

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



TESIS

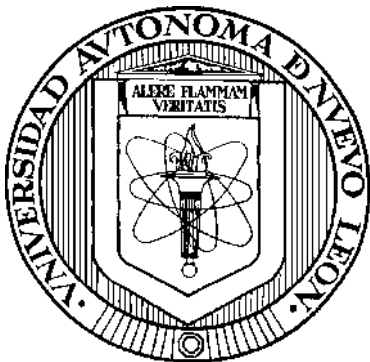
**“FUNCIONALIZACIÓN SUPERFICIAL DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS
CON BIOMOLÉCULAS PARA LA DETECCIÓN COLORIMÉTRICA DE
CONTAMINANTES”**

QUE PRESENTA
M.C. MARIDELY OVIEDO MEDRANO

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTORADO EN CIENCIAS CON
ORIENTACIÓN EN QUÍMICA DE LOS MATERIALES**

AGOSTO 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



**FUNCIONALIZACIÓN SUPERFICIAL DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS
CON BIOMOLÉCULAS PARA LA DETECCIÓN COLORIMÉTRICA DE
CONTAMINANTES**

Por:

M.C. MARIDELY OVIEDO MEDRANO

**Como requisito para obtener el Grado de Doctorado en Ciencias con
Orientación en Química de los Materiales**

Dr. Alejandro Vázquez Dimas
(Director)

Dr. Israel Alejandro López Hernández
(Co-Director)

Agosto, 2026

FUNCIONALIZACIÓN SUPERFICIAL DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS CON BIOMOLÉCULAS PARA LA DETECCIÓN COLORIMÉTRICA DE CONTAMINANTES

Aprobación de la tesis:

DR. ALEJANDRO VÁZQUEZ DIMAS

Presidente

DRA. NORA ALEYDA GARCIA GÓMEZ

Secretario

DR. BORIS ILDUSOVICH KHARISOV

Vocal

DR. CARLOS EDUARDO PUENTE DE LEÓN

Vocal Externo

DR. SERGIO ALBERTO OBREGÓN ALFARO

Vocal Externo

DR. JAVIER RIVERA DE LA ROSA

Sub-Director de Posgrado

FUNCIONALIZACIÓN SUPERFICIAL DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS CON BIOMOLÉCULAS PARA LA DETECCIÓN COLORIMÉTRICA DE CONTAMINANTES

Revisión de la Tesis:

DR. BORIS ILDUSOVICH KHARISSOV

Comité Tutorial

DRA. NORA ALEYDA GARCIA GÓMEZ

Comité Tutorial

DR. CARLOS EDUARDO PUENTE DE LEÓN

Comité Tutorial

DR. SERGIO ALBERTO OBREGÓN ALFARO

Comité Tutorial

DR. MIGUEL ÁNGEL RUIZ GÓMEZ

Comité Tutorial

DR. JAVIER RIVERA DE LA ROSA

Sub-Director de Posgrado

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Autónoma de Nuevo León, a la Facultad de Ciencias Químicas y al Centro de Investigación en Materiales Avanzados por facilitar el espacio y los recursos necesarios para el desarrollo de esta investigación. De igual forma, a la SECIHTI por la beca otorgada.

Al Dr. Alejandro Vázquez Dimas, por su constante apoyo, empatía y guía para la consecución de cada meta trazada en esta etapa doctoral.

A la Dra. Margarita, por su grata acogida durante la estancia académica, por su valioso apoyo y por su acertada asesoría.

A Fernanda, por compartir esta trayectoria académica desde la licenciatura hasta alcanzar juntas el grado de doctoras; me llena de orgullo todo lo que hemos logrado.

A mis amigos de siempre y a los que sumé durante este trayecto, por su valiosa compañía y apoyo constante.

A mi familia: a mi madre, Laura A. Medrano, y a mis hermanos, Astrid Oviedo y Aldrin Oviedo, por ser mi mayor impulso para no rendirme y culminar este paso.

A mi novio Guillermo, por ser un sostén incondicional y por alentarme en todo momento a finalizar este trabajo.

A mi perro Max, por brindarme la energía, compañía y motivación diaria a lo largo del doctorado.

DEDICATORIA

A mi familia, por ser mi refugio y sostén incondicional a lo largo de este viaje. A mi asesor, por su paciencia, guía y acompañamiento constante para salir adelante ante cada reto.

