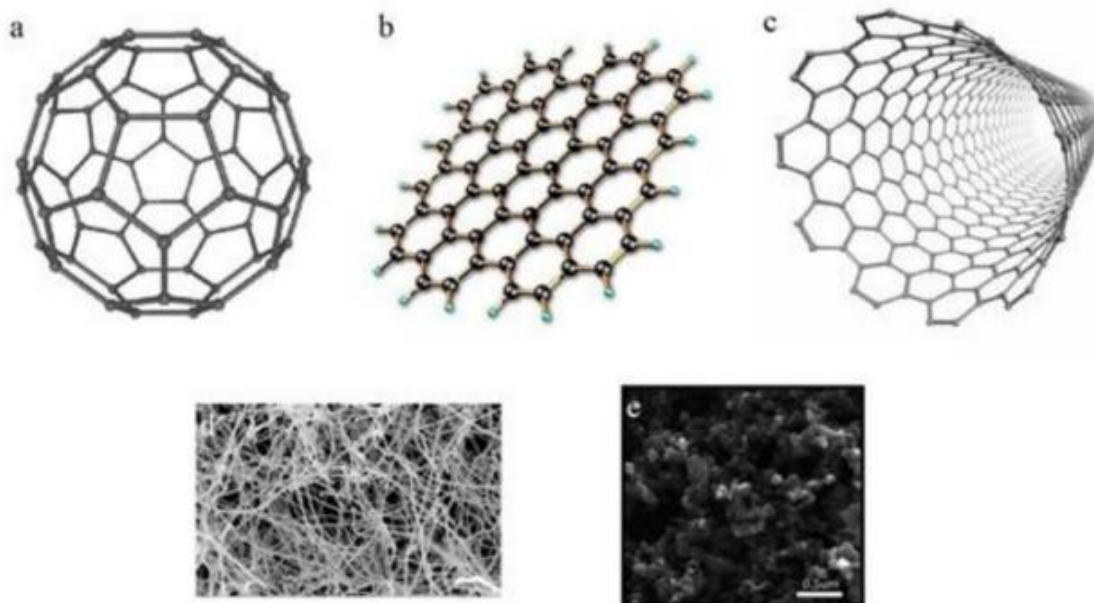


Figura 11. Np's a base de carbono; (a) fullerenos; (b) grafeno; (c) nanotubos de carbono; (d) nanofibras de carbono; (e) negro de humo. (Ealias & Saravanakumar, 2017)

Las Np's muestran propiedades mejoradas como alta reactividad, resistencia, área de superficie, sensibilidad, estabilidad, etc. Se emplean para diversos fines, como tratamientos médicos, utilizándose en diversas ramas de la producción industrial, desde recipientes de cocina, electrónica hasta energías renovables. (Hasan, 2015)

### 1.6.1 Síntesis de nanopartículas

Las nanopartículas se pueden sintetizar mediante métodos químicos, físicos o biológicos. Con frecuencia, los métodos químicos implican la reducción de iones metálicos en nanopartículas sin carga mediante agentes reductores, los cuales pueden ser peligrosos para el medio ambiente. Por otro lado, los métodos físicos generalmente emplean procesos como la evaporación o ablación láser para la formación de nanopartículas. Estos métodos, aunque eficientes, también pueden requerir condiciones específicas y consumir altos niveles de energía.

Como alternativa ecológica a los métodos convencionales, los métodos biológicos han ganado relevancia en la síntesis de nanopartículas. En este enfoque, se utilizan

microorganismos, enzimas, hongos, plantas o extractos de plantas, que han demostrado ser eficaces y sostenibles. La síntesis biológica es preferida por ser limpia, segura, rentable, sencilla y altamente productiva, representando una opción respetuosa con el medio ambiente en comparación con los métodos químicos y físicos tradicionales. (Hasan, 2015)

## **1.7 Nanopartículas Bimetálicas**

Las Np's bimetálicas, se forman combinando dos diferentes tipos de nanopartículas metálicas y pueden tener una gran variedad de morfologías y estructuras debido a sus propiedades. Suelen ser más atractivas a diferencia de las monometálicas, puesto que tienen un desempeño de gran influencia en procesos catalíticos y fotocatalíticos, los cuales son mejorados respecto a las monometálicas. Las propiedades fisicoquímicas de las partículas bimetálicas son mejores que las propiedades de las Np's de los metales por separado. A escala nanométrica estos materiales bimetálicos tienden a modificar sus propiedades tanto por efectos geométricos y/o efectos electrónicos; en primera instancia; el efecto geométrico es un número finito de átomos, posicionados en una misma orientación, en cada uno de los dos metales, esto con la intención de mejorar algunas de sus propiedades y el efecto electrónico, es la modificación de la densidad electrónica, esto a su vez, trae como consecuencia la formación de distintos tipos de enlaces. (Aguilar-Tapia & Zanella, 2018) El ajuste de las propiedades y el rendimiento se puede lograr seleccionando la combinación y el soporte de metal adecuados, Las nanoestructuras bimetálicas se pueden clasificar en dos clases, mixtas y segregadas, estas estructuras se pueden clasificar además en estructuras de subgrupos (distribución separada de dos metales con una interfaz compartida), estructuras de núcleo-capa (el núcleo de metal está rodeado por una capa de segundo metal), estructuras de núcleo-capa multicapa (las capas poseen una disposición alternativa que forma una forma similar a los aros de cebolla) y múltiples materiales de núcleo recubiertos por una sola capa.

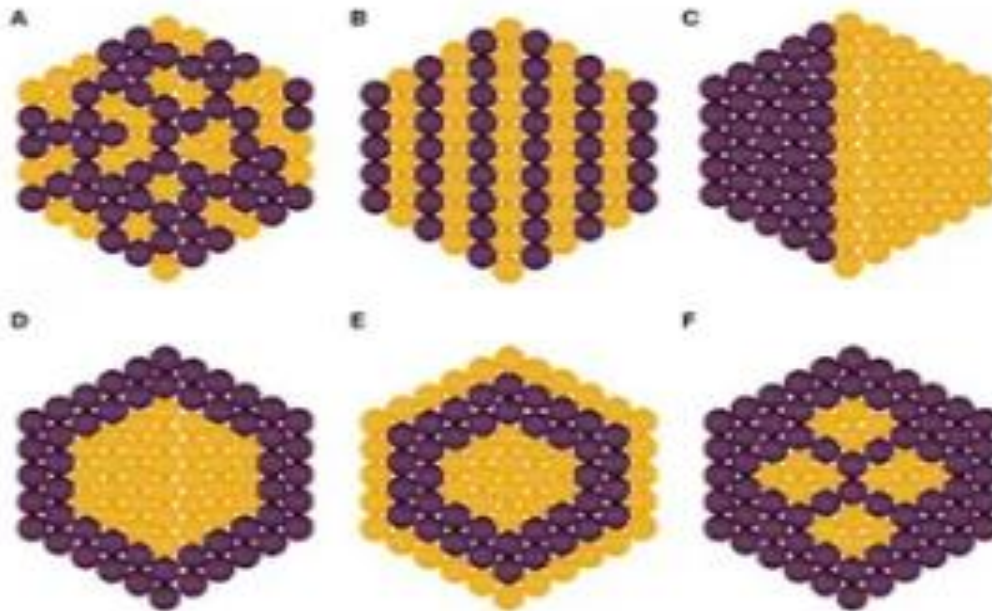


Figura 12. Tipos de nanopartículas bimetálicas. (A) aleadas; (B) intermetalicas; (C) Subagrupaciones; (D) núcleo-capa multicapa; (F) materiales de núcleo multiple recubiertos por una sola capa. (Arora et al., 2020)

### 1.7.1 Catálisis y fotocatálisis

Catálisis y fotocatálisis son dos procesos fundamentales en la aceleración de reacciones químicas, pero se diferencian en los mecanismos y condiciones en los que operan. La catálisis se refiere a la capacidad de un catalizador de aumentar la velocidad de una reacción química sin consumirse en el proceso, mediante la reducción de la energía de activación. En otras palabras, un catalizador proporciona un camino alternativo para la reacción, haciendo que sea más fácil que ocurra. Este proceso generalmente se aplica a reacciones que ocurren espontáneamente, con una energía libre de Gibbs negativa ( $\Delta G < 0$ ), lo que significa que las reacciones pueden proceder por sí solas una vez que se inician, gracias a la aceleración proporcionada por el catalizador.

Por otro lado, la fotocatálisis es un fenómeno específico que ocurre cuando un material sólido absorbe luz (fotones) con suficiente energía para activar una

reacción química que normalmente no podría ocurrir de manera espontánea. Este proceso es inducido por la irradiación de fotones que proporcionan la energía necesaria para superar barreras energéticas que las reacciones, como la hidrólisis del agua para producir hidrógeno y oxígeno, requieren para llevarse a cabo. A diferencia de la catálisis convencional, donde la reacción es espontánea, la fotocatalisis se utiliza para reacciones no espontáneas ( $\Delta G > 0$ ), siendo esencialmente un medio para obtener productos que de otro modo no se generarían sin un suministro externo de energía (en este caso, luz). (Nevárez-Martínez et al., 2017)

### **1.7.2 Síntesis de las nanopartículas bimetálicas**

La síntesis de nanopartículas bimetálicas implica la descomposición de materiales a granel en partículas de tamaño nanométrico o la construcción de las nanopartículas a partir de sus respectivos átomos

Estas nanopartículas bimetálicas pueden presentarse en muchas formas, incluidas las nanopartículas bimetálicas a base de oro, plata, cobre, níquel, hierro, platino o paladio, entre otras.

## **1.8 Fibras Naturales**

Cada año según la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) se cosechan alrededor de 35 millones de toneladas de fibras naturales, esto derivado de una amplia gama de plantas. Estas fibras están constituidas por celulosa, lignina y hemicelulosa, las cuales desempeñan un papel muy importante para todo el mundo, haciendo posible un sustento a la población mundial. (Siqueira et al., 2010)

### **1.8.1 Fibras de Agave lechuguilla**

Las fibras de (*Agave lechuguilla*) o comúnmente conocida como lechuguilla poseen diferentes cualidades en las cuales destacan alta resistencia, dureza y durabilidad; por lo que han sido empleadas en la fabricación de distintos utensilios domésticos, el cual viene a ser un gran sustituyente de otros diferentes materiales, esto debido a sus propiedades, ejemplos de ellos son: estropajos para el baño personal, cepillos y brochas para maquillaje, y dada su alta capacidad de absorción de agua (65%) y

su resistencia a solventes químicos, ácidos concentrados y diluidos, destilados del petróleo, alcoholes, es empleada como sustitutos de las cerdas. (Castillo Quiroz et al., 2013).

## 1.9 Síntesis Verde

La síntesis verde se basa en un enfoque sostenible, económico y seguro para la fabricación de nanomateriales, respetando el medio ambiente. Microorganismos como bacterias, levaduras, hongos, algas y algunas plantas se emplean como agentes biológicos en este proceso. La síntesis verde ofrece grandes ventajas a los nanomateriales, las cuales van desde propiedades antimicrobianas hasta capacidades reductoras y estabilizadoras naturales. (Huston et al., 2021)

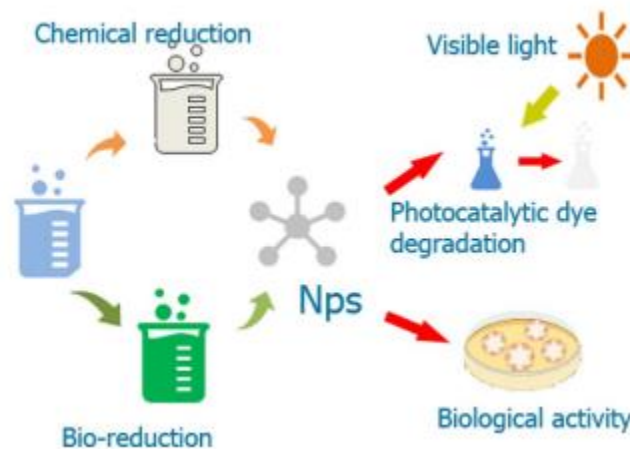


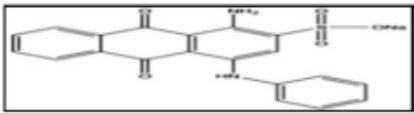
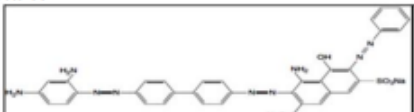
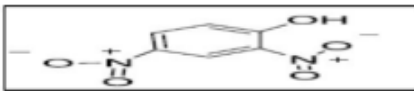
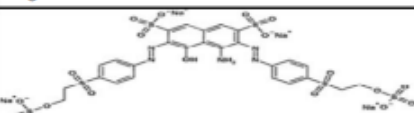
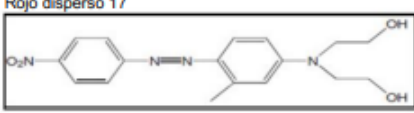

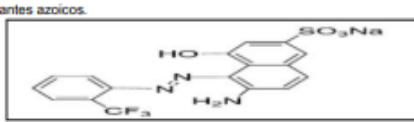
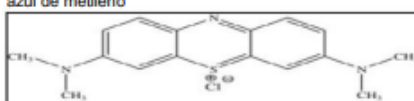
Figura 13. Síntesis de NPs usando la rutina de síntesis química y verde. (Aravind et al., 2021)

Emplea reactivos que son seguros, no tóxicos y amigables con el entorno. Las nanopartículas obtenidas a través de métodos biológicos o de tecnología verde presentan diferentes características, como una mayor estabilidad y tamaños adecuados, puesto que se producen mediante un proceso de un solo paso. Estas nanopartículas pueden fabricarse utilizando diversos enfoques, las cuales abarcan técnicas químicas, físicas, biológicas e híbridas. (Parveen et al., 2016)

## **1.10 Colorantes Sintéticos**

Los colorantes sintéticos tienen un uso extensivo en diversas industrias, siendo la industria textil una de las principales áreas de aplicación. Estos tintes son empleados en una amplia variedad de procesos de teñido e impresión en diferentes sectores. Los tintes sintéticos se pueden clasificar según la estructura química de sus grupos cromóforos específicos. Son compuestos orgánicos con estructura aromática que se dividen en categorías como tintes iónicos (ácidos) y tintes catiónicos (básicos). Los tintes aniónicos abarcan varios tipos, incluyendo tintes ácidos, tintes reactivos, tintes azoicos y tintes directos. En comparación de los tintes catiónicos los cuales se conocen como tintes básicos. Los colorantes también se clasifican en función de su uso.(Affat, 2021)

Tabla 1. Clasificación de los tintes sintéticos según sus aplicaciones (Affat, 2021)

Tintes	Ejemplos de tintes	Ejemplo de estructura química.	Aplicaciones de tintes
Ácido tintes	rojo congo Metilo (naranja y rojo) Naranja (I,II) Ácido (azul, negro, violeta, amarillo)	Azul ácido 25 	Lana, seda, nailon (poliamida) Poliuretano, fibras.
Directo tintes	Amarillo Martius, Negro directo Negro directo 38 Naranja directo, Azul directo, Violeta directo, Rojo directo		Algodón, lana, lino, seda, cuero en (baño alcalino o neutro)
Tintes de azufre	negro azufre Leuco azufre negro	negro azufre 	Fibras celulósicas.
Reactivo tintes	Rojo reactivo, Azul reactivo Amarillo reactivo, Negro reactivo, Remazol (azul, amarillo, rojo, etc.)	Negro reactivo 5 	Celulósica, fibras de lana, poliamida.
Dispersar tintes	azul disperso rojo disperso naranja dispersa Amarillo disperso Marrón disperso	Rojo disperso 17 	Poliamida, fibras poliésteres, nailon poliacrilonitrilos
Tina tintes	Índigo, Benzantrona tina azul, cuba verde	cuba verde 6 	Lana, lino, lana, fibras de rayón.
Tintes azoicos	Colorantes monoazoicos, colorantes diazo, colorantes azoicos. tintes triazoicos		Textil, cosmética, cuero, papel pinturas, industrias alimentarias
Básico tintes	Azul de metileno, Rojo básico, Marrón básico Azul básico, Violeta cristal, Amarillo anilina, Verde brillante	azul de metileno 	Poliéster, lana y seda nailon acrílico.

Los pigmentos son sustancias químicas que reflejan únicamente ciertas longitudes de onda de la luz visible. Los efluentes generados por tintes se deben a que estos no se adhieren completamente a las fibras durante el teñido y acabado, lo que puede resultar ciertos problemas para el entorno por ejemplo en el agua y el medio ambiente. Esto se debe a que los tintes sintéticos poseen estructuras moleculares complejas que dificultan su descomposición natural. Se estima que existen más de 100.000 colorantes comerciales, con una producción que supera las 700.000 toneladas anuales. Los tintes sintéticos están diseñados para ser bastante resistentes a los procesos tanto de oxidación y reducción, lo que hace que sean

muy difíciles de eliminar en el medio acuoso que genera la industria textil. Estos efluentes, que contienen tintes sintéticos, representan un gran riesgo para los cuerpos de agua y el medio ambiente debido a la complejidad de sus estructuras moleculares y su origen sintético, lo que reduce su capacidad para biodegradarse. (Affat, 2021)

## 1.11 Características de los Colorantes

### 1.11.1 Rojo Congo

El rojo Congo (RC) se conoce como un colorante diazo típicamente aniónico que tiene cuatro grupos funcionales diferentes asistidos por color, que tiene un nombre IUPAC de 4-amino-3-[4-[4-(1-amino-4-sulfonato-naftalen-2-il) diazenilfenil] fenil] diazenil-naftaleno-1-sulfonato disódico. Este colorante se sintetizó por primera vez en 1884.

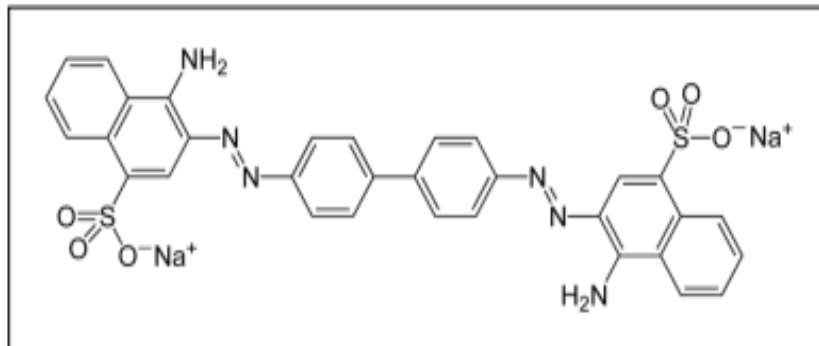


Figura 14. Estructura química del colorante Rojo Congo (HERNÁNDEZ ZAMORA, 2014)

Es un colorante utilizado en la industria textil debido a su afinidad significativa con las fibras de celulosa, la fabricación de papel y la industria del plástico, los cosméticos y los productos farmacéuticos; para teñir principalmente prendas de algodón, es altamente soluble en agua y estable en el aire y la luz. Se emplea en laboratorios como indicador de pH. El RC es un miembro de los compuestos de benceno y contiene en su estructura aminas aromáticas por lo tanto esto genera

grandes problemas puesto que se convierte en materiales cancerígenos para nuestro medio ambiente. Dicho colorante se prepara por copulación de la bencidina tetrazotizada con dos moléculas del ácido 1-naftilamin-4-sulfámico, posee características espectrofotométricas importantes, su longitud máxima de adsorción se presenta alrededor de los 498 nm en solución acuosa y su coeficiente de extinción molar es de  $45000 \text{ L mol}^{-1}$ , su pKa es de 5.5. La bencidina producida a partir de la metabolización del RC plantea efectos nocivos para la salud humana provoca coagulación de la sangre, irritación gastrointestinal, cutánea y ósea. Son por estas razones que se debe de eliminar el RC de las aguas residuales que industrias y laboratorios generan, enviándolas al sistema acuático que nuestra sociedad aprecia diariamente. (Alamrani & Al-Aoh, 2021).