Tabla de contenido

1.INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 JUSTIFICACIÓN	20
2. ANTECEDENTES.....	21
2.1 ANÁLISIS CRÍTICO DE LA LITERATURA.....	23
2.2 APORTACIÓN CIENTÍFICA.....	23
2.3 HIPÓTESIS.....	23
2.4 OBJETIVOS.....	24
2.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	24
2.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
2.5. METAS	24
3. METODOLOGÍA DEL TRABAJO.....	25
3.1. MATERIALES Y EQUIPO	25
3.2. PARTE EXPERIMENTAL	25
3.3. DISPOSICIÓN DE RESIDUOS GENERADOS	37
4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1. SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA.....	38
4.2. FUNCIONALIZACIÓN CON EXTRACTO DE CÁSCARA DE NUEZ.....	39
4.3. SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE ORO.....	55
4.4. FUNCIONALIZACIÓN CON EXTRACTO DE CÁSCARA DE NUEZ.....	57
4.5. ANÁLISIS DE LAS NANOPARTÍCULAS AuNp Y N:AuNp EN PRESENCIA DE VITAMINA B1. .	58
5. CONCLUSIONES.....	62
6.REFERENCIAS.....	64

Lista de Tablas

<i>Tabla 1. Relación de las muestras preparadas con N:AgNp relación 1:1.</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 2. Relación de las muestras preparadas con N:AgNp relación 1:2.</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 3. Relación de las muestras preparadas con H₂O:AgNp relación 1:2.</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 4. Relación de las muestras preparadas con N:AgNp relación 1:2 para vitamina B1 en pH ácido y básico.</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 5. Relación de las muestras preparadas con N:AgNp relación 1:2 para vitamina B1 con interferencia de cationes.</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 6. Relación de las muestras preparadas con N:AuNp relación 1:1.</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 7. Relación de las muestras preparadas con N:AuNp relación 1:2.</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 8. Relación de las muestras preparadas con H₂O:AgNp relación 1:1.</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 9. Relación de las muestras preparadas con H₂O:AgNp relación 1:2.</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 10. Relación de las muestras preparadas con N:AuNp relación 1:1 para analitos en pH ácido y básico.</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 11. Relación de las muestras preparadas con N:AgNp relación 1:2 para analitos en pH ácido y básico.</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 12. Relación de las muestras preparadas con N:AuNp relación 1:1 para vitamina B1 y ciprofloxacino con interferencia de cationes.</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 13. Relación de las muestras preparadas con N:AuNp relación 1:2 para vitamina B1 con interferencia de cationes.</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 14. Disposición de residuos generados.</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 15. Comparación de las características analíticas de trabajos publicados anteriormente para la determinación de vitamina B1.</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 16. Comparación de las características analíticas de trabajos publicados anteriormente para la determinación de vitamina B1.</i>	<i>61</i>

Lista de figuras

Figura 1. Espectro UV-vis de nanopartículas de plata sintetizadas.	38
Figura 2. a) Imagen de microscopía electrónica de transmisión (TEM), b) microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM), c) Difracción de electrones de área seleccionada (SAED) y d) histograma de las nanopartículas de plata sintetizadas.	39
Figura 3. Espectros UV-vis del extracto acuosos de cáscara de nuez.	40
Figura 4. Espectro FT-IR del extracto acuoso de cáscara de nuez.	41
Figura 5. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata funcionalizadas con extracto acuoso de cáscara de nuez en relación 1:1, 1:2 y 2:1.	42
Figura 6. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata funcionalizadas con extracto acuoso de cáscara de nuez relación 1:1 en presencia de Cr(VI), Pb(II), vitamina B1 y melamina.	43
Figura 7. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata funcionalizadas con extracto acuoso de cáscara de nuez relación 1:2 en presencia de Cr(VI), Pb(II), Vitamina B1, Melamina, Ciprofloxacino y Glucosa.	44
Figura 8. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata funcionalizadas con extracto acuoso de cáscara de nuez relación 1:1 en presencia de Cr(VI) en concentraciones 100, 83, 67, 50, 33 y 17 μM	45
Figura 9. Espectro UV-vis de Cr(VI) en concentraciones 17, 33, 50, 67, 83 y 100 μM	45
Figura 10. Curva de calibración de las 1:1 N:AgNp en presencia de Cr(VI).	46
Figura 11. Curva de calibración de Cr(VI).	47
Figura 12. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata funcionalizadas con extracto acuoso de cáscara de nuez relación 1:2 en presencia de Cr(VI) en concentraciones 17, 33, 50, 67, 83 y 100 μM	47
Figura 13. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata en presencia de Cr(VI) en concentraciones 17, 33, 50, 67, 83 y 100 μM	48
Figura 14. Curva de calibración de las 1:2 N:AgNp en presencia de Cr(VI).	49
Figura 15. Curva de calibración de las AgNp en presencia de Cr(VI).	49
Figura 16. Prueba de linealidad para las nanopartículas de plata funcionalizadas.	50
Figura 17. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata funcionalizadas con extracto acuoso de cáscara de nuez relación 1:2 en presencia de Vitamina B1 en concentraciones 28, 56, 84, 111, 139, 167 μM	50
Figura 18. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata presencia de Vitamina B1 en concentraciones 28, 56, 84, 111, 139, 167 μM	51
Figura 19. Gráfica de relación de absorbancia con a) AgNp y b) 1:2 N:AgNp.	52
Figura 20. a) Efecto del pH y b) interferencias en el rendimiento del sensor.	53
Figura 21. Espectro UV-vis de nanopartículas de oro sintetizadas.	55
Figura 22. Imagen de microscopía electrónica de barrido modo STEM e histograma de las nanopartículas de oro.	56
Figura 23. a) Imagen de microscopía electrónica de transmisión (TEM) y b) Difracción de electrones de área seleccionada (SAED) de las nanopartículas de oro sintetizadas.	56
Figura 24. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata funcionalizadas con extracto acuoso de cáscara de nuez en relación 1:1 y 1:2.	57
Figura 25. Prueba de linealidad para las nanopartículas de oro funcionalizadas.	58
Figura 26. Espectro UV-vis de las nanopartículas de oro funcionalizadas con extracto acuoso de cáscara de nuez relación 1:1 en presencia de vitamina B1 en concentraciones de 11, 17, 22, 28, 56, 84, 111, 139, 167 μM	59
Figura 27. Espectro UV-vis de las nanopartículas de oro sin funcionalizar con relación 1:1 con agua en presencia de vitamina B1 en concentraciones 11, 17, 22, 28, 56, 84, 111, 139, 167 μM	59
Figura 29. Curva de linealidad de 1:1N:AuNp.	60

Lista de ilustraciones

<i>Ilustración 1. Contaminantes del agua potable.....</i>	<i>14</i>
---	-----------

Abreviatura

AAS	Espectrometría de Absorción Atómica
ADN	Ácido Desoxirribonucleico
AFS	Espectrometría de Fluorescencia Atómica
Ag	Plata
AgNp	Nanopartículas de Plata
ATSDR	Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades
Au	Oro
AuNp	Nanopartículas de Oro
Cr (VI)	Cromo
DHHS	Departamento de Salud y Servicios Humanos
EPA	Asociación de Protección Ambiental
FCC	Estructura Cristalina Cúbica Centrada en las Caras
FT-IR	Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier
FWHM	Anchura a Media Banda (Full Width At Half Maximum)
HPLC-DAD	Cromatografía Líquida de Alto Rendimiento Acoplada a Detección de Matriz de Diodos
HRTEM	Microscopía Electrónica de Transmisión de Alta Resolución
IARC	Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer
ICP-MS/AES	Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente/ Espectrometría de Masas
LIBS	Espectrometría de Ruptura Inducida por Láser
LOD	Límite de Detección
LSPR	Resonancia de Plasmón Superficial Localizado
N:AgNp	Nanopartículas de Plata Funcionalizadas con Extracto acuoso de Cáscara de Nuez
N:AuNp	Nanopartículas de Oro Funcionalizadas con Extracto acuoso de Cáscara de Nuez

OMS	Organización Mundial de La Salud
Pb (II)	Plomo
PVP	Polivinilpirrolidona
R ²	Coeficiente de correlación
SAED	Difracción de Electrones de Área Seleccionada
SEM	Microscopía Electrónica de Barrido
STEM	Microscopía electrónica de transmisión de barrido
TEM	Microscopía Electrónica de Transmisión
UANL	Universidad Autónoma de Nuevo León
USEPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
Vit B1	Vitamina B1

Nomenclaturas

$\mu\text{g/mL}$	microgramos/mililitros
μM	micromolar
cm^{-1}	centímetro recíproco
h	Horas
M	Molar
mg	miligramos
min	Minutos
mL	mililitros
mM	milimolar
nm	nanómetros
pH	potencial de hidrógeno
rpm	revoluciones por minuto

CAPÍTULO

1.INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental es uno de los mayores problemas globales que enfrenta la humanidad, responsable de millones de muertes prematuras. Las actividades humanas, como la industrialización, la urbanización y la minería, son grandes contribuyentes a este fenómeno. Los tipos de contaminación se dividen en función del medio en que se desarrolla, ya sea contaminación de aire, suelo o agua. En cada uno de estos medios se presentan distintos contaminantes que generan diversas problemáticas.