Anualmente, se producen muchos tipos de colorantes en todo el mundo en una cantidad de hasta 108 toneladas anuales, principalmente por los colorantes azoicos (60-70% del total). Se han propuesto diferentes métodos para la remoción del colorante RC en aguas contaminadas entre las cuales destacan la coagulación-floculación, el intercambio iónico, la adsorción, la mineralización y la fotocatalisis; dentro de estos métodos empleados la adsorción es el método que es de gran interés esto debido a sus ventajas en el bajo costo. (Harja et al., 2022)

### 1.11.2 Azul de Metileno

El azul de Metileno es un colorante de carácter catiónico, por su composición química (cloruro de 3,7-bis(dimetilamino) fenotiazina, cloruro de (tetrametilitionina). Su fórmula molecular es  $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{S}\text{Cl}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  y su clasificación según el Color Index es CI 52030. PM ( $319.85 \text{ g mol}^{-1}$ ). (Moreno et al., 2012)

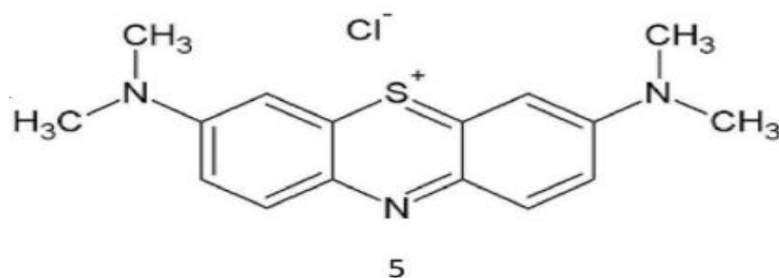


Figura 15. Estructura molecular del azul de metileno (Moreno et al., 2012)

Las características de alta solubilidad, brillo y resistencia de este colorante de naturaleza catiónica justifican su amplio uso en la industria textil.

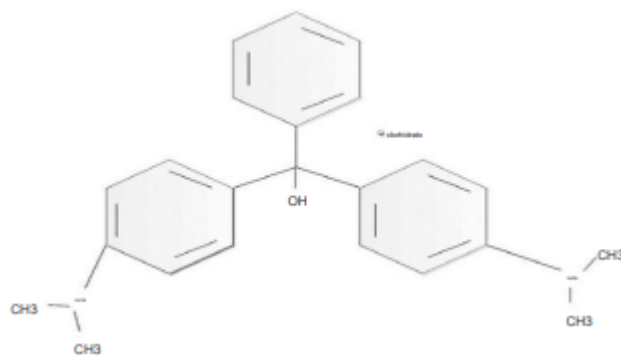
Las características inhibitorias de la monoamino oxidasa del tinte AM pueden inducir una toxicidad mortal por serotonina en humanos. Es un tinte sintético que se aplica en gran cantidad como colorante para papeles, lana, seda y algodón; ambientalmente persistente, tóxico, cancerígeno y mutagénico. Actúa como tinte sintético para teñir telas en las industrias textil y de confección. Es un colorante tóxico y causa varios riesgos para la salud en los humanos tras la exposición, como náuseas, vómitos, lesiones oculares y metahemoglobinemia.

Con respecto a las plantas, la presencia de AM se ha convertido en un desafío importante, como la inhibición del crecimiento, la reducción del pigmento y el contenido de proteínas de las microalgas *Chlorella vulgaris* y *Spirulina platensis*, afectando de manera gradual a nuestro entorno. (Oladoye et al., 2022)

Por lo tanto, es necesario implementar métodos de tratamiento amigables con el medio ambiente, sostenibles y a un bajo costo; los cuales cumplan con el propósito de eliminar contaminantes como lo es el colorante AM de las aguas residuales antes de su liberación al medio ambiente. La adsorción es una técnica de tratamiento alternativa prometedora con ventajas de alta selectividad, rendimiento económico, alta eficiencia de eliminación y simplicidad de la operación de tratamiento, existen otros procedimientos convencionales, pero estos presentan desventajas o inconvenientes como el alto costo, equipos especializados.

### **1.11.3 Verde Malaquita**

El verde malaquita (VM), fue preparado por primera vez en el año de 1877 por Fischer, condensando benzaldehído y dimetilanilina en una proporción molecular 1:2 y en presencia de un agente deshidratante. [CI=42.000B, fórmula química=C<sub>23</sub>H<sub>26</sub>N<sub>2</sub> FW=346; naturaleza=verde básico; pf=112–114 C y l<sub>max</sub>=614 nm.



Nombre	VM (Verde Básico 4)
Color Index (C.I)	42000
Fórmula	$C_{23}H_{25}N_2Cl$
FW (gmol <sup>-1</sup> )	364.9
$\lambda_{max}$ (nm)	614

Figura 16. Estructura molecular del verde malaquita (Tewari et al., 2018)

Compuesto orgánico sintético que es utilizado dentro de las industrias de seda, la lana, el algodón, el cuero y el papel con fines colorantes. Se considera un compuesto altamente cancerígeno para especies que viven en el agua. Se presenta como un polvo cristalino verde que pertenece a la categoría de trifenilmetano. Por otra parte es un colorante catiónico, el cual es altamente toxico por naturaleza, provocando toxicidad respiratoria, provoca carcinogénesis, mutagénesis, fracturas cromosómicas. Por lo tanto, la eliminación de VM de las aguas residuales antes de descargarlas al medio ambiente es necesaria y muy importante. Los siguientes métodos presentados en tablas muestran grandes ventajas y desventajas al emplearlos para la remoción de dicho colorante. (Tewari et al., 2018)

La mayoría de estos procesos son costosos, no tan efectivos, lentos; generando la formación de subproductos. Sin embargo, la adsorción viene siendo un método más eficiente, esto debido especialmente porque el adsorbente es mucho más económico y presenta una alta capacidad de adsorción adecuada para eliminar los colorantes de las aguas residuales. (Ahmad & Alrozi, 2011)

## Capítulo II. Técnicas de Caracterización

### 2.1 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido (SEM) es un método altamente efectivo para examinar materiales orgánicos e inorgánicos en escalas que van desde el nanómetro hasta el micrómetro ( $\mu\text{m}$ ). Esta técnica es la preferida para el análisis de superficies de muestras, permitiendo observar detalles de la estructura a nivel micro y nano. Un SEM típico está compuesto por varios elementos clave: el cañón de electrones, que incluye la fuente de electrones y el ánodo acelerador; lentes electromagnéticas para enfocar los electrones; una cámara de vacío que contiene la platina para la muestra; y diversos detectores para recoger las señales emitidas por el espécimen. El SEM opera con un nivel de magnificación que puede variar entre 1.000x y hasta 300.000x, dependiendo de los requisitos de la observación, permitiendo obtener imágenes detalladas de una amplia variedad de materiales en diferentes escalas. (Inkson, 2016)

#### Componentes principales del SEM

- Cañón de electrones, a fuente para generar electrones de alta energía

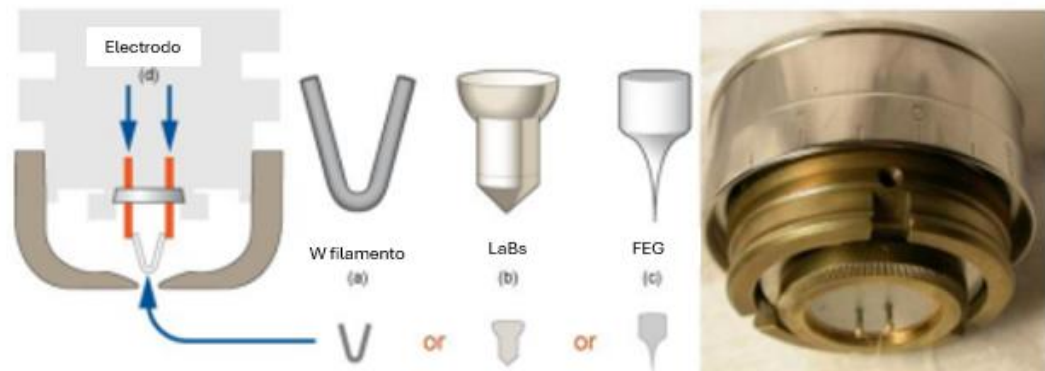


Figura 17. Cañón de electrones (Mohammed & Abdullah, 2018)

- Lentes electromagnéticas, columna hacia abajo para que viajen los electrones.



Figura 18. Lentes electromagnéticas (Mohammed & Abdullah, 2018)

- El sistema de deflexión consta de bobinas de escaneo
- Detector de electrones para electrones retrodispersados y secundarios

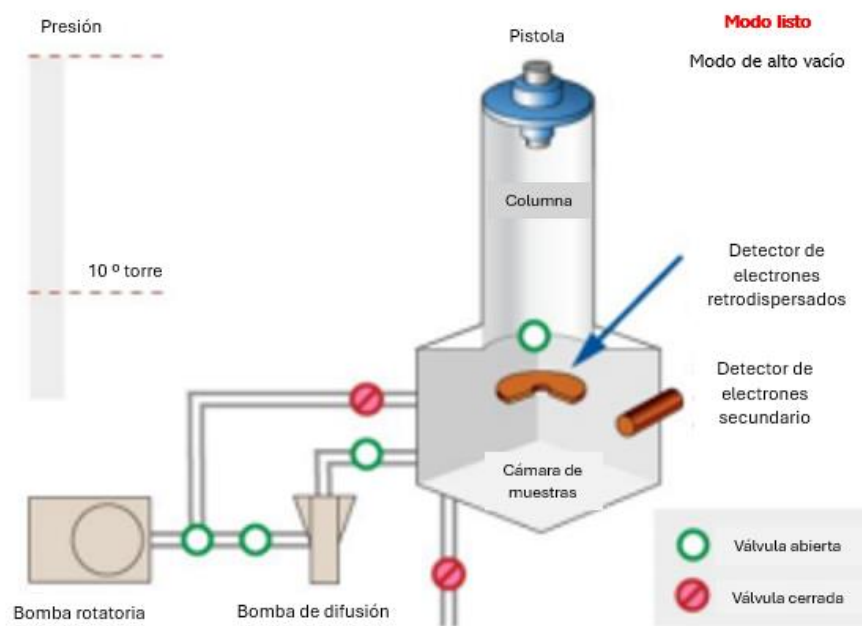


Figura 19. Detectores de electrones en el sistema SEM. (Mohammed & Abdullah, 2018)

- Sistema informático consta de una pantalla de visualización para mostrar las imágenes escaneadas y un teclado para controlar el haz de electrones



Figura 20. Componentes SEM (Mohammed & Abdullah, 2018)

Este equipo permite explorar mundos invisibles en el microespacio y el nanoespacio, revelando detalles que no son accesibles mediante microscopía óptica. El análisis se realiza utilizando un haz de electrones de alta energía, y debido al tamaño del punto generado por el cañón de electrones, que es demasiado grande para crear imágenes nítidas por sí solo, el SEM está equipado con lentes que reducen el tamaño del punto y dirigen el haz de electrones enfocado hacia la muestra. La imagen de la muestra se construye punto por punto, gracias al movimiento de las bobinas de escaneo, que desplazan el haz de electrones en trayectorias lineales, formando eventualmente un patrón rectangular en la superficie de la muestra. Este proceso varía dependiendo del nivel de aumento necesario. El detector de electrones recoge tanto los electrones secundarios (SE) como los electrones retrodispersados (BSE), los cuales son cruciales para la obtención de la imagen. Al aplicar un voltaje positivo a la pantalla del colector, se recolectan estos

electrones y, de esta manera, se obtienen imágenes detalladas. El voltaje aplicado a los electrones emitidos por la pistola afecta los detalles y la resolución que se obtiene en la imagen final. (Mohammed & Abdullah, 2018)

## **2.2 Espectroscopía UV-visible (Uv-Vis)**

La espectroscopía UV-Vis es un método analítico que se destaca por ser económico, sencillo, versátil y no destructivo, y es adecuado para una amplia variedad de compuestos orgánicos y algunas especies inorgánicas. Los espectrofotómetros UV-Vis cuantifican la absorbancia o transmitancia de la luz que atraviesa una muestra, en función de la longitud de onda.

La mayoría de los espectrofotómetros operan en un rango de longitud de onda que va de 200 a 800 nm. Para la espectroscopía UV-vis, el intervalo más utilizado es de 200 a 800 nm. Longitudes de onda superiores a 800 nm caen en el rango del infrarrojo, mientras que longitudes menores a 200 nm se clasifican como UV. El propósito de un detector UV-Vis es transformar una señal luminosa en una señal eléctrica. Idealmente, el detector debería ser capaz de operar a lo largo de un amplio rango de longitudes de onda, mostrar alta sensibilidad y bajo nivel de ruido, ofrecer una respuesta lineal, ser rápido en su respuesta, permitir la esclarecer y requerir una cantidad mínima de muestra. (L.C. Passos & M.F.S. Saraiva, 2019)

Los compuestos covalentes insaturados que tienen diferencias en la energía de transición electrónica correspondientes a la energía de la luz ultravioleta visible absorben en longitudes de onda específicas. Estos compuestos, denominados cromóforos, son los que determinan el color de la sustancia. Por otro lado, los grupos covalentes saturados que no absorben radiación UV-visible, pero influyen en la absorción de los cromóforos, se conocen como auxocromos.

La luz puede atravesar diferentes medios (transmisión), reflejarse en superficies opacas y transparentes, y ser refractada por cristales. Tanto el agua como los alcoholes son mayormente transparentes y no absorben en el rango UV-visible, lo que los convierte en medios ideales para la espectroscopía UV-visible. En los espectrofotómetros UV-vis, una fuente de luz se dirige a través de la muestra, y un detector ubicado en el lado opuesto mide la cantidad de luz que ha sido transmitida.

Generalmente, los gráficos de datos muestran la línea de base en la parte inferior, con los picos orientados hacia arriba. En estos gráficos, la longitud de onda se representa en nanómetros (nm) en el eje x, mientras que la absorbancia (A), sin unidades, se coloca en el eje y. La transmitancia indica la cantidad de luz absorbida en cada longitud de onda, y lo que más nos interesa es el pico más alto, que se denomina máximo. (Rocha et al., 2018)

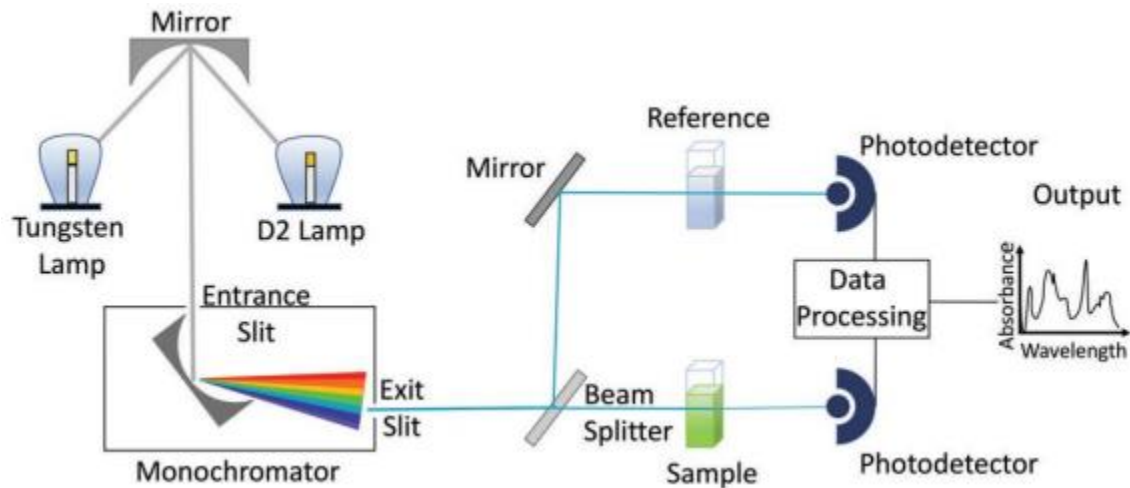


Figura 21. Esquema del Espectrofotómetro UV-vis. La radiación electromagnética se dirige a un monocromador que elige las longitudes de onda de la muestra.

(Rocha et al., 2018)

## **Hipótesis**

El bionanocomposito de lechuguilla/Ag-Cu tendrá la capacidad de catalizar la degradación de los colorante RC, AM, y VM en solución acuosa.

## **Objetivos.**

### **General**

- Evaluar la actividad catalítica del bionanocomposito L/Ag-Cu en la degradación de los colorantes RC, AM y VM.

### **Específicos**

- Sintetizar el bionanocomposito L/Ag-Cu a través de ablación laser y optimizar las condiciones de operación.
- Caracterizar el bionanocomposito generado a través de microscopia electrónica de barrido (SEM).
- Realizar el seguimiento de la cinética de degradación de los colorantes RC, AM y VM a través de espectroscopia UV-Visible (UV-Vis)
- Determina el porcentaje de degradación de cada sistema.

## Capítulo III. Metodología

### 3.1 Síntesis del bionanocomposito

El objetivo principal de este experimento es evaluar la eficacia de un bionanocomposito, elaborado con fibras de lechuguilla impregnadas con nanopartículas bimetálicas de plata-cobre, para la degradación de tres colorantes sintéticos comunes en la industria textil: rojo congo, verde malaquita y azul de metileno.

#### 3.1.1 Preparación de las fibras de Agave lechuguilla

Las fibras de Agave lechuguilla fueron adquiridas en el mercado local. Estas fibras se dividieron en segmentos de aproximadamente 2 cm, descartando aquellas que estaban deterioradas, eran demasiado gruesas o se encontraban en mal estado. Después, se pesaron 2 g de las fibras por cada 100 ml de agua destilada y se añadieron a un vaso de precipitado. El vaso se colocó sobre una parrilla y se calentó durante 20 minutos hasta alcanzar el punto de ebullición, con el fin de eliminar las impurezas. Finalmente, las fibras se lavaron tres veces con agua destilada y se dejaron secar a temperatura ambiente durante 24 horas.

### 3.2 Síntesis de NP's, mediante ablación láser.

Se utilizó un sistema láser Continuum Surelite II con una longitud de onda de 1064 nm, una duración de pulso de 6 ns y una frecuencia de repetición de 10 Hz.



Figura 22. Láser Continuum II. (*Elaboración propia, 2024*)

La obtención de nanopartículas (NP) de Plata (Ag)-Cobre (Cu) con una composición de 80:20 se realizó mediante el sistema de ablación láser, donde el haz láser se dirigió al blanco para desprender la mayor cantidad de nanopartículas en un tiempo no superior a 15 minutos. Estas nanopartículas se concentraron en un vaso de precipitados de 100 mL, con una solución de 30 mL de agua destilada a temperatura ambiente. Este proceso se repitió de manera sucesiva con los diferentes blancos que contenían distintas concentraciones y purezas de metales.

- (80% Ag-20% Cu)
- (50% Ag-50% Cu)

Cada uno con el mismo lapso de tiempo, obteniendo un desprendimiento de .001g de cada uno de nuestros blancos.

### **3.3 Preparación del Bionanocomposito**

Para la síntesis del bionanocomposito, se pesaron 2 g de fibras de *Agave lechuguilla* que habían sido previamente lavadas. Estas fibras se sumergieron en un vaso de precipitado con 30 ml de agua destilada, que ya contenía las nanopartículas (NPs) obtenidas. El objetivo es que las NPs se adhieran a las fibras mediante atracciones electrostáticas. Para lograr esto, el vaso se colocó y posteriormente se mantiene la temperatura a 40°C durante 24 horas.

Al día siguiente, se retiraron las fibras del vaso. Se observó a simple vista que las fibras habían adquirido un color más oscuro, lo que indica que las NPs se habían adherido a ellas. Esta adherencia se confirmó mediante la caracterización de las fibras sintetizadas utilizando microscopía electrónica de barrido (SEM).