En la contaminación del aire se involucra la presencia de compuestos químicos tóxicos, como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y partículas finas. Estos contaminantes pueden causar graves problemas de salud y ambientales, como enfermedades respiratorias, calentamiento global y agotamiento de la capa de ozono. En el caso de la contaminación del suelo, ésta es causada por residuos industriales y domésticos, además de actividades agrícolas y mineras. Los plásticos son también un problema creciente, que afecta la vida vegetal y animal. La contaminación del agua proviene de fuentes naturales, antropogénicas e industriales, como residuos domésticos, pesticidas, desechos de la industria farmacéutica y metales pesados, que afectan la salud humana y la biodiversidad acuática(1).

En los últimos cinco años, la calidad del agua en México ha sido un tema de gran preocupación por una diversidad de factores que impactan tanto los recursos superficiales como los subterráneos. En México, 60% del agua potable proviene de los cuerpos de agua superficiales. De los principales ríos, siete representan 71% del agua superficial del país, distribuidos en la zona centro y sur del país, mientras que sólo 29% del agua superficial se ubica en la zona norte. El mayor inconveniente de las aguas superficiales es la contaminación, especialmente por las aguas residuales (sean domésticas, industriales, agrícolas o ganaderas), que generalmente son vertidas sin un tratamiento previo y que tienen elementos contaminantes disueltos(2).

La calidad del agua se refiere a las características físicas, químicas y biológicas del agua que determinan su aptitud para un uso específico, como el consumo humano, la agricultura, o la vida acuática. En México, este concepto se monitorea a través de la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua, que evalúa indicadores clave como la demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos, coliformes fecales y la presencia de contaminantes tóxicos. La vigilancia se realiza en cuerpos de agua superficiales, subterráneos y costeros, con el objetivo de asegurar que el agua cumpla con las normativas aplicables y garantizar su seguridad para los ecosistemas y la salud humana(3).

La contaminación del agua plantea un alto riesgo para la salud humana. Los contaminantes presentes en el agua alteran la espontaneidad de los mecanismos

relacionados con la vida, como la síntesis de componentes celulares y el transporte de nutrientes al interior de las células, provocando enfermedades crónicas y agudas(4).

Los contaminantes “tradicionales” del agua generalmente se clasifican en biológicos, químicos y físicos. A su vez, estos se subdividen en diversas categorías como turbidez, sedimentos, sólidos suspendidos, bacterias, virus, protozoos, algas, metales pesados, nitratos, pesticidas, productos farmacéuticos, moléculas orgánicas y sustancias alquílicas per- y polifluoradas. Entre estos, los productos farmacéuticos y algunas moléculas orgánicas pueden clasificarse como contaminantes emergentes, lo que representa un área de creciente preocupación(5).