### **3.4 Preparación de los colorantes RC, AM, VM.**

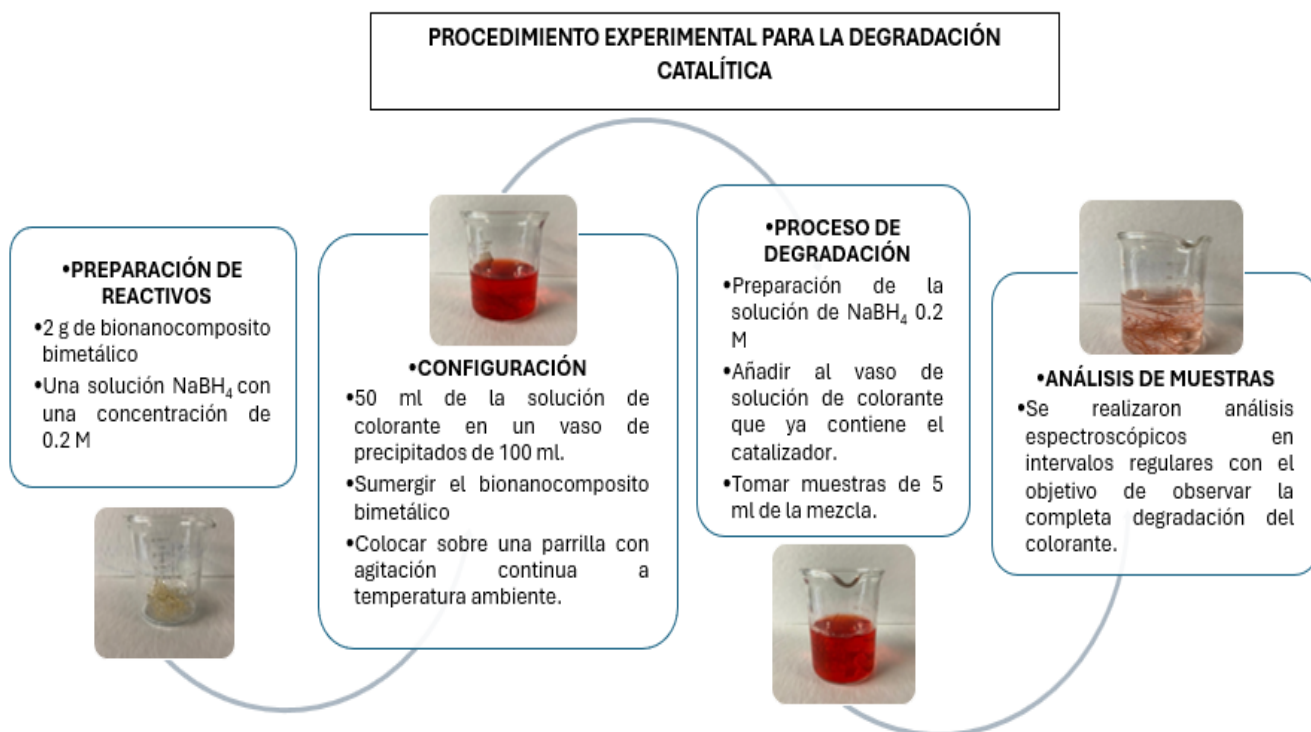
Se utilizó una concentración de 50 ppm para los colorantes en las soluciones preparadas. Para lograr esta concentración, se disolvieron 25 mg de cada colorante en 500 ml de agua destilada, utilizando un matraz Erlenmeyer de 1 litro. A

continuación, se presenta la fórmula para calcular partes por millón (ppm), que se emplea para determinar la cantidad exacta de cada variable necesaria en la preparación de las soluciones.

$$ppm = \frac{g_{soluta}}{ml \text{ o } g_{disolucion}} \times 1\,000\,000$$

### 3.5 Procedimiento Experimental para la Degradación Catalítica

Tabla 2. Diagrama del procedimiento experimental de degradación catalítica.



### 3.6 Análisis SEM

El análisis mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) se utilizará para estudiar la morfología y la estructura superficial del bionanocomposito, con el objetivo de evaluar la distribución y el tamaño de las nanopartículas bimetálicas sobre las fibras de lechuguilla.

Las muestras deben estar secas y limpias antes del análisis.

### **3.6.1 Configuración del Microscopio**

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido JSM-6510LV con un detector EDS marca Bruker modelo XFlash 6-30 a una aceleración de 30 kV.

### **3.7 Análisis UV-Vis**

La espectroscopía UV-Vis se empleará para estudiar las propiedades ópticas del bionanocomposito, con el objetivo de identificar la presencia de nanopartículas bimetálicas plata-cobre y analizar su comportamiento óptico, como las bandas de absorción y el rango específico.

#### **3.7.1 Preparación del Dispositivo UV-Vis**

Celdas de Cuarzo. Las celdas deben ser limpias y libres de impurezas para evitar interferencias

#### **3.7.2 Condiciones Experimentales del UV-Vis**

Rango de Longitudes de Onda. Región de 400 nm a 800 nm.

Se utilizó un espectrofotómetro UV-Vis VELAB VE-5100UV.

## Capítulo IV. Discusión de Resultados

### 4.1 Adhesión de nanopartículas bimetálicas en fibras de lechuguilla.

En este capítulo, se presentan tres imágenes que ilustran el proceso de incorporación de Ag-CuNPs en las fibras de lechuguilla.

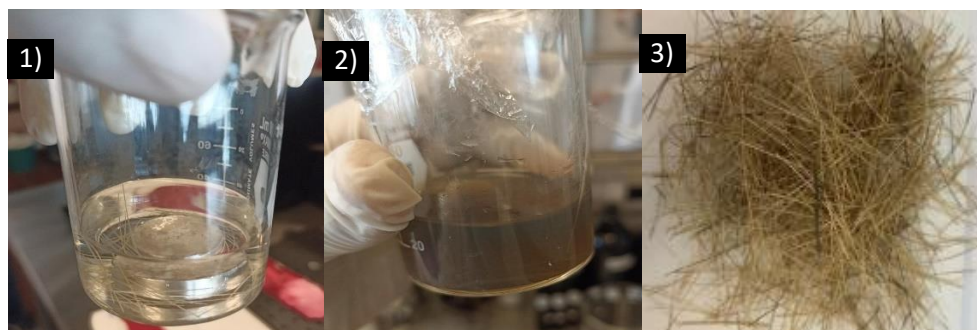


Figura 23. Imagen 1) Fibras de *Agave Lechuguilla* antes de la ablación laser sin impregnación de Ag-CuNPs, imagen 2) Fibras de *Agave Lechuguilla* después de la ablación laser con impregnación de Ag-CuNPs, imagen 3) *Fibras de Agave Lechuguilla* con presencia de Ag-CuNPs después de 24 horas.

Imagen 1) muestra las fibras de *Agave Lechuguilla* sin presencia de NPs bimetálicas sumergidas en agua destilada antes de iniciar con el método de ablación laser.

Imagen 2) se observa la presencia de nanopartículas dentro de la solución de agua destilada después del método de ablación laser, a simple vista y a pesar de encontrarse sumergidas se ve como el agua tiene un tono más oscuro esto debido a la presencia de Ag-CuNPs.

Imagen 3) muestra la presencia de Ag-CuNPs ya adheridas a las fibras de *Agave Lechuguilla*, las cuales se aprecian a simple vista esto debido al tono que toman. Lo cual es fundamental para potenciar las propiedades catalíticas del material en la degradación de colorantes.

## 4.2 Análisis de la Imagen SEM de la Fibra de Agave Lechuguilla sin presencia de NPs

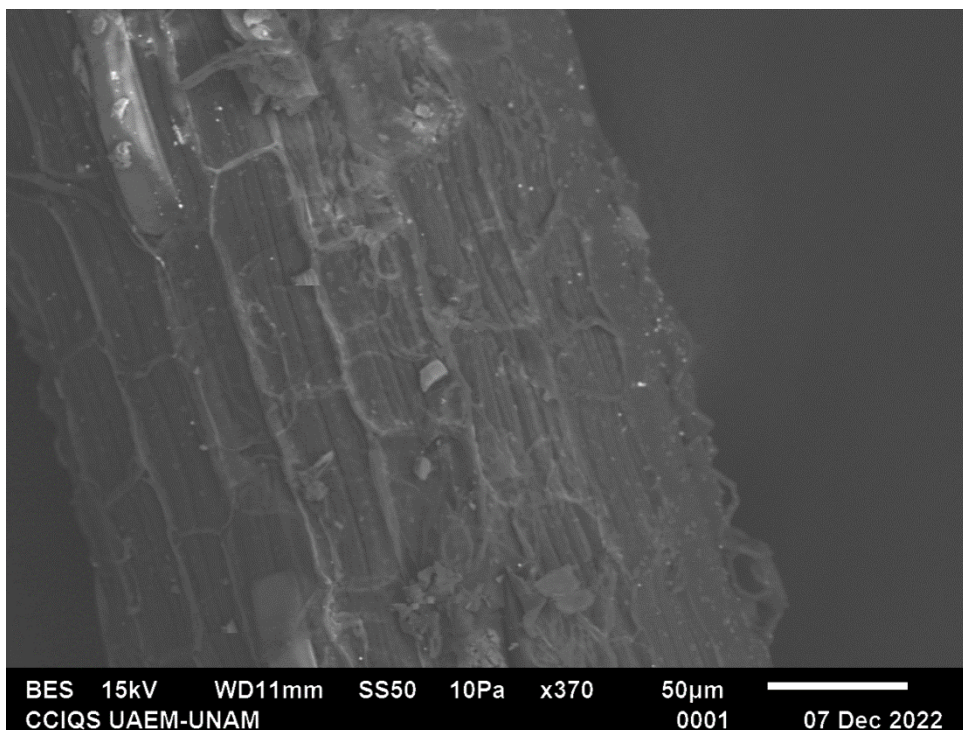


Figura 24. Imagen SEM de las fibras de *Agave Lechuguilla* sin presencia de Ag-CuNPs en su superficie.

La imagen de microscopía electrónica de barrido (SEM) presenta una fibra de lechuguilla en su estado natural, sin tratamiento ni impregnación de nanopartículas. En la imagen **24** se observa la morfología característica de la fibra, que muestra una superficie rugosa y fibrosa. La textura de la fibra es notablemente heterogénea, sugiriendo la presencia de poros y estructuras internas que podrían influir en la capacidad de adsorción y, por ende, en su interacción con los agentes externos.

Es importante establecer esta línea base para la evaluación de las modificaciones que se introducirán posteriormente mediante la impregnación con nanopartículas bimetalicas. Esta imagen ilustra claramente la estructura natural de la fibra de Agave lechuguilla, permitiendo apreciar sus características iniciales antes de cualquier tratamiento. Las comparaciones morfológicas con las imágenes posteriores deberán realizarse bajo condiciones similares de magnificación para garantizar que

las diferencias observadas sean atribuibles a las modificaciones introducidas, y no a variaciones en la ampliación de las imágenes.

La preservación de la morfología fibrosa es crucial, ya que proporciona un sustrato adecuado para la mejora de las propiedades del material en aplicaciones ambientales, como la degradación de colorantes. Esta imagen servirá como referencia para evaluar el impacto de la incorporación de las nanopartículas en la superficie fibrosa en las siguientes etapas de esta investigación.

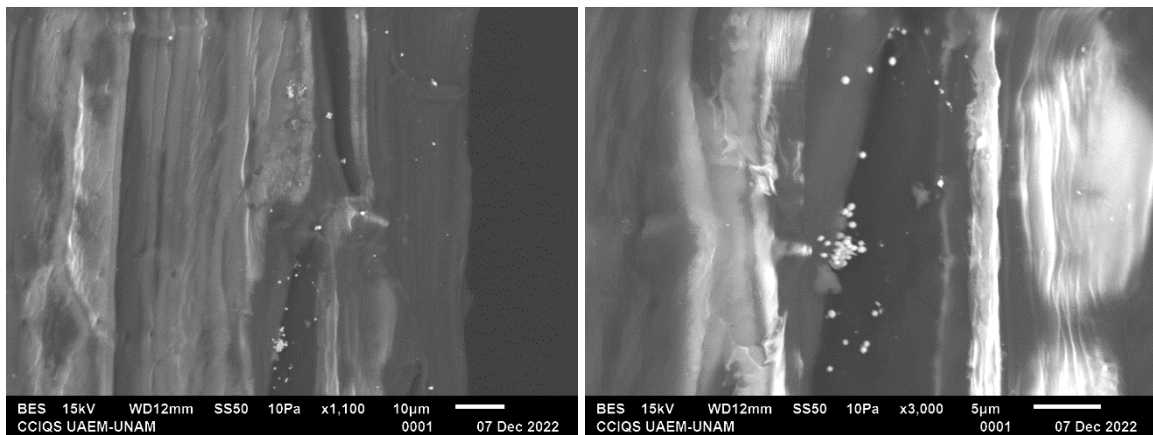


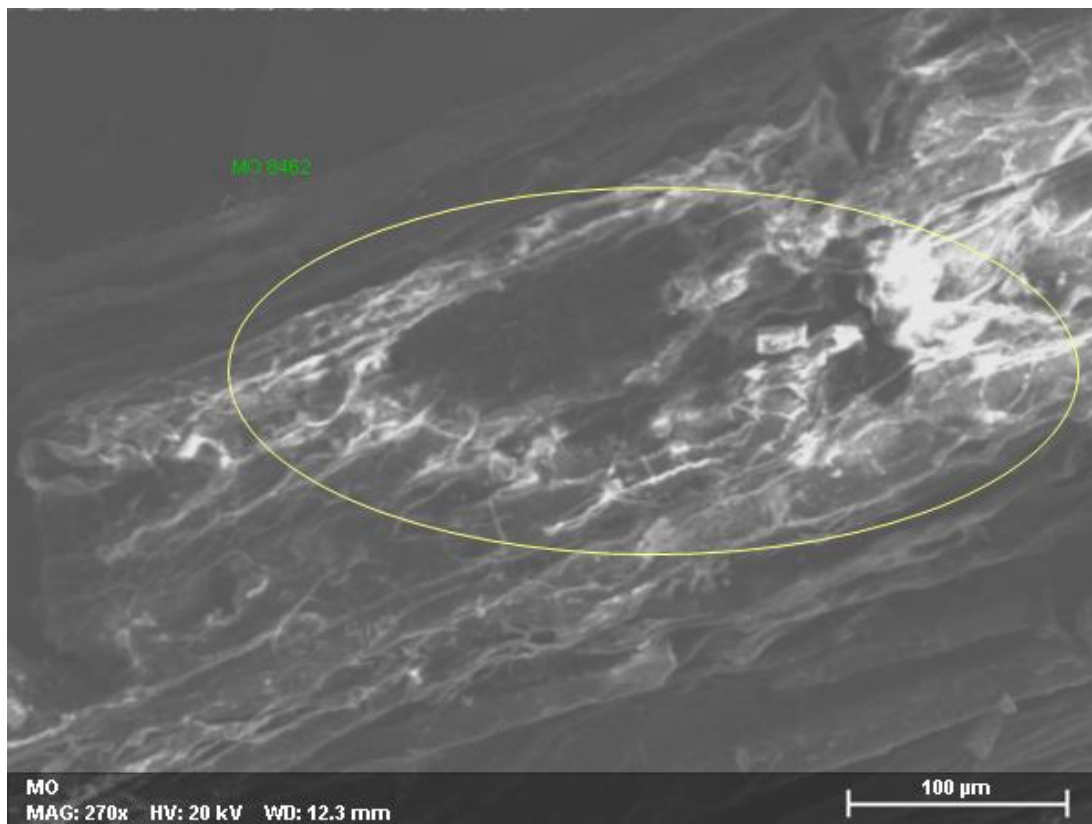
Figura 25. Imagen SEM de las fibras de *Agave Lechuguilla* con presencia de Ag-CuNPs en su superficie.

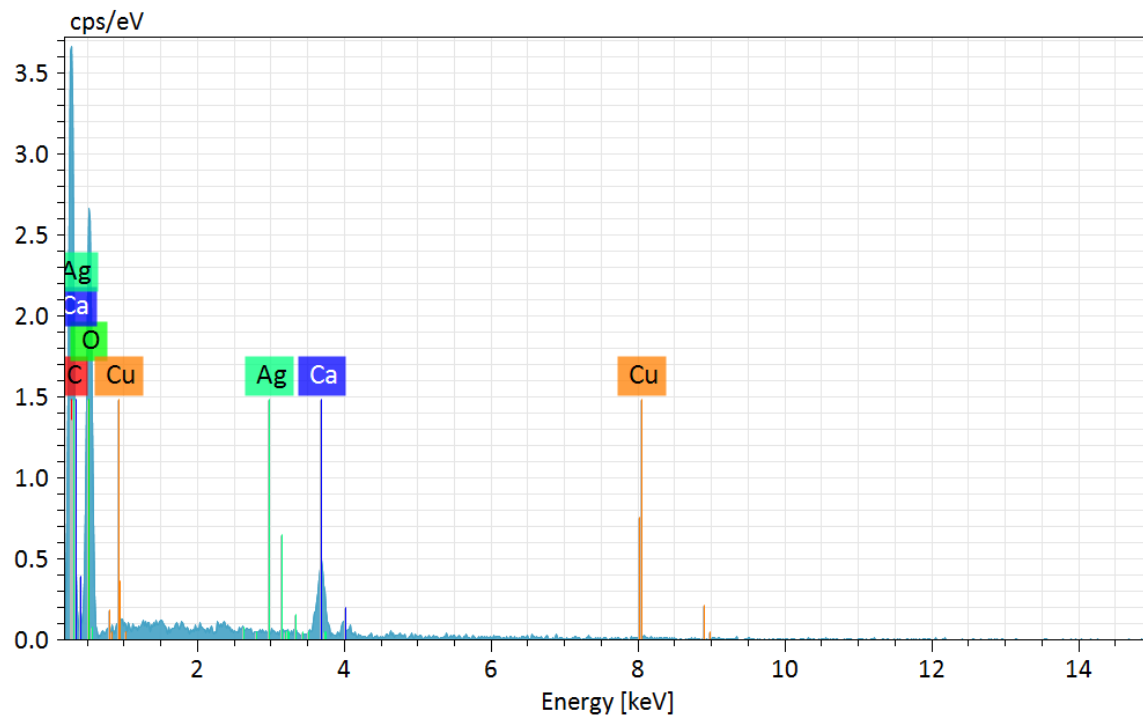
La imagen 25. SEM muestra una fibra de lechuguilla impregnada con nanopartículas bimetalicas de plata-cobre, en comparación con la imagen de las fibras sin tratar, se puede observar una modificación en la superficie de la fibra, en donde ahora presenta una distribución de nanopartículas sobre su estructura fibrosa.

Las nanopartículas se muestran como puntos metálicos dispersos, que están firmemente adheridos a la superficie de la fibra. Esta adherencia es importante, ya que se espera que potencie las propiedades catalíticas, mejorando su eficacia en la degradación de colorantes. La densidad y distribución de las nanopartículas sugieren un proceso de impregnación exitoso, lo que podría incrementar la capacidad de interacción del biocomposito con los contaminantes presentes en el

medio ambiente. Resalta las diferencias en la morfología superficial inducidas por la incorporación de nanopartículas a diferencia de la primera imagen en donde no hay presencia de nanopartículas.

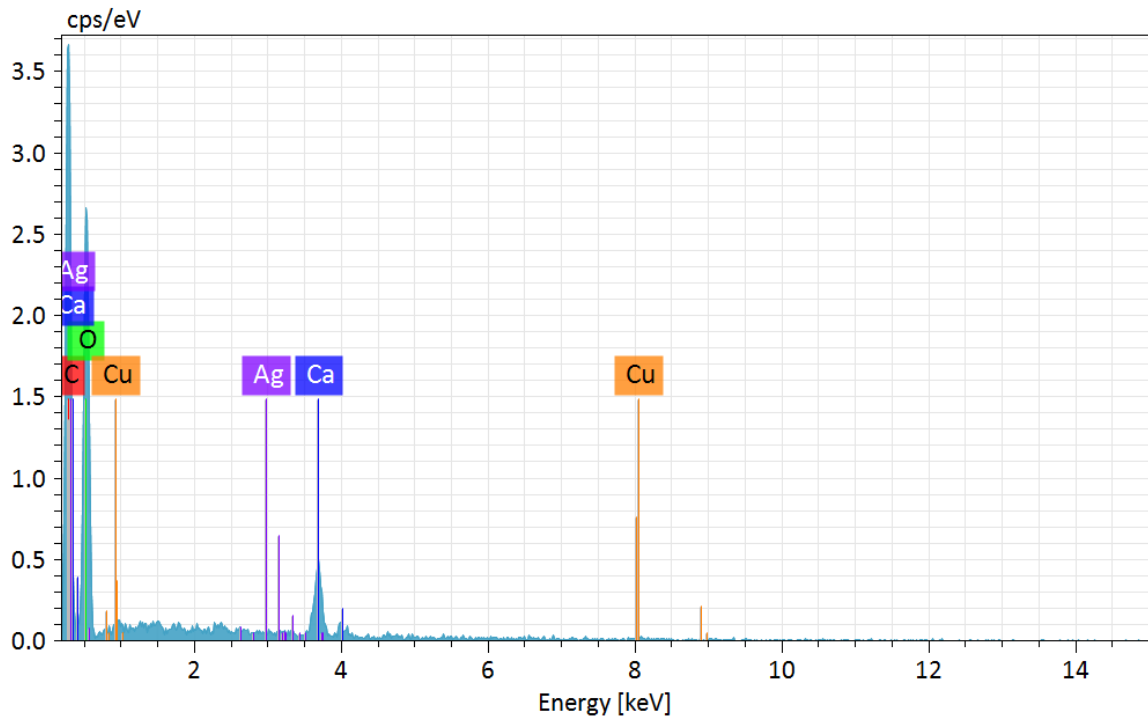
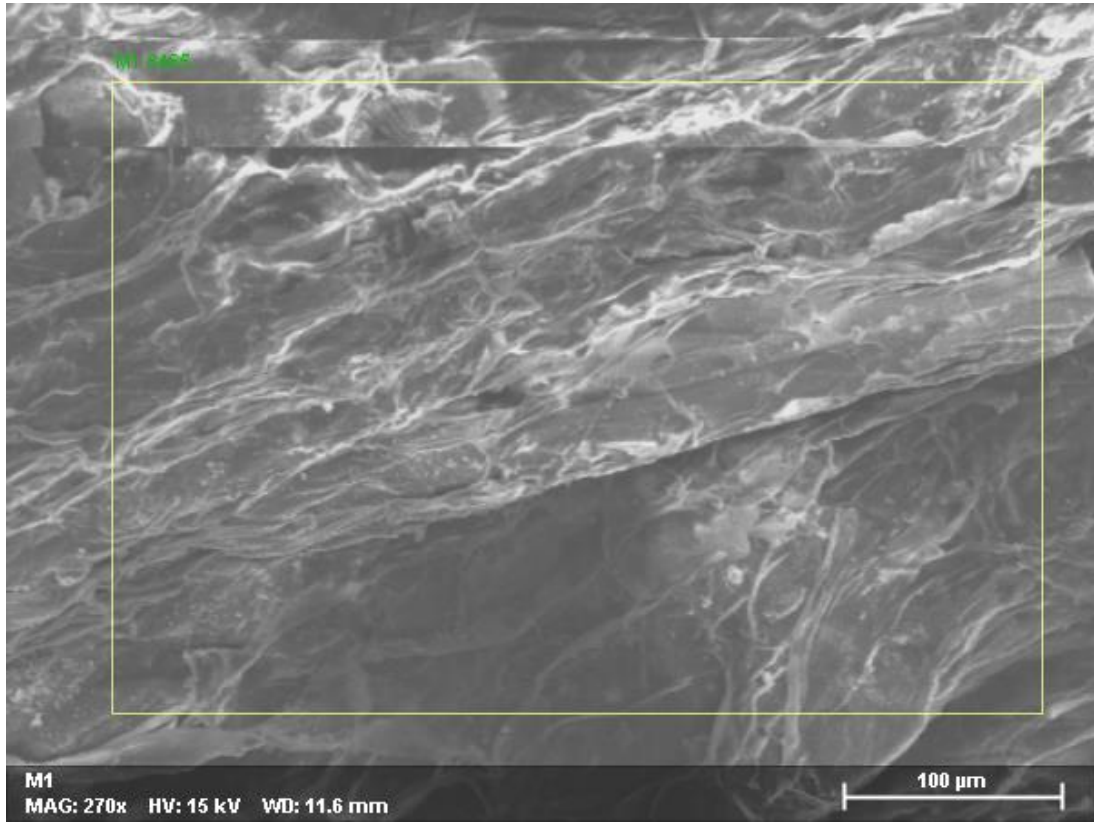
Espectros EDS para confirmar la presencia de plata-cobre en una región de las fibras de agave lechuguilla.

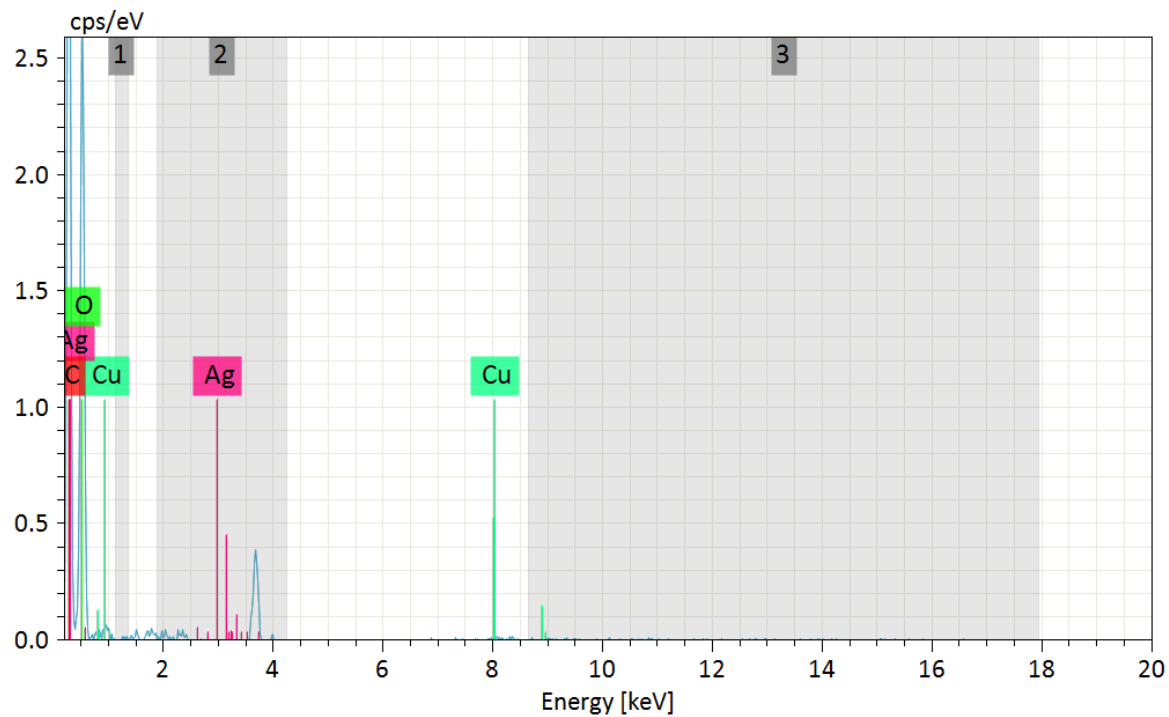




MO 8462

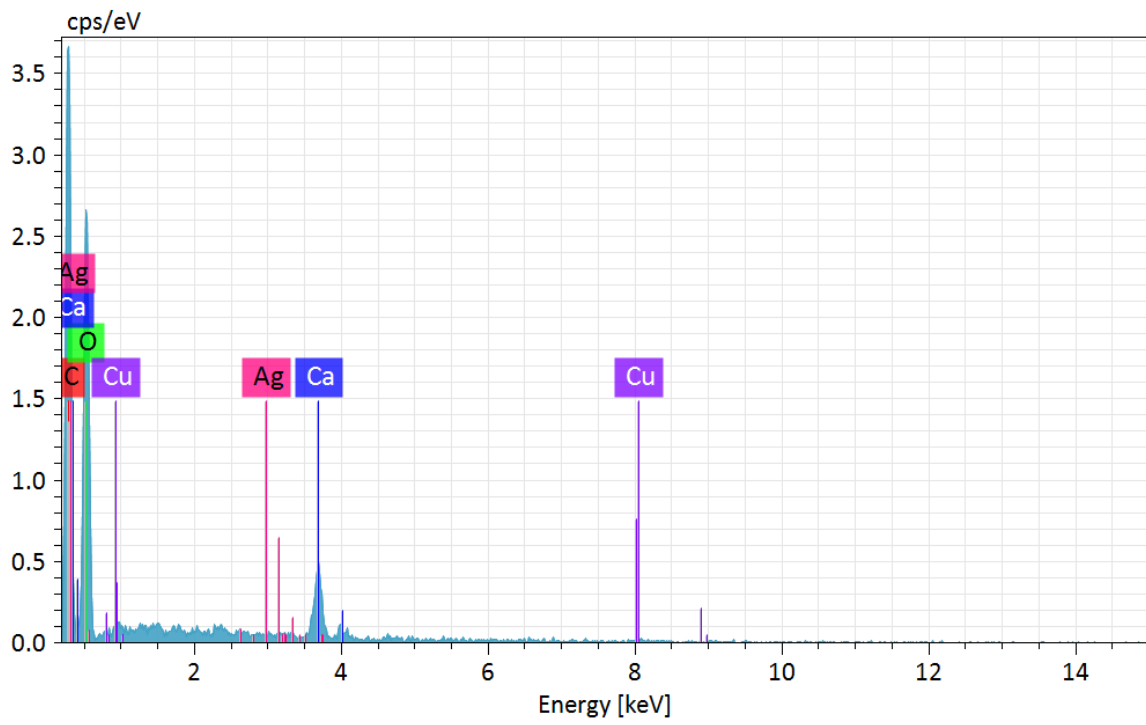
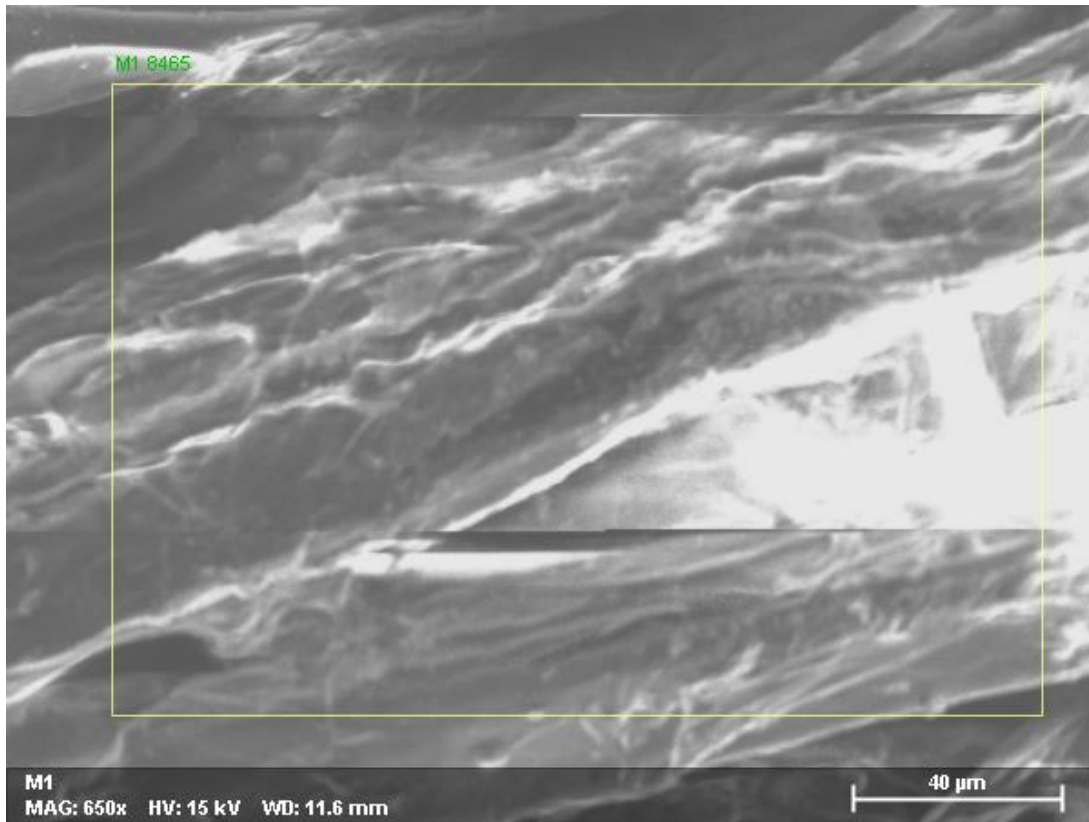
Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Carbon	6	4047	45.15	45.15	52.92	2.21	4.90
Oxygen	8	3375	52.68	52.68	46.35	2.68	5.10
Calcium	20	715	1.93	1.93	0.68	0.07	3.81
Copper	29	21	0.23	0.23	0.05	0.03	13.16
Silver	47	0	0.00	0.00	0.00	0.00	2.53
		<b>Sum</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>		





MO 8462

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Copper	29	21	0.23	0.23	0.05	0.03	13.16
Silver	47	0	0.00	0.00	0.00	0.00	2.53
Carbon	6	4047	45.15	45.15	52.92	2.21	4.90
Oxygen	8	3375	52.68	52.68	46.35	2.68	5.10
Calcium	20	715	1.93	1.93	0.68	0.07	3.81
		<b>Sum</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>		



MO 8462

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Calcium	20	715	1.93	1.93	0.68	0.07	3.81
Copper	29	21	0.23	0.23	0.05	0.03	13.16
Silver	47	0	0.00	0.00	0.00	0.00	2.53
Oxygen	8	3375	52.68	52.68	46.35	2.68	5.10
Carbon	6	4047	45.15	45.15	52.92	2.21	4.90
		<b>Sum</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>		

### 4.3 Preparación de NPs mediante ablación laser sobre un blanco a diferentes concentraciones en agua destilada.

#### 4.3.1 UV-Vis AgNPs

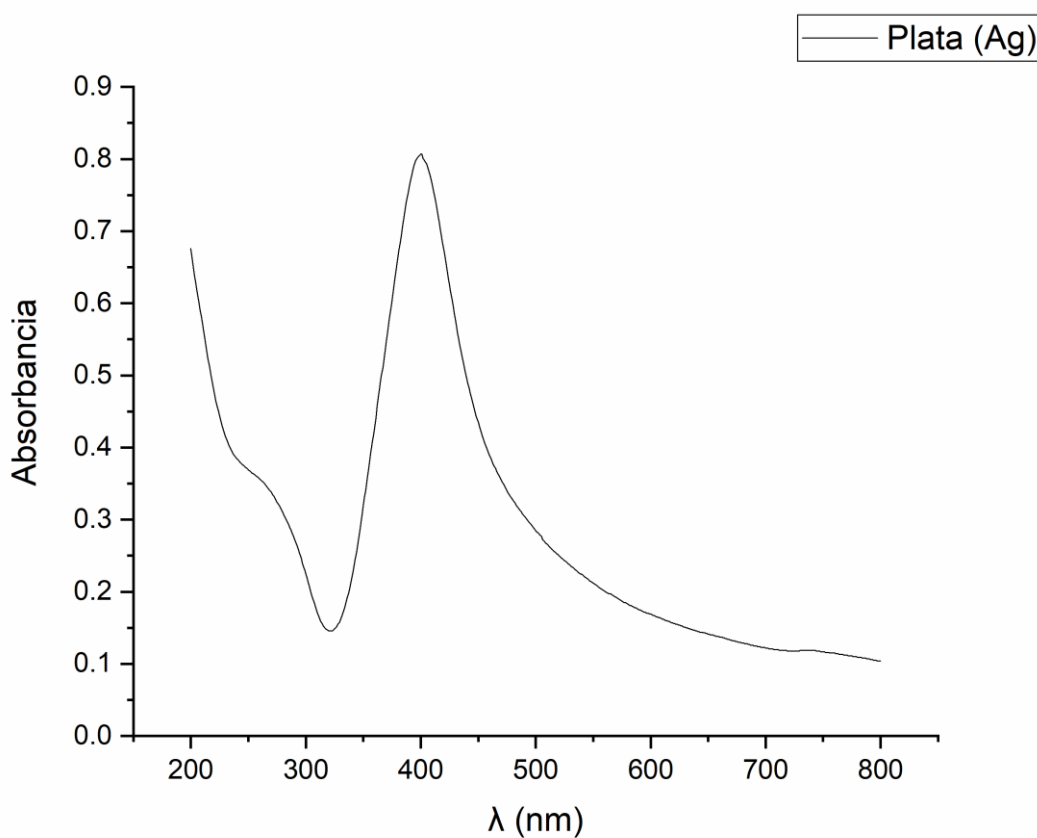


Figura 26. Espectro UV-Vis AgNPs

Las nanopartículas de metales como la plata tienen una absorción de resonancia de plasmón superficial en la región UV-Visible. La banda de plasmón superficial surge de la oscilación coherente de los electrones de la banda de conducción en relación con la red de iones metálico.(Aswathy et al., 2011) Se observa que el pico de absorbancia se encuentra en el punto 400 nm; 0.80696023.



Figura 27. Muestra de las AgNPs en agua destilada. (Elaboración propia, 2024)

Un rayo láser se enfoca en un objetivo masivo, ablación de la superficie del material. La masa ablacionada (pluma) se expande bajo el líquido que libera muchas especies, incluidas nanopartículas. El entorno líquido rodea la columna extirpada y las nanopartículas se forman a través de la rápida condensación de la burbuja fundida. Las suspensiones de nanopartículas de plata exhiben un color distintivo (Moura et al., 2017) como se aprecia en la imagen 29, lo cual igual el tono va dependiendo de sus características.

### 4.3.2 UV-Vis Ag 80%- Cu 20% NPs

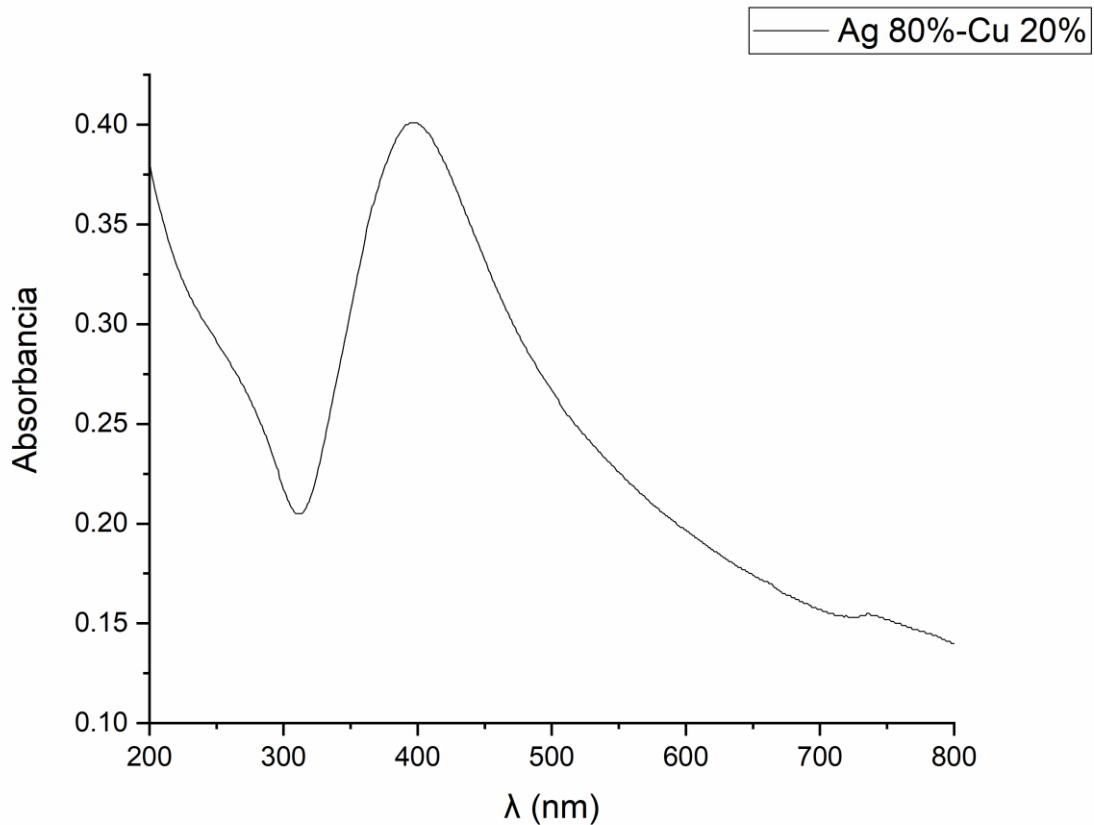


Figura 28. Espectro UV-Vis Ag 80%- Cu 20% NPs

En el espectro de absorción UV-Vis (Figura 30), se observa un desplazamiento hacia el rojo en el pico de absorción a 398 nm, lo que indica la posible formación de nanopartículas bimetálicas de AgCu. Este corrimiento al rojo es un comportamiento característico que ocurre cuando los metales se combinan en una estructura bimetálica, lo cual puede ser consecuencia de la interacción entre los iones de plata y cobre durante la síntesis.



Figura 29. Muestra de las Ag 80%- Cu 20% NPs en agua destilada.

Las aleaciones de Ag-Cu son ampliamente conocidas debido a la formación de un eutéctico. Las nanopartículas de Ag-Cu (AgCuNPs) han demostrado un gran potencial en diversas aplicaciones, gracias a sus excepcionales propiedades eléctricas y térmicas. Además, las AgCuNPs presentan una mayor reactividad superficial, lo que las hace útiles para mejorar la interfase y optimizar los procesos catalíticos. Estas nanopartículas también podrían emplearse para mejorar la propiedad de oxidación rápida del Cu, lo que amplía aún más su aplicabilidad en diferentes campos tecnológicos. (V.S et al., 2019)

### 4.3.3 UV-Vis Ag 50% - Cu 50% NPs.

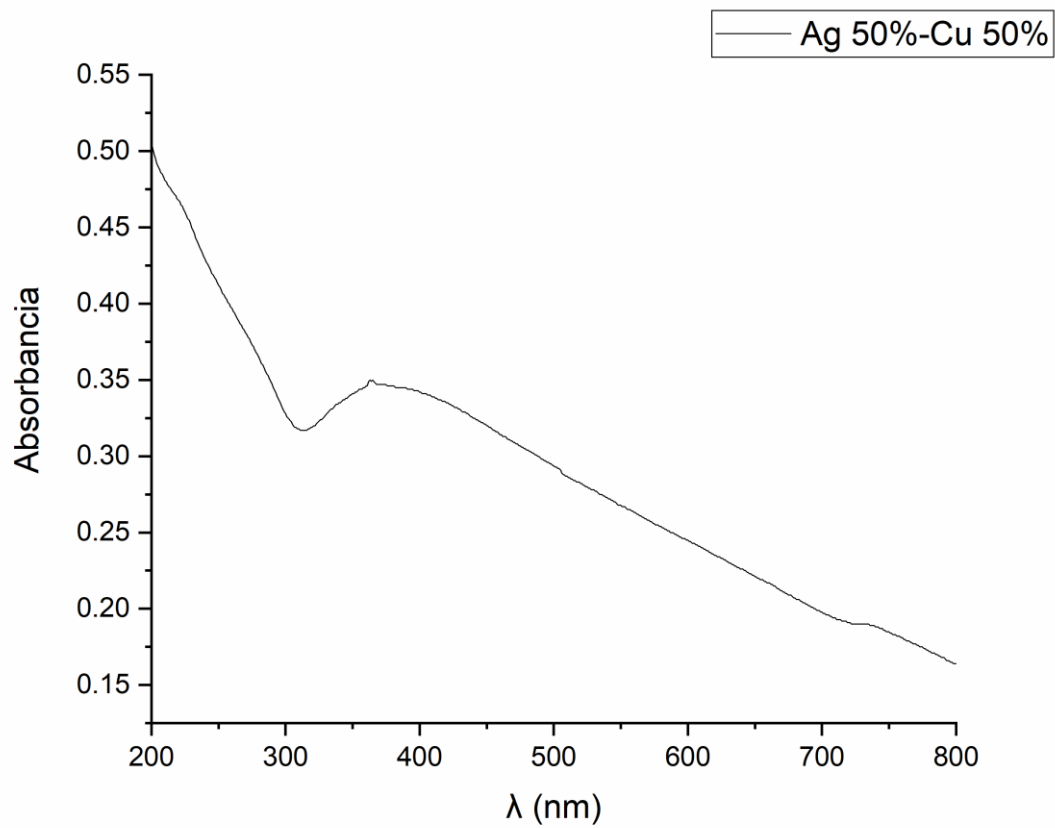


Figura 30. Espectro UV-Vis Ag 50% - Cu 50% NPs.

Las propiedades ópticas características de las nanopartículas bimetálicas se registraron utilizando un espectrofotómetro UV-vis.



Figura 31. Muestra de las Ag 50%- Cu 50% NPs en agua destilada

Las nanopartículas bimetálicas muestran resonancia plasmónica, con una buena coincidencia de formación de la solución coloidal de nanopartículas de Cu puras. Las Ag-CuNPs son un material antibacteriano eficaz, con una actividad antibacteriana mejorada contra bacterias grampositivas y gramnegativas. (Petrović et al., 2015)

#### 4.3.4 UV-Vis CuNPs

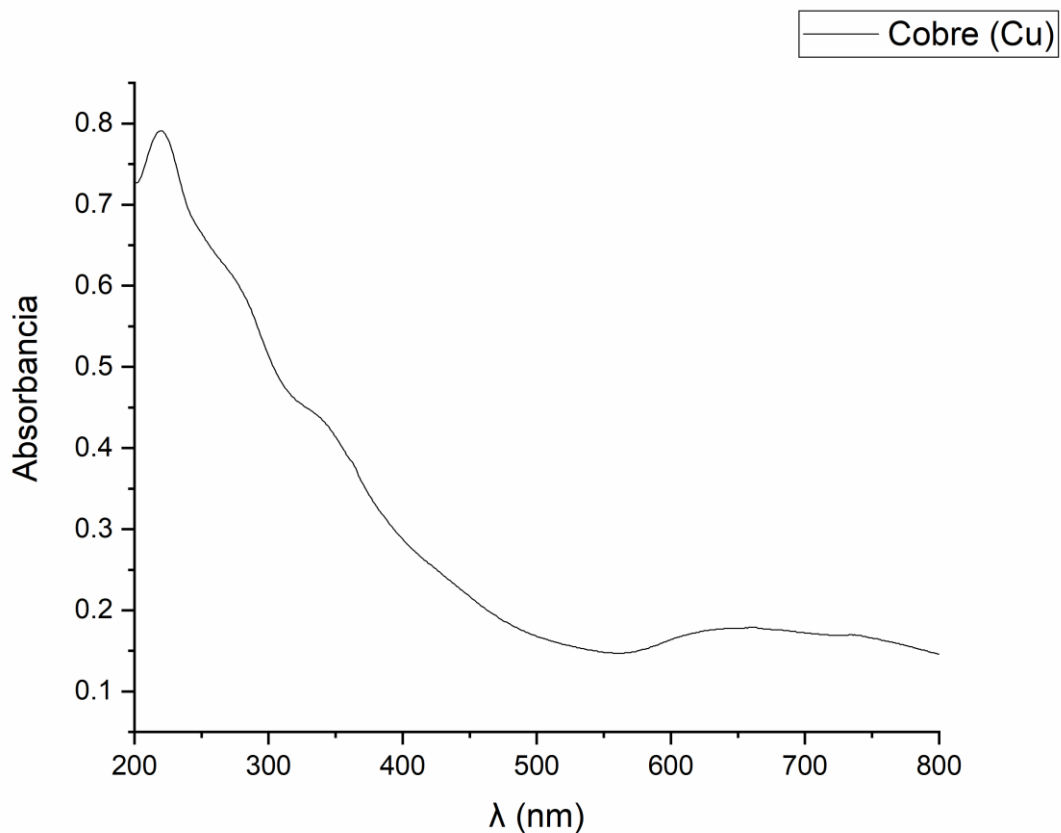


Figura 32. Espectro UV-Vis CuNPs

Espectro de absorción óptica de coloides obtenidos por la ablación con láser Nd:YAG de 1064 nm sobre el objetivo de cobre.

El espectro de absorción óptica de coloides exhibe picos característicos de resonancia del plasmón superficial. La presencia del único pico de plasmón superficial implicaba que las nanopartículas observadas eran casi esféricas. (Aye et al., 2010)

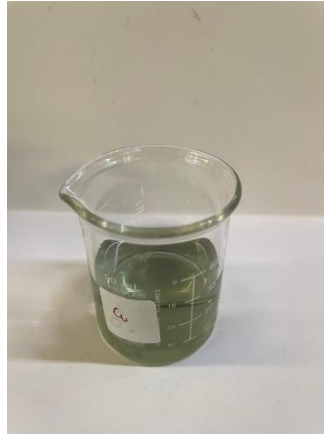


Figura 33. Muestras de las CuNPs en agua destilada.

Las nanopartículas de cobre son atractivas debido a sus propiedades catalíticas, ópticas y de conducción eléctrica. Las nanopartículas se observaron mediante un color verde claro visible en los coloides después de unos minutos durante la ablación

#### **4.4 Degradación catalítica de los colorantes**

##### **4.4.1 Rojo Congo 80% Ag- 20% Cu.**

Para evaluar la degradación del colorante rojo congo, se realizó un análisis espectroscópico utilizando un espectrofotómetro UV-Vis VELAB VE-5100UV. Se preparó una solución de colorante a una concentración de 50 ppm, utilizando borohidruro de sodio ( $\text{NaBH}_4$ ) como agente reductor. En este proceso, se emplearon 0.2 g de nuestro biocomposito, que fue sumergido en 50 ml de la solución de colorante y mantenido en agitación constante sobre una parrilla magnética, este análisis se realiza entre las longitudes de onda de 400 nm-800 nm.

Antes de la adición del agente reductor, se tomó una muestra de 5 ml de la mezcla para determinar el nivel inicial de absorbancia del RC. Esta muestra fue colocada en una celda de cuarzo y analizada en el espectrofotómetro, donde se registró un pico de absorbancia a 498 nm como se puede observar en la figura 27 correspondiente a la presencia del colorante.

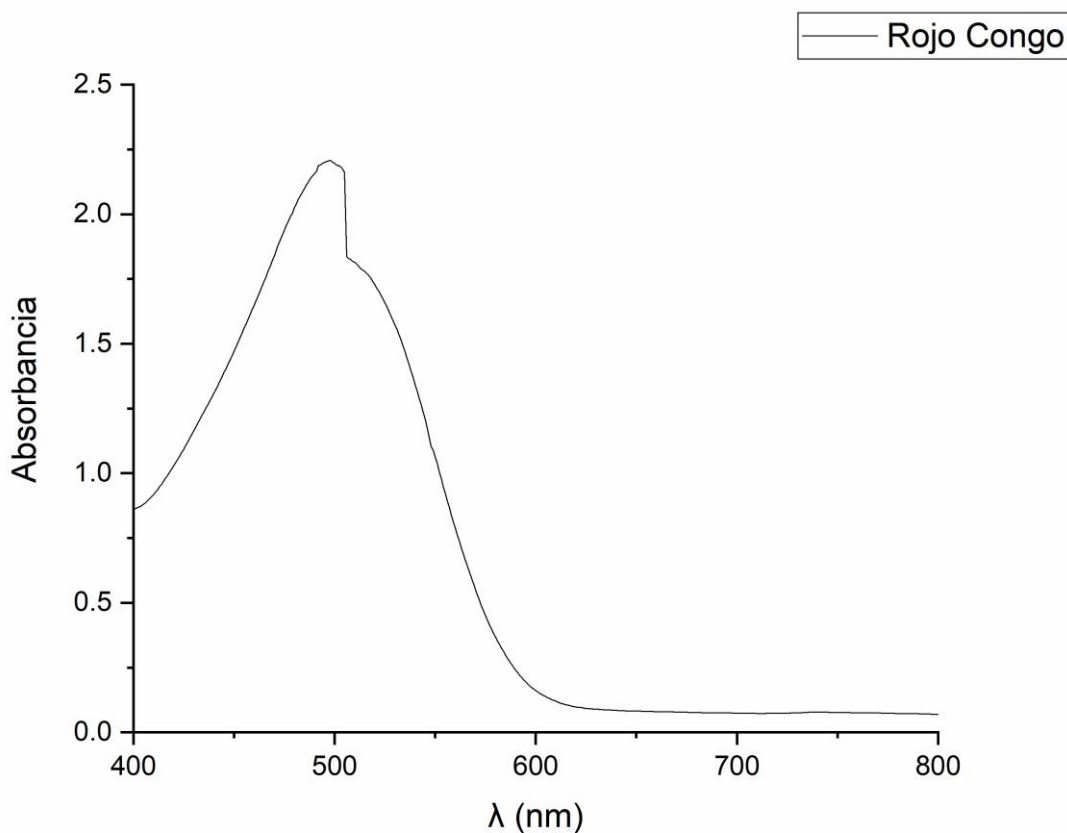


Figura 34. Espectro UV-Vis del colorante RC con una concentración de 50 ppm.

Una vez establecido el punto de referencia, se añadieron 2 ml de la solución de ( $\text{NaBH}_4$ ) recién preparada a los 50 ml de solución de colorante, dando inicio al proceso de degradación. Para monitorear la reacción, se realizaron tomas de muestras cada 3 minutos, permitiendo observar los cambios en la absorbancia a medida que avanzaba la degradación del colorante.

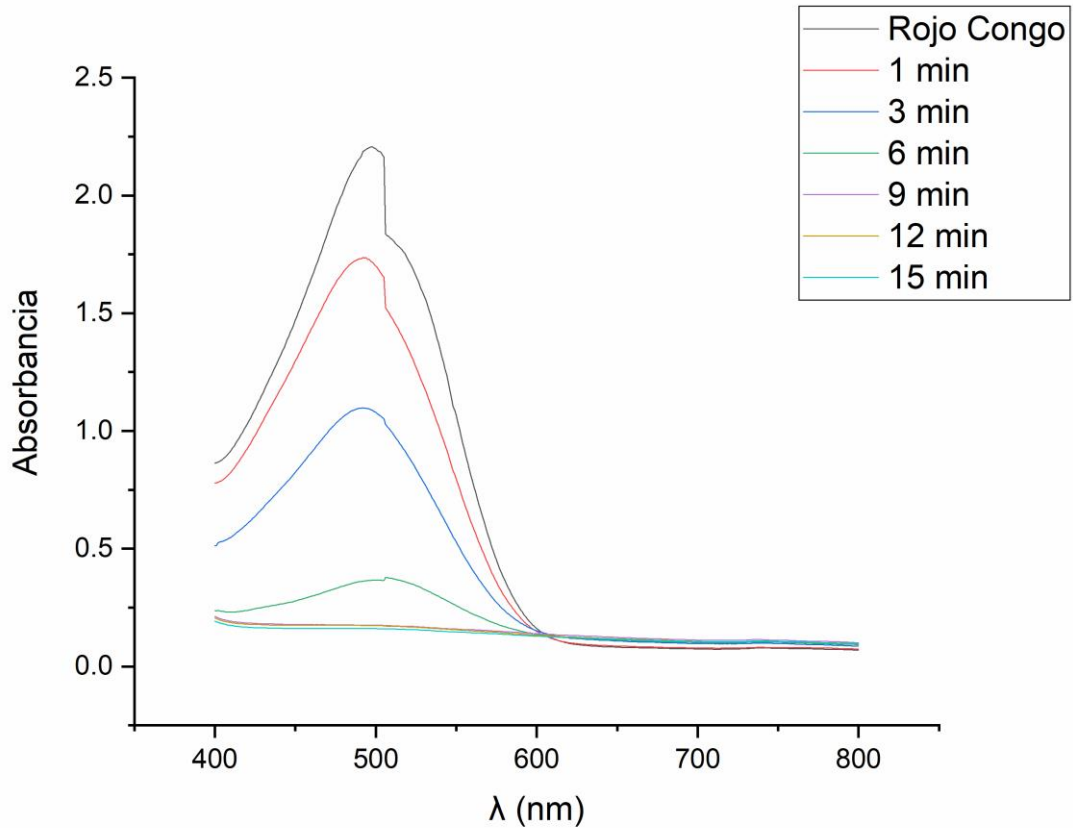


Figura 35. Espectro UV-Vis del colorante RC después de la degradación del bionanocomposito 80% Ag-20% Cu.

El porcentaje de decoloración se determinó por medio de la Ecuación.

$$\% \text{ Decoloración} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100$$

- $A_0$  = Absorbancia inicial.
- $A_t$  = Absorbancia total.

En donde una vez obteniendo los valores de la degradación del colorante RC los cuales son  $A_0 = 2.20765943$  y después del tiempo de degradación el cual es de

$A_t=0.160153777$  , podemos determinar el porcentaje de degradación, mediante la ecuación antes mencionada.

$$\frac{2.20765943-0.160153777}{2.20765943} \times 100 = 92.74\%$$

La misma ecuación se empleará para calcular los porcentajes de degradación para cada muestra.

El análisis de los espectros UV-Vis mostró una disminución progresiva en la absorbancia en 498 nm desde el primer minuto tras la adición del agente reductor, indicando que el biocomposito estaba actuando efectivamente en la degradación del colorante. El tiempo total de degradación registrado fue de 15 minutos, durante los cuales la absorbancia continuó disminuyendo, alcanzando una reducción significativa en la intensidad del color, con un porcentaje de degradación significativo de 92.74%.

La molécula RC tiene simetría lineal con un centro hidrofóbico formado por dos anillos de fenilo unidos a través de un enlace diazo con dos fracciones de naftaleno terminales cargadas que tienen grupos sulfónicos y amino. En la reducción de RC, los enlaces azo (-N=N-) se degradan. Estos enlaces son susceptibles a la reducción química, lo que significa que pueden romperse mediante la acción del agente reductor. Las moléculas de RC no se reducen fácilmente en agua. Los electrones necesitan algún tipo de apoyo y una vía para moverse rápidamente desde los iones de borohidruro a RC moléculas. Además, los iones de borohidruro y las moléculas de RC necesitan una superficie para adherirse e interactuar entre sí, lo que se logra mediante el catalizador. Durante la reducción de RC, el catalizador toma electrones de  $BH_4^{-1}$  iones y los transportan a moléculas RC para reducirlos en aminas aromáticas.(Naseem et al., 2018)

Las nanopartículas de plata y cobre no solo actúan como catalizadores que promueven la reacción, sino que también pueden generar especies reactivas de oxígeno (ERO) que facilitan la degradación

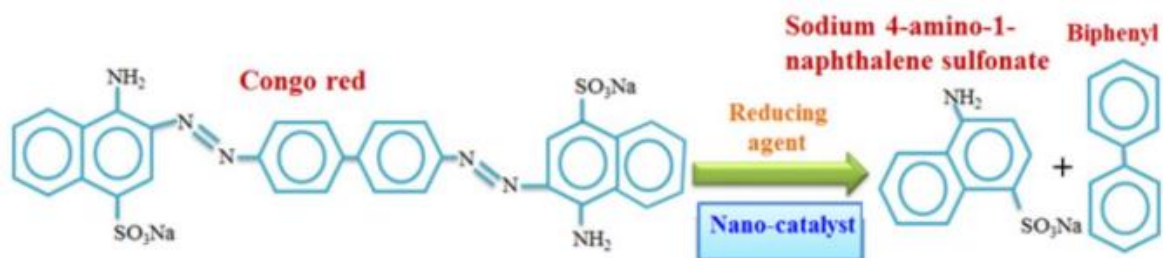


Figura 36. Reacción general de reducción de CR utilizando NaBH<sub>4</sub> (Naseem et al., 2018)

RC se reduce a aminas aromáticas utilizando NaBH<sub>4</sub>. Los catalizadores hacen que la reducción de RC sea cinéticamente factible y la reducción se completa en un tiempo muy pequeño. los enlaces azo se rompen para formar aminas aromáticas que se encuentran ampliamente. Las nanopartículas actúan como centro de relevo para la transferencia de electrones desde BH<sub>4</sub><sup>-1</sup> iones a moléculas RC en las que de BH<sub>4</sub> los iones <sup>-1</sup> actúan como donadores de electrones mientras que las moléculas RC actúan como agentes aceptores de electrones. (Naseem et al., 2018)

La concentración de CR en la mezcla de reducción se determina a partir de la absorbancia del pico que aparece.



Figura 37. Muestra inicial del colorante RC, después de la degradación.

#### 4.4.2 Azul de Metileno 80% Ag- 20% Cu

Para evaluar la degradación del colorante azul de metileno, se realizó un análisis espectroscópico utilizando un espectrofotómetro UV-Vis VELAB VE-5100UV. Se

preparó una solución de colorante a una concentración de 50 ppm, empleando borohidruro de sodio ( $\text{NaBH}_4$ ) como agente reductor. En este proceso, se utilizaron 0.2 g de nuestro biocomposito, que fue sumergido en 50 ml de la solución de colorante y mantenido en agitación constante sobre una parrilla magnética este análisis se realiza entre las longitudes de onda de 400 nm-800 nm.

Antes de la adición del agente reductor, se tomó una muestra de 5 ml de la mezcla para determinar el nivel inicial de absorbancia del azul de metileno. Esta muestra fue colocada en una celda de cuarzo y analizada en el espectrofotómetro, donde se registró un pico de absorbancia a 608 nm como se puede observar en la imagen... correspondiente a la presencia del colorante.

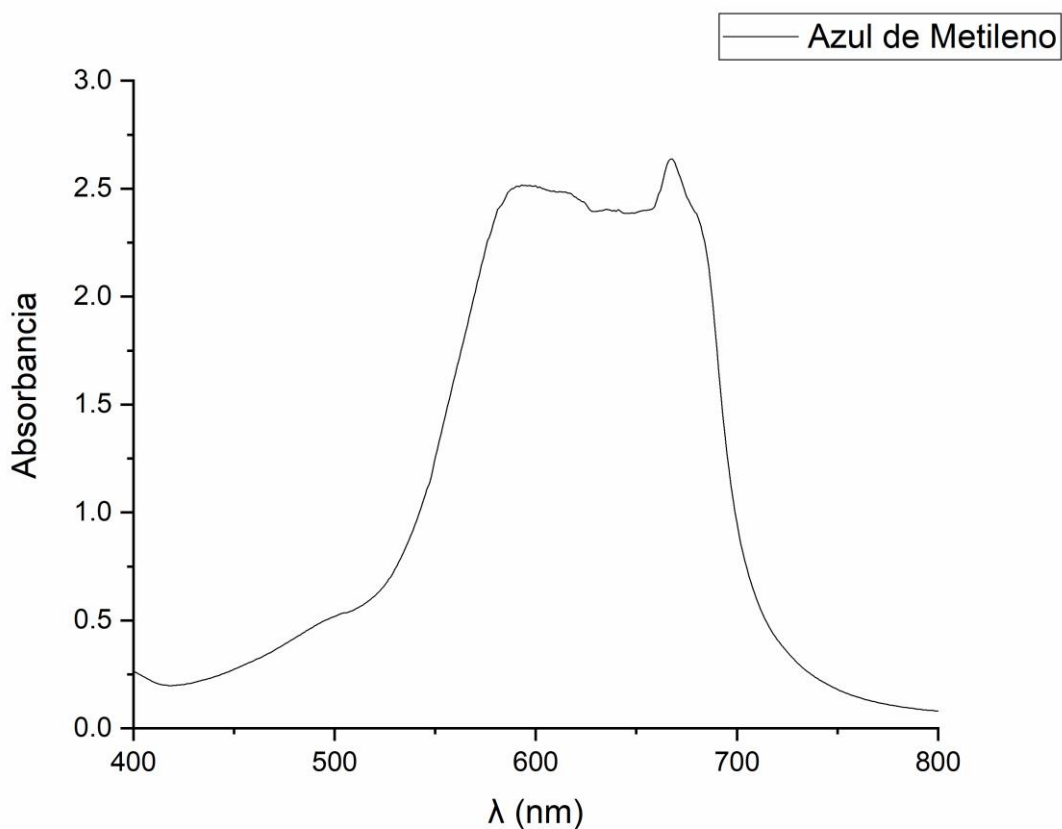


Figura 38. Espectro UV-Vis del colorante AM con una concentración de 50 ppm.

Una vez establecido el punto de referencia, se añadieron 2 ml de la solución de borohidruro de sodio recién preparada a la mezcla, dando inicio al proceso de degradación. Para monitorear la reacción, se realizaron tomas de muestras cada 3 minutos, permitiendo observar los cambios en la absorbancia a medida que avanzaba la degradación del colorante.

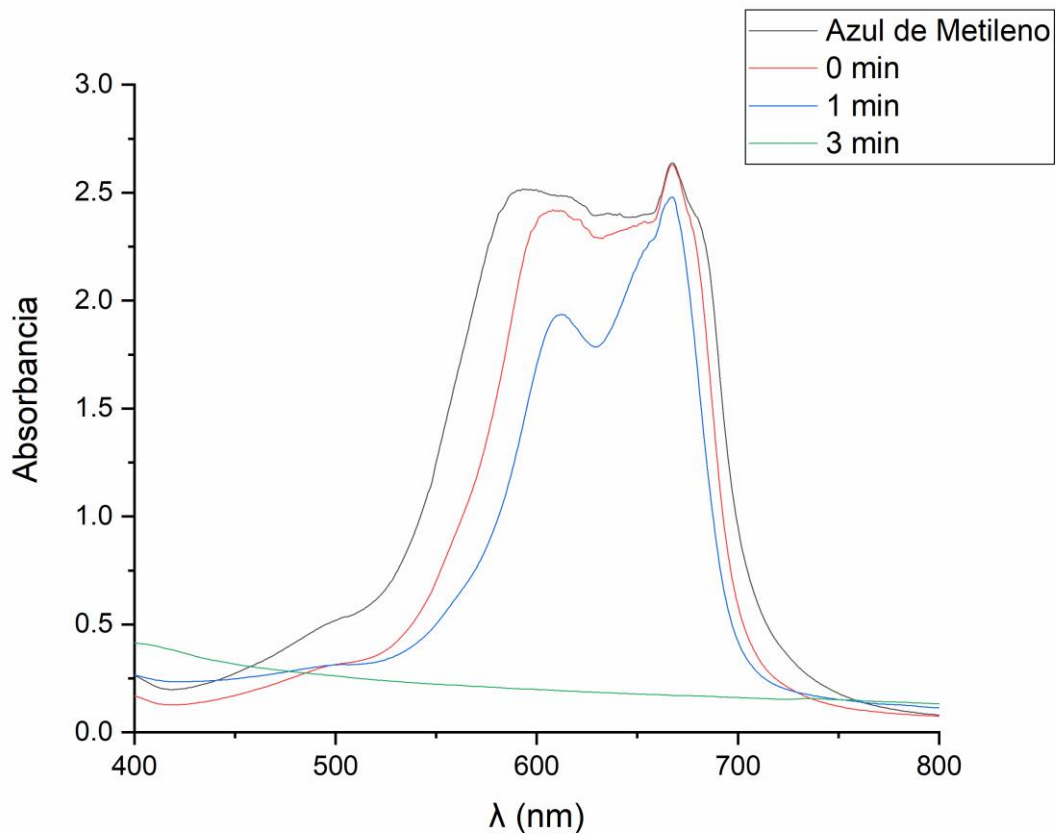


Figura 39. Espectro UV-Vis del colorante AM después de la degradación del bionanocomposito 80% Ag-20% Cu.

El análisis de los espectros UV-Vis mostró una notable disminución en la absorbancia en 608 nm a los 3 minutos tras la adición del agente reductor, indicando que el bionanocomposito estaba actuando de manera efectiva en la degradación del colorante. La reducción en la absorbancia se traduce en una eliminación

significativa del azul de metileno en un tiempo extremadamente corto con un porcentaje de degradación significativo 92.13%.

El azul de Metileno es un compuesto catiónico, que presenta una estructura con enlaces de azobenzeno y grupos funcionales que son susceptibles a la reducción. La reducción de azul de metileno utilizando borohidruro de sodio en presencia de nanopartículas bimetálicas como catalizadores. Las nanopartículas bimetálicas sirven como un proveedor adicional de electrones o mediador. Para este propósito, los iones de azul de metileno y  $\text{BH}_4^-$  se adsorben en la superficie por lo que la partícula (activada) transfiere electrones a las moléculas de azul de metileno adsorbidas para la reducción. (Stephanie Stolle et al., 2021)

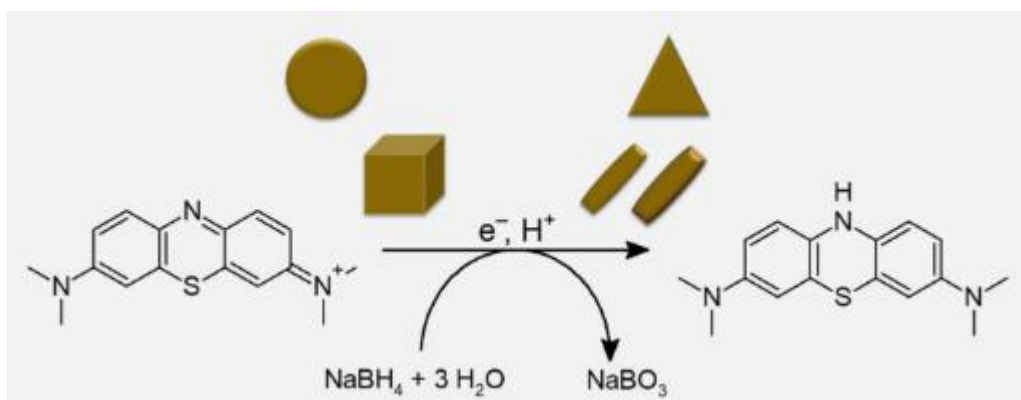


Figura 40. Esquema de reacción de la conversión de azul de metileno, por borohidruro de sodio en presencia de nanopartículas bimetálicas. (Stephanie Stolle et al., 2021)

La degradación es acelerada debido a la presencia del bionanocomposito bimetálico. Las Ag-CuNPs en el biocomposito no solo actúan como catalizadores, sino que también aumentan la superficie de reacción.



Figura 41. Muestra inicial del colorante AM, después de la degradación

#### **4.4.3 Verde Malaquita 80% Ag- 20%Cu.**

Para evaluar la degradación del colorante verde malaquita, se realizó un análisis espectroscópico utilizando un espectrofotómetro UV-Vis. Se preparó una solución de colorante a una concentración de 50 ppm, empleando borohidruro de sodio ( $\text{NaBH}_4$ ) como agente reductor. En este proceso, se utilizaron 0.2 g de nuestro biocomposito, que fue sumergido en 50 ml de la solución de colorante y mantenido en agitación constante sobre una parrilla magnética.

Antes de la adición del agente reductor, se tomó una muestra de 5 ml de la mezcla para determinar el nivel inicial de absorbancia del verde malaquita. Esta muestra fue colocada en una celda de cuarzo y analizada en el espectrofotómetro, donde se registró un pico de absorbancia a 604 nm como se puede observar en la imagen... correspondiente a la presencia del colorante.

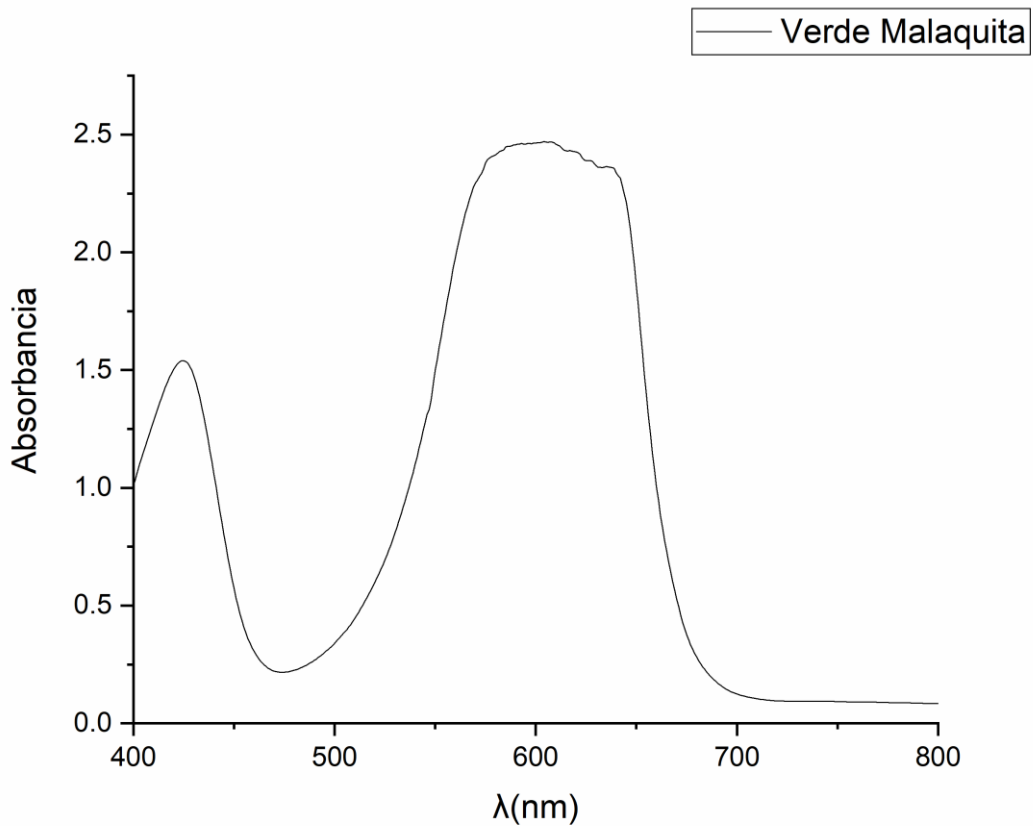


Figura 42. Espectro UV-Vis del colorante VM con una concentración de 50 ppm

Una vez establecido el punto de referencia, se añadieron 2 ml de la solución de borohidruro de sodio recién preparada a la mezcla, dando inicio al proceso de degradación. Para monitorear la reacción, se realizaron observaciones continuas, y se registró que la absorbancia disminuyó notablemente en tan solo 10 segundos.

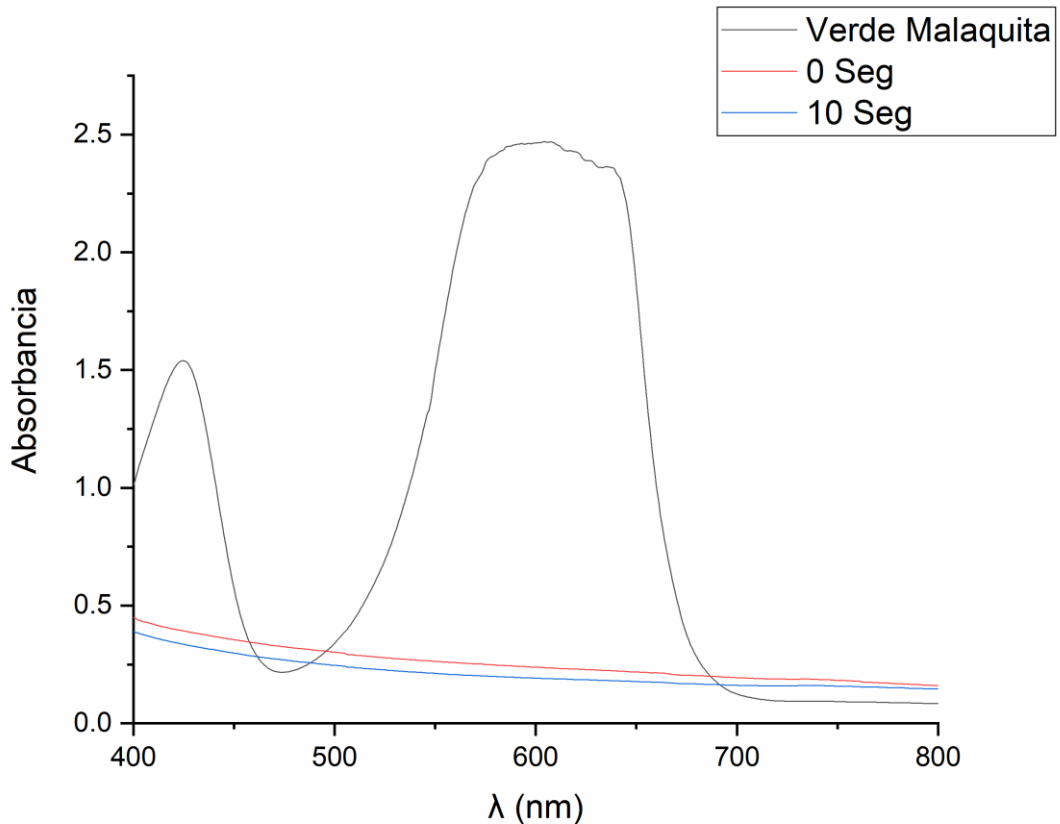


Figura 43. Espectro UV-Vis del colorante VM después de la degradación del bionanocomposito 80% Ag-20% Cu.

El análisis de los espectros UV-Vis mostró una reducción casi instantánea en la absorbancia en 604 nm tras la adición del agente reductor. Indica que el verde malaquita se degrada de manera extremadamente rápida, lo que sugiere que el borohidruro de sodio juega un papel predominante en el proceso con un porcentaje de degradación significativo 92.29%.

Las nanopartículas se utilizaron como catalizador para reducir el enlace azo en las moléculas de tinte en presencia de  $\text{NaBH}_4$ . El catalizador acepta electrones de los iones  $\text{BH}_4^-$  y los transfiere a colorantes electrofílicos, iniciando así la reducción catalítica. El donante es  $\text{BH}_4^-$  y el aceptor es la molécula de colorante. Los

electrones de las moléculas de colorante se transfieren luego al catalizador. (Kolya & Kang, 2022)

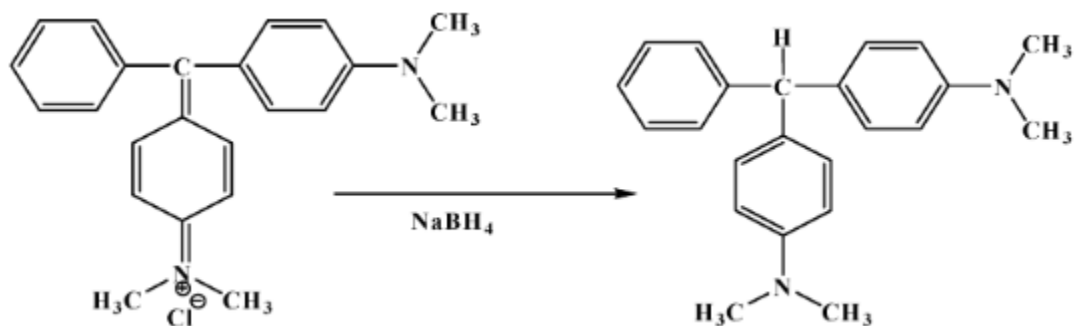


Figura 44. Mecanismo de reacción de reducción de enlaces azo utilizando nanopartículas y NaBH<sub>4</sub>. (Kolya & Kang, 2022)

El verde malaquita se degradó casi de inmediato este al entrar en contacto con el agente reductor. Esto sugiere que la reacción de reducción es tan eficiente que puede llevar a la eliminación del colorante en un tiempo sumamente corto.

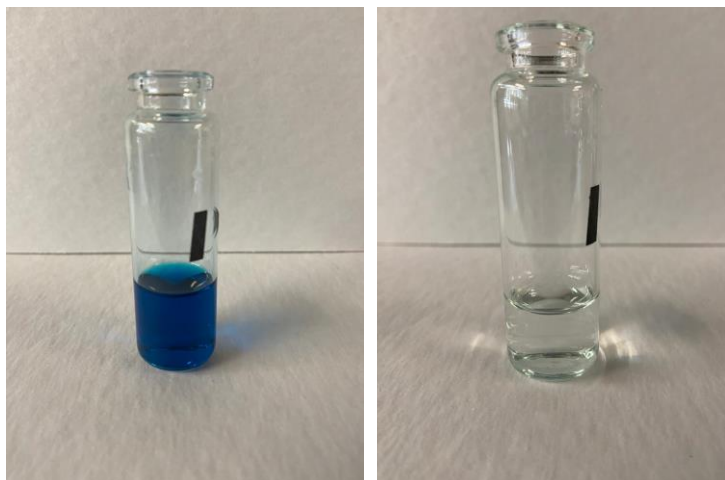


Figura 45. Muestra inicial del colorante VM, después de la degradación

#### 4.4.4 Rojo Congo empleando un Bionanocomposito 50% Ag - 50% Cu

En este mismo experimento ahora se evaluará la eficacia de degradación del colorante rojo congo, empleando un bionanocomposito con una composición de 50% plata y 50% cobre. Se preparó una solución de colorante a una concentración de 50 ppm y se sometió al mismo procedimiento experimental previamente descrito, con el agente reductor borohidruro de sodio ( $\text{NaBH}_4$ ).

Antes de la adición del agente reductor, se tomó una muestra de 5 ml de la mezcla para registrar el nivel inicial de absorbancia del rojo congo. Esta muestra fue analizada en el espectrofotómetro UV-Vis, donde se observó un pico de absorbancia a 495 nm, correspondiente a la presencia del colorante.

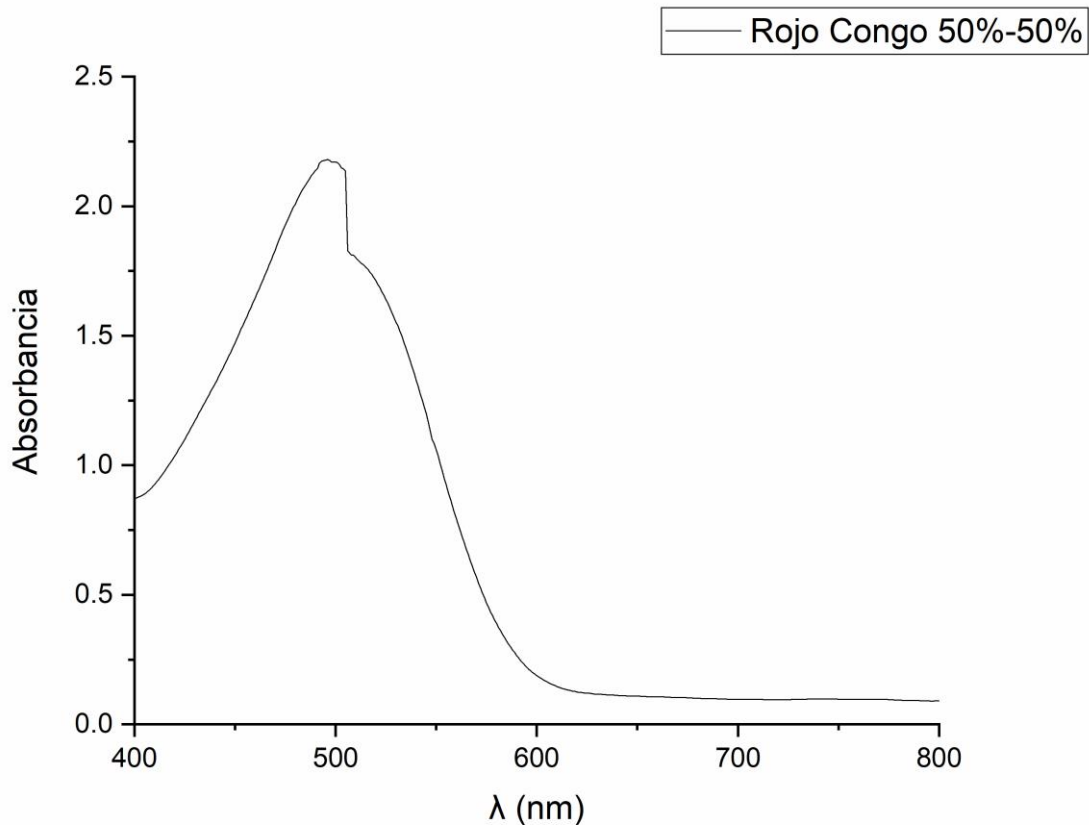


Figura 46. Espectro UV-Vis del colorante RC con una concentración de 50 ppm.

Una vez establecido el punto de referencia, se añadieron 2 ml de la solución de borohidruro de sodio recién preparada, iniciando así el proceso de degradación. Las mediciones de absorbancia se realizaron en intervalos regulares, y se registró que el colorante se degradó en un tiempo total de 9 minutos que realmente desde el minuto 6 se logra tener una degradación significativa.

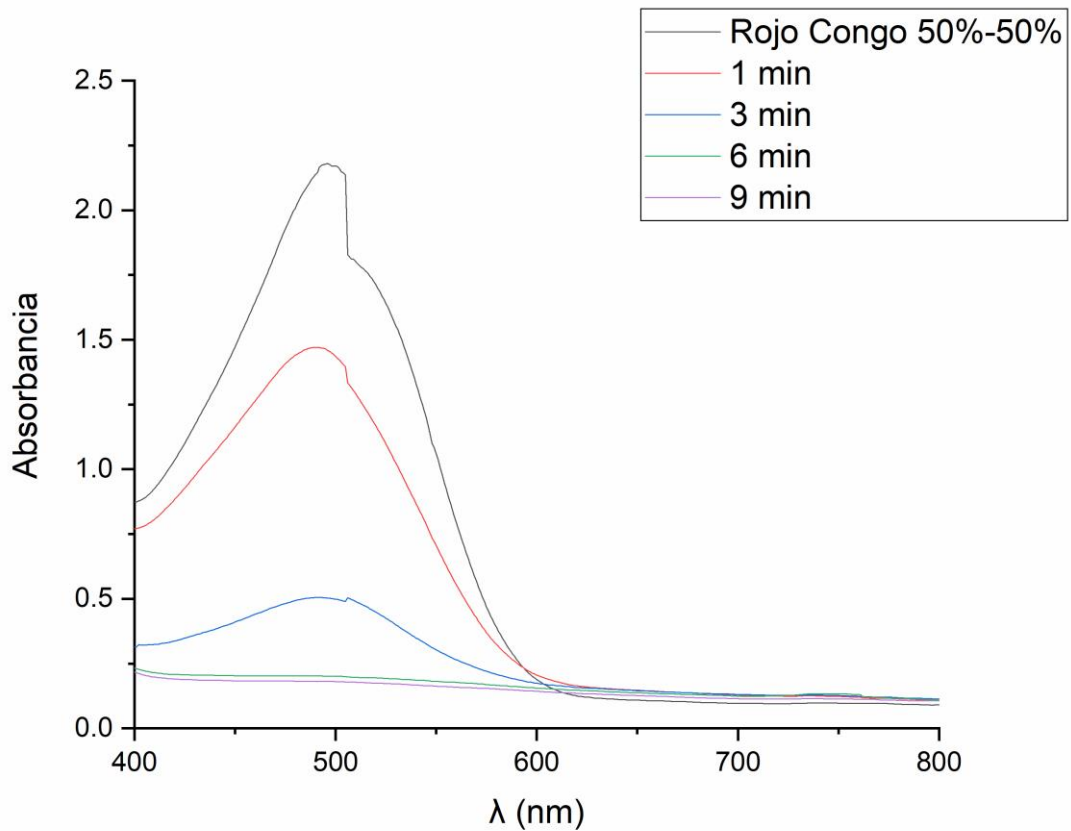


Figura 47. Espectro UV-Vis del colorante RC después de la degradación del bionanocomposito 50% Ag-50% Cu.

El análisis de los espectros UV-Vis mostró una reducción significativa en la absorbancia a 495 nm, indicando una eficiente eliminación del rojo congo en comparación con el bionanocomposito de 80% plata y 20% cobre, que requería 15 minutos para alcanzar una degradación similar. Este suceso muestra un hallazgo

relevante, ya que sugiere que la combinación de nanopartículas en una proporción igual de plata y cobre optimiza la capacidad de degradación del colorante con un porcentaje de degradación significativo 91.69%.

La disminución en el tiempo de degradación del rojo congo al utilizar el bionanocomposito de 50% plata y 50% cobre puede explicarse por varios factores. La presencia de nanopartículas en proporciones iguales podría resultar en una mayor actividad catalítica.

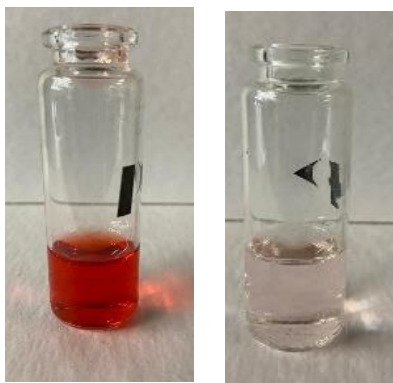


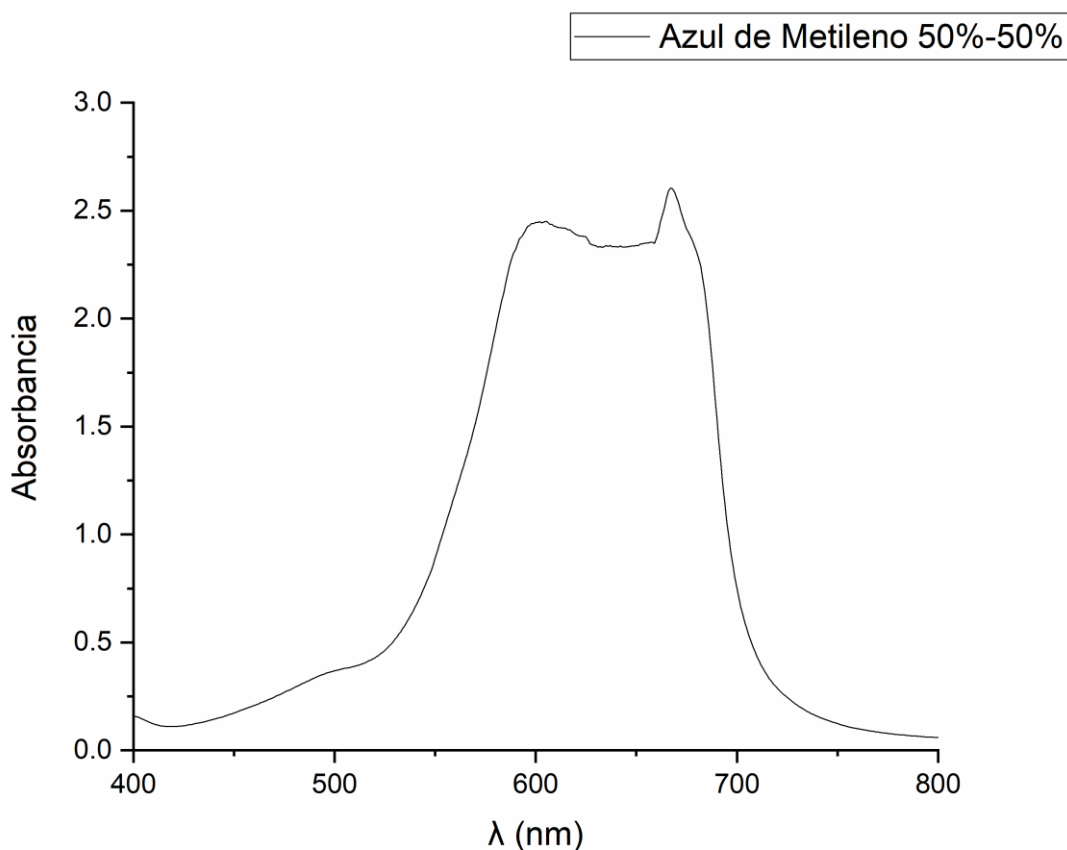
Figura 48. Muestra inicial del colorante RC 50% Ag-50 %Cu, después de la degradación.

Este efecto podría contribuir a la reducción más rápida del rojo congo en comparación con la formulación de 80% plata y 20% cobre, lo cual es significativamente importante.

#### 4.4.5 Azul de Metileno 50% Ag - 50% Cu.

Para evaluar la eficacia de degradación del colorante azul de metileno, se empleó un bionanocomposito de 50% plata y 50% cobre. Se preparó una solución de colorante a una concentración de 50 ppm, y se siguió el procedimiento experimental previamente mencionado, utilizando ( $\text{NaBH}_4$ ) como agente reductor.

Antes de la adición del agente reductor, se tomó una muestra de 5 ml de la mezcla para registrar el nivel inicial de absorbancia del azul de metileno. Esta muestra fue analizada en el espectrofotómetro UV-Vis, donde se observó un pico de absorbancia a 605 nm, correspondiente a la presencia del colorante.



Espectro UV-Vis del colorante AM con una concentración de 50 ppm

Una vez registrado el punto de referencia, se añadieron 2 ml de la solución de borohidruro de sodio, dando inicio al proceso de degradación. Las mediciones de

absorbancia se realizaron de manera continua, y se registró que el colorante se degradó en un tiempo total de 10 segundos.

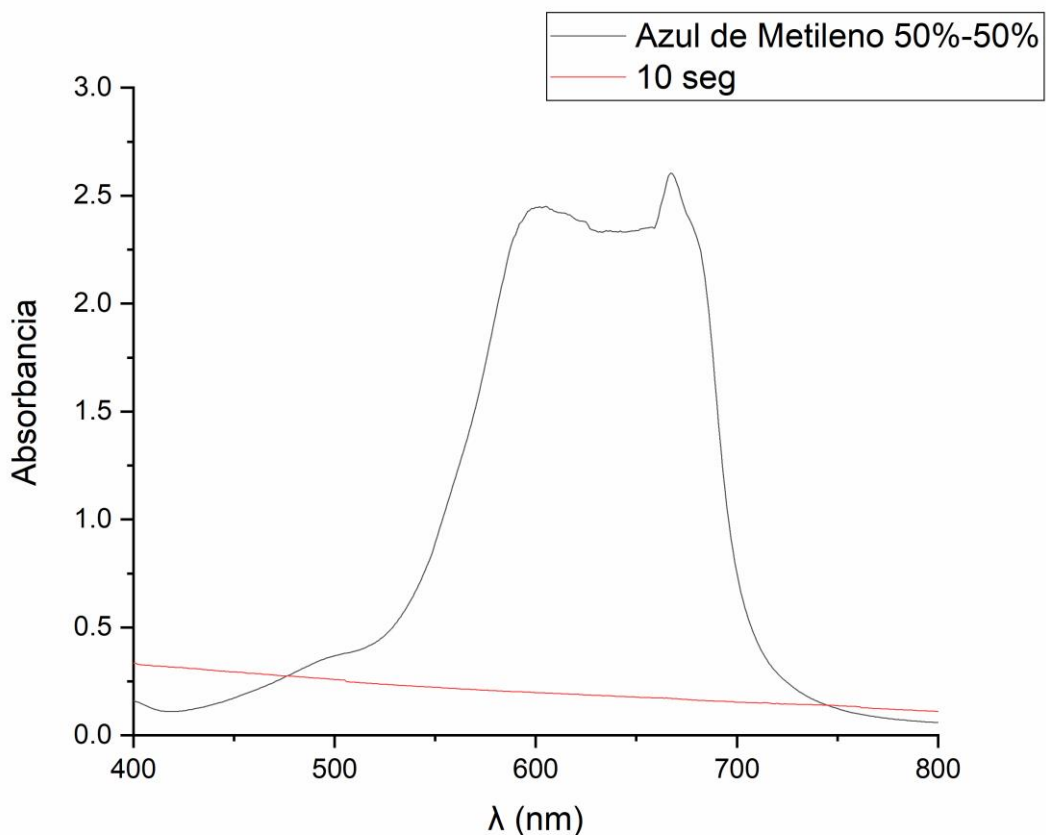


Figura 49. Espectro UV-Vis del colorante AM después de la degradación del bionanocomposito 50% Ag-50% Cu.

El análisis de los espectros UV-Vis mostró una disminución casi instantánea en la absorbancia a 605 nm tras la adición del agente reductor. Este resultado resalta la capacidad efectiva del bionanocomposito de 50% plata y 50% cobre para catalizar la degradación del azul de metileno en un tiempo extremadamente corto, similar a la rápida reacción observada con el verde malaquita con un porcentaje de degradación significativo 92%.

La rápida degradación del azul de metileno puede atribuirse a la alta reactividad del agente reductor, combinado con la sinergia de las nanopartículas de plata y cobre.

Al igual que el verde malaquita, el azul de metileno, siendo un compuesto catiónico, es susceptible a la reducción. La introducción del borohidruro de sodio proporciona electrones que rompen los enlaces que mantienen la estructura del colorante, facilitando su degradación.



Figura 50. Muestra inicial del colorante AM 50% Ag-50 %Cu, después de la degradación.

#### **4.4.6 Verde Malaquita 50% Ag - 50% Cu.**

Para evaluar la efectividad en la degradación del colorante verde malaquita, se utilizó un bionanocomposito compuesto por 50% plata y 50% cobre. Se preparó una solución de colorante a una concentración de 50 ppm y se aplicó el mismo procedimiento experimental, utilizando ( $\text{NaBH}_4$ ) como agente reductor.

Antes de añadir el agente reductor, se tomó una muestra de 5 ml de la mezcla para registrar el nivel inicial de absorbancia del verde malaquita. Esta muestra fue analizada en el espectrofotómetro UV-Vis, donde se observó un pico de absorbancia a 602 nm, correspondiente a la presencia del colorante.

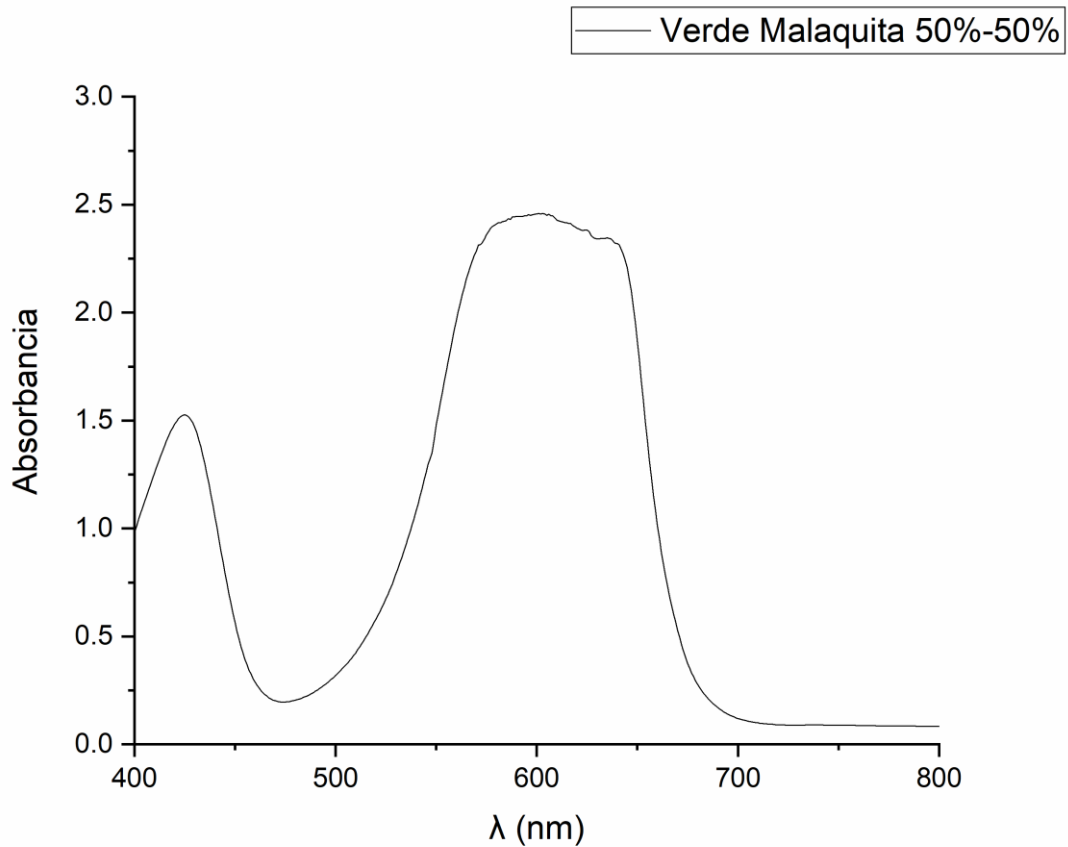


Figura 51. Espectro UV-Vis del colorante VM con una concentración de 50 ppm

Tras establecer el punto de referencia, se añadieron 2 ml de la solución de borohidruro de sodio, iniciando el proceso de degradación. Las mediciones de absorbancia se realizaron de forma continua, y se registró que el colorante se degradó en un tiempo total de 10 segundos, similar al observado con el bionanocomposito de 80% plata y 20% cobre.

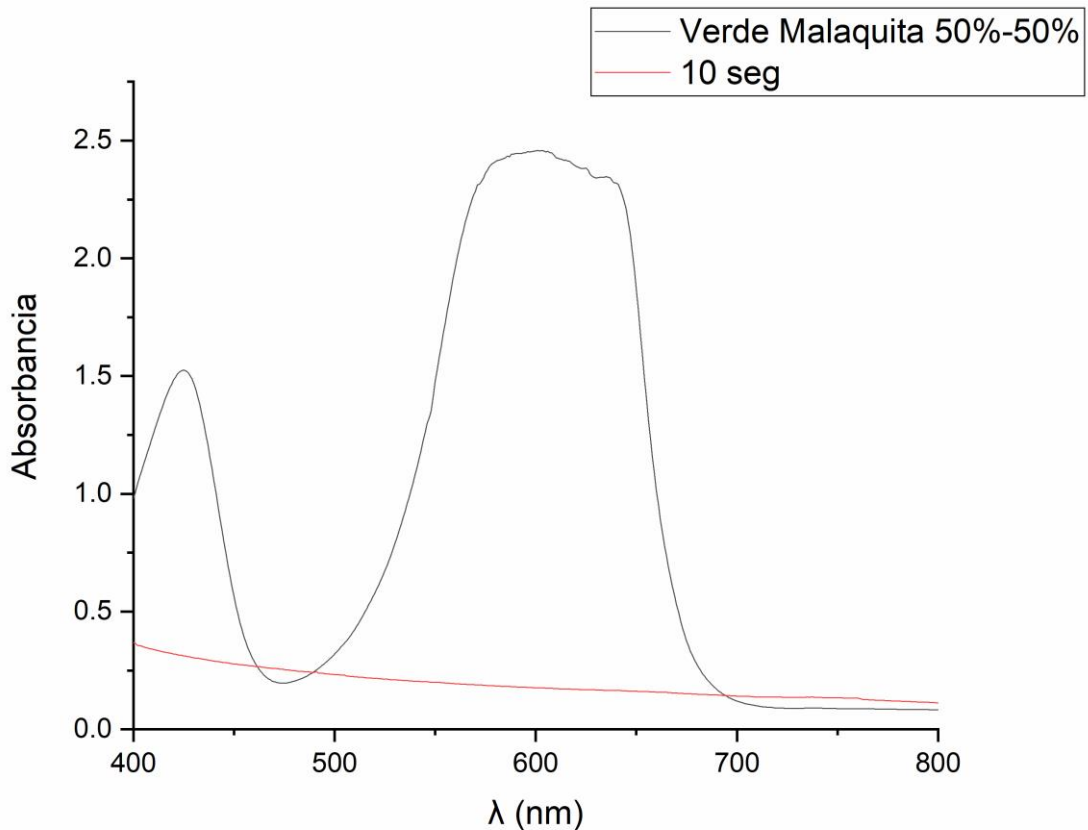


Figura 52. Espectro UV-Vis del colorante VM después de la degradación del bionanocomposito 50% Ag-50% Cu.

Los resultados obtenidos muestran que la degradación del verde malaquita ocurre de manera casi instantánea tras la adición del agente reductor, evidenciada por la disminución rápida de la absorbancia a 602 nm. Esta eficacia en la eliminación del colorante resalta el potencial de ambos bionanocompositos en catalizar la reacción de degradación con un porcentaje de degradación significativo 92.69%.

Además, la presencia de nanopartículas en proporciones iguales de plata y cobre permite una interacción más efectiva entre el colorante y las especies reactivas generadas. Aunque ambos bionanocompositos (80% plata - 20% cobre y 50% plata - 50% cobre) lograron degradar el verde malaquita en el mismo tiempo.



Figura 53. Muestra inicial del colorante VM 50% Ag-50 %Cu, después de la degradación.

## Capítulo V. Conclusiones

La investigación sobre la obtención y evaluación de un bionanocomposito de fibras de Agave lechuguilla y nanopartículas bimetálicas Plata-Cobre (Ag-Cu) ha proporcionado resultados prometedores en la degradación de colorantes sintéticos. Puesto que se logró sintetizar con éxito un bionanocomposito a través de ablación láser. Esta metodología demuestra ser muy eficiente, y también es accesible y económica.

Uno de los hallazgos más destacados es la capacidad del bionanocomposito para remover hasta un 90% de colorantes como Rojo Congo (RC), Azul de Metileno (AM) y Verde Malaquita (VM) en tiempos de reacción significativamente cortos. Este rendimiento se optimiza con una mayor presencia de cobre en la formulación, indicando que la composición del bionanocomposito juega un papel crucial en su actividad catalítica. Esta relación sugiere que el ajuste en la proporción de nanopartículas bimetálicas podría mejorar aún más la eficacia en la remoción de contaminantes.

La caracterización del bionanocomposito a través de microscopía electrónica de barrido (SEM) evidenció la correcta impregnación y distribución de las nanopartículas en las fibras de lechuguilla.

Los resultados obtenidos tienen importantes implicaciones prácticas. La utilización de un bionanocomposito bimetálico Plata-Cobre ofrece una alternativa sostenible y económica frente a métodos de tratamiento de aguas residuales más convencionales, que suelen ser costosos y potencialmente perjudiciales para el medio ambiente.

En conclusión, la investigación ha demostrado que las fibras de lechuguilla combinadas con nanopartículas bimetálicas no solo son un enfoque innovador para la remoción de colorantes, sino que también representan una solución ambientalmente responsable que podría ser clave en la lucha contra la contaminación del agua.

## Referencias Bibliográficas

- Affat, S. S. (2021). Classifications, Advantages, Disadvantages, Toxicity Effects of Natural and Synthetic Dyes: A review. *University of Thi-Qar Journal of Science*, 1(8), 130–135. <https://doi.org/10.32792/utq/utjsci/v8/1/21>
- Aguilar-Tapia, A., & Zanella, R. (2018). Las nanopartículas bimetálicas y algunas de sus aplicaciones. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 10(19), 72–92. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2017.19.61783>
- Ahmad, M. A., & Alrozi, R. (2011). Removal of malachite green dye from aqueous solution using rambutan peel-based activated carbon: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Chemical Engineering Journal*, 171(2), 510–516. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2011.04.018>
- Alamrani, N. A., & Al-Aoh, H. A. (2021). Elimination of Congo Red Dye from Industrial Wastewater Using *Teucrium polium* L. as a Low-Cost Local Adsorbent. <https://doi.org/10.1155/2021/5728696>, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/5728696>
- Aravind, M., Amalanathan, M., & Mary, M. S. M. (2021). Synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles by chemical and green synthesis methods and their multifaceted properties. *SN Applied Sciences*, 3(4), 1–10. <https://doi.org/10.1007/S42452-021-04281-5/FIGURES/7>
- Arora, N., Thangavelu, K., & Karanikolos, G. N. (2020). Bimetallic Nanoparticles for Antimicrobial Applications. *Frontiers in Chemistry*, 8, 512519. <https://doi.org/10.3389/FCHEM.2020.00412/BIBTEX>
- Aswathy, B., Avadhani, G. S., Sumithra, I. S., Suji, S., & Sony, G. (2011). Microwave assisted synthesis and UV–Vis spectroscopic studies of silver nanoparticles synthesized using vanillin as a reducing agent. *Journal of Molecular Liquids*, 159(2), 165–169. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2011.01.001>
- Aye, H. L., Choopun, S., & Chairuangstri, T. (2010). Preparation of Nanoparticles by Laser Ablation on Copper Target in Distilled Water. *Advanced Materials Research*, 93–94, 83–86. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.93-94.83>
- Baer, D. R., Amonette, J. E., Engelhard, M. H., Gaspar, D. J., Karakoti, A. S., Kuchibhatla, S., Nachimuthu, P., Nurmi, J. T., Qiang, Y., Sarathy, V., Seal, S., Sharma, A., Tratnyek, P. G., & Wang, C. M. (2008). Characterization challenges for nanomaterials. *Surface and Interface Analysis*, 40(3–4), 529–537. <https://doi.org/10.1002/SIA.2726>
- Baño Morales, D. A. (2017). Síntesis de partículas nanométricas y submicrométricas de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) para la formación de películas nanoestructuradas. *Master's thesis Quito 2017*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17593>
- Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., & Pinto, G. (2018). Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands. *Coatings 2018, Vol. 8, Page 402*, 8(11), 402. <https://doi.org/10.3390/COATINGS8110402>

- Berajano, G. (2000). Proyecto de investigación aplicada: recubrimiento duro de las herramientas de producción en serie mediante la Deposición Física de Vapor" PVD". *scholar.archive.org*, 61, 15–16.  
[https://scholar.archive.org/work/26mgaaisizgj7l2uf3ob5hx5y4/access/wayback/http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf\\_tec/article/download/994/1080](https://scholar.archive.org/work/26mgaaisizgj7l2uf3ob5hx5y4/access/wayback/http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/download/994/1080)
- Biswas, P., & Wu, & C.-Y. (2005). Nanoparticles and the Environment. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55(6), 708–746.  
<https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464656>
- Bolaños Valencia, V. E. (2006). *Diseño de un molino de bolas de baja energía*. Universidad Autónoma de Occidente. <http://hdl.handle.net/10614/6196>
- Castillo Quiroz, D., Trinidad, J., Reyes, S., Velasco, M. N., Antonio, J., & Ramos, V. (2013). Propiedades Físico-Mecánicas de la Fibra de Agave lechuguilla Torr. de cinco procedencias bajo plantaciones. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(19), 78–91.
- Ealias, A. M., & Saravanakumar, M. P. (2017). A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263(3), 032019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032019>
- Echeverria, L. A. O. M. R. L. C. J. (2008). Obtención y caracterización de nanopartículas coloidales empleando métodos ópticos. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Basicas*, 6(1), 1–9.  
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90312176006>
- Elaboración propia*. (2024).
- García-Barrasa, J., López-De-luzuriaga, J. M., & Monge, M. (2010). Silver nanoparticles: synthesis through chemical methods in solution and biomedical applications. *Central European Journal of Chemistry* 2011 9:1, 9(1), 7–19. <https://doi.org/10.2478/S11532-010-0124-X>
- Harja, M., Buema, G., & Bucur, D. (2022). Recent advances in removal of Congo Red dye by adsorption using an industrial waste. *Scientific Reports* 2022 12:1, 12(1), 1–18.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-10093-3>
- Hasan, S. (2015). A Review on Nanoparticles: Their Synthesis and Types. *Research Journal of Recent Sciences*, 4, 1–3. [www.isca.me](http://www.isca.me)
- HERNÁNDEZ ZAMORA, M. A. (2014). "Estudio de la biorremoción de rojo Congo por *Chlorella vulgaris*". 25–26.
- Huston, M., Debella, M., Dibella, M., & Gupta, A. (2021). Green Synthesis of Nanomaterials. *Nanomaterials* 2021, Vol. 11, Page 2130, 11(8), 2130.  
<https://doi.org/10.3390/NANO11082130>
- Inkson, B. J. (2016). Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*, 17–43. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00002-X>

- Iravani, S., & Zolfaghari, B. (2013). Green synthesis of silver nanoparticles using *Pinus eldarica* bark extract. *BioMed Research International*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/639725>
- Jiang, Z., Li, L., Huang, H., He, W., & Ming, W. (2022). Progress in Laser Ablation and Biological Synthesis Processes: “Top-Down” and “Bottom-Up” Approaches for the Green Synthesis of Au/Ag Nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences* 2022, Vol. 23, Page 14658, 23(23), 14658. <https://doi.org/10.3390/IJMS232314658>
- Joseph, B., Krishnan, S., Sagarika, V. K., Tharayil, A., Kalarikkal, N., & Thomas, S. (2020). Bionanocomposites as industrial materials, current and future perspectives: a review. *Emergent Materials*, 3(5), 711–725. <https://doi.org/10.1007/S42247-020-00133-X/METRICS>
- Kolya, H., & Kang, C. W. (2022). Biogenic Synthesis of Silver-Iron Oxide Nanoparticles Using Kulekhara Leaves Extract for Removing Crystal Violet and Malachite Green Dyes from Water. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 15800, 14(23), 15800. <https://doi.org/10.3390/SU142315800>
- L.C. Passos, M., & M.F.S. Saraiva, M. L. (2019). Detection in UV-visible spectrophotometry: Detectors, detection systems, and detection strategies. *Measurement*, 135, 896–904. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2018.12.045>
- Mares Briones, F.-E. M. R. (2021). *Las plantas: una alternativa eco-amigable para la obtención de nanomateriales*. La lupa. <https://lalupa.mx/2022/10/02/las-plantas-una-alternativa-eco-amigable-para-la-obtencion-de-nanomateriales-fabian-mares-briones-y-rodrigo-esparza-munoz/>
- Mendoza, G., & Luis Rodríguez-López, J. (2007). La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso. *Perfiles Latinoamericanos*, 14(29), 161–186.
- Mersmann, A., Angerhöfer, M., & Franke, J. (1994). Controlled precipitation. *Chemical Engineering & Technology*, 17(1), 1–9. <https://doi.org/10.1002/CEAT.270170102>
- Mohammed, A., & Abdullah, A. (2018). SCANNING ELECTRON MICROSCOPY (SEM): A REVIEW. *Proceedings of the 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics—HERVEX*, 7–9.
- Moreno, A., Figueroa, D., & Hormaza, A. (2012). Adsorción de azul de metileno sobre cascarilla de arroz. *Producción + Limpia*, 7(1), 9–18. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-04552012000100002&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552012000100002&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Moura, C. G., Pereira, R. S. F., Andritschky, M., Lopes, A. L. B., Grilo, J. P. de F., Nascimento, R. M. do, & Silva, F. S. (2017). Effects of laser fluence and liquid media on preparation of small Ag nanoparticles by laser ablation in liquid. *Optics & Laser Technology*, 97, 20–28. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2017.06.007>
- Nanociencias-N. Y. & GENER, C. (2009). *La nanotecnología Innovaciones para el mundo del mañana*. [http://europa.eu.int/comm/research/rtdinfo/index\\_en.html](http://europa.eu.int/comm/research/rtdinfo/index_en.html)

- Naseem, K., Farooqi, Z. H., Begum, R., & Irfan, A. (2018). Removal of Congo red dye from aqueous medium by its catalytic reduction using sodium borohydride in the presence of various inorganic nano-catalysts: A review. *Journal of Cleaner Production*, *187*, 296–307. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.209>
- Nevárez-Martínez, M. C., Espinoza-Montero, P. J., Quiroz-Chávez, F. J., & Ohtani, B. (2017). Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO<sub>2</sub>. *Avances en Química*, *12*(3), 45–59. [www.saber.ula.ve/avancesenquimica](http://www.saber.ula.ve/avancesenquimica)
- Oladoye, P. O., Ajiboye, T. O., Omotola, E. O., & Oyewola, O. J. (2022). Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. *Results in Engineering*, *16*, 100678. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2022.100678>
- Parveen, K., Banse, V., & Ledwani, L. (2016). Green synthesis of nanoparticles: Their advantages and disadvantages. *AIP Conference Proceedings*, *1724*(1). <https://doi.org/10.1063/1.4945168/580977>
- Patil, N., Bhaskar, R., Vyavhare, V., Dhadge, R., Khaire, V., & Patil, Y. (2021). OVERVIEW ON METHODS OF SYNTHESIS OF NANOPARTICLES. *International Journal of Current Pharmaceutical Research*, *13*(2), 11–16. <https://doi.org/10.22159/ijcpr.2021v13i2.41556>
- Petrović, S., Salatić, B., Milovanović, D., Lazović, V., Živković, L., Trtica, M., & Jelenković, B. (2015). Agglomeration in core-shell structure of CuAg nanoparticles synthesized by the laser ablation of Cu target in aqueous solutions. *Journal of Optics*, *17*(2), 025402. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/17/2/025402>
- Pliago Osorio, Y., Valdez Medina, U., Cruz Galeana, A. B., & Oyoqui Arellano, A. (s/f). *Construcción y uso de un sistema PECVD para el crecimiento y posterior caracterización de películas de Si nanoestructurado*.
- Ponce, L., Fernández-Guasti, M., Jiménez, E., & Haro-Poniatowski, E. (1993). Obtención de capas delgadas por ablación láser. *Revista Mexicana de Física*, *40*(5), 798–804. <https://rmf.smf.mx/ojs/index.php/rmf/article/view/2442>
- Quintili, M. (2012). Nanociencia y Nanotecnología... un mundo pequeño. *Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación. Ensayos*, *42*, 125–155.
- Rivera Esteban, J. M., & Mejía Uriarte, E. V. (2016). Reconfiguración de nanopartículas de plata obtenidas por ablación láser en líquido. *Universidad Continental*. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/3030>
- Rocha, F. S., Gomes, A. J., Lunardi, C. N., Kaliaguine, S., & Patience, G. S. (2018). Experimental methods in chemical engineering: Ultraviolet visible spectroscopy—UV-Vis. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, *96*(12), 2512–2517. <https://doi.org/10.1002/CJCE.23344>
- Rojas Cervantes, M. L. (2012). *Diseño y síntesis de materiales "A medida" mediante el método SOL-GEL*. Editorial UNED. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=F-OkjCUfe0MC&oi=fnd&pg=PP1&dq=m%C3%A9todo+sol+gel&ots=U3i6o7CXL5&sig=2-YxsDElitw-PqB0xe8yFoZEPE#v=onepage&q=m%C3%A9todo%20sol%20gel&f=false>

- Ruiz-Hitzky, E., Aranda, P., & Darder, M. (2008). Bionanocomposites. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 1–28. <https://doi.org/10.1002/0471238961.BIONRUIZ.A01>
- Saleh, T. A. (2020). Nanomaterials: Classification, properties, and environmental toxicities. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101067. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2020.101067>
- Siqueira, G., Bras, J., & Dufresne, A. (2010). Cellulosic Bionanocomposites: A Review of Preparation, Properties and Applications. *Polymers 2010*, Vol. 2, Pages 728-765, 2(4), 728–765. <https://doi.org/10.3390/POLYM2040728>
- Stephanie Stolle, H. L. K., Kluitmann, J. J., Csáki, A., Köhler, J. M., & Fritzsche, W. (2021). Shape-dependent catalytic activity of gold and bimetallic nanoparticles in the reduction of methylene blue by sodium borohydride. *Catalysts*, 11(12), 1442. <https://doi.org/10.3390/CATAL11121442/S1>
- Tewari, K., Singhal, G., & Arya, R. K. (2018). Adsorption removal of malachite green dye from aqueous solution. *Reviews in Chemical Engineering*, 34(3), 427–453. [https://doi.org/10.1515/REVCE-2016-0041/ASSET/GRAPHIC/J\\_REVCE-2016-0041\\_CV\\_003.JPG](https://doi.org/10.1515/REVCE-2016-0041/ASSET/GRAPHIC/J_REVCE-2016-0041_CV_003.JPG)
- Thoe, T. B., Aspinwall, D. K., & Wise, M. L. H. (1998). Review on ultrasonic machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(4), 239–255. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00036-9)
- Trotta, Francesco., & Mele, Andrea. (2019). *Nanosponges : Synthesis and Applications*. <https://books.google.com/books/about/Nanosponges.html?hl=es&id=gnWFDwAAQBAJ>
- Tzeng Lue, J. (2007). Physical Properties of Nanomaterials. *Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology*, 10(1), 1–46.
- Vásquez More, A. (2018). *Investigacion documental-mecanizado-por-ultrasonido | PPT*. <https://es.slideshare.net/slideshow/investigacion-documentalmecanizadoporultrasonido/112180794#2>
- Velarde Granados, E., & Olea Mejia, O. F. (2013). *Obtención y caracterización de nanopartículas de bismuto y oxido de bismuto por ablación laser en medio líquido*.
- V.S, D., Antony Sandra, & Ann Joseph, J. (2019). *SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF METALLIC COPPER AND BIMETALLIC COPPER-SILVER NANOPARTICLES BY CHEMICAL REDUCTION METHOD*.
- Wang, M., Wang, X., Moni, P., Liu, A., Kim, D. H., Jo, W. J., Sojoudi, H., & Gleason, K. K. (2017). CVD Polymers for Devices and Device Fabrication. *Advanced Materials*, 29(11), 1604606. <https://doi.org/10.1002/ADMA.201604606>