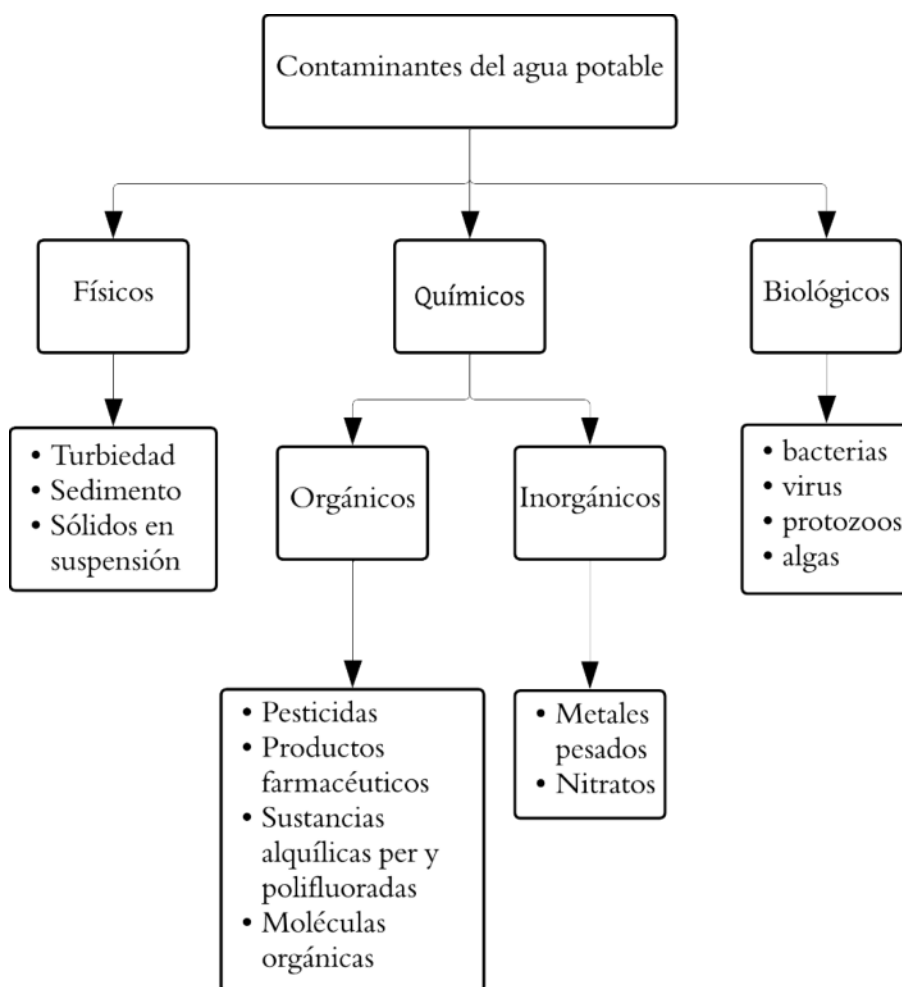


Ilustración 1. Contaminantes del agua potable

Los contaminantes emergentes son aquellos para los que actualmente no existe ninguna regulación que exija el monitoreo o la notificación pública de su presencia en nuestro suministro de agua o aguas residuales. Existen diversos contaminantes emergentes, como pesticidas, productos farmacéuticos, drogas, cosméticos, productos de cuidado personal, surfactantes, productos de limpieza, formulaciones y productos químicos

industriales, aditivos alimentarios, envases de alimentos, metaloides, elementos de tierras raras, nanomateriales, microplásticos y patógenos. Las principales fuentes de contaminantes emergentes incluyen vertidos domésticos, los efluentes hospitalarios, las aguas residuales industriales, la escorrentía procedente de la agricultura, la ganadería y la acuicultura, así como los lixiviados de los vertederos.

En particular, los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales son los principales contribuyentes a la presencia de contaminantes emergentes en las aguas. Aunque numerosos productos químicos han sido regulados recientemente como sustancias peligrosas prioritarias, las plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales y agua potable no fueron diseñadas para eliminar la mayoría de los contaminantes emergentes(6).

La presencia de fármacos en cuerpos de agua, especialmente antibióticos y vitaminas representa un riesgo significativo para la salud pública y el ecosistema, tal como se ha documentado en un gran número de investigaciones. Los antibióticos, que frecuentemente terminan en el agua debido a la eliminación inadecuada de residuos farmacéuticos o a su excreción tras el consumo humano o animal, pueden promover la selección de bacterias resistentes. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), aproximadamente el 70% de las infecciones adquiridas en hospitales son causadas por bacterias resistentes, una crisis que se ve agravada por la presencia de antibióticos en el medio ambiente. Además, las vitaminas y otros compuestos bioactivos, aunque considerados esenciales para la salud en dosis controladas, pueden generar efectos disruptivos en los ecosistemas acuáticos. Diversas investigaciones han mostrado que la exposición crónica a estos compuestos puede alterar el ciclo de nutrientes y afectar negativamente a especies clave, como los peces y anfibios, que a su vez impactan la cadena alimentaria. En virtud de lo anterior monitorear y mitigar la presencia de antibióticos y vitaminas en el agua es fundamental para proteger la salud pública y preservar los ecosistemas acuáticos(7–10).

El ciprofloxacino y la vitamina B1 (Tiamina) se utilizan ampliamente en medicina. El ciprofloxacino es un antibiótico de amplio espectro utilizado para tratar diversas infecciones bacterianas. Cuando se libera en el medio acuático, este fármaco no sólo persiste debido a su resistencia a la degradación, sino que también puede promover el desarrollo de bacterias resistentes a los medicamentos, lo que representa una grave amenaza para la salud pública. La resistencia antimicrobiana es un problema mundial que, según la OMS, podría causar hasta 10 millones de muertes anuales para 2050 si no se toman medidas preventivas(11).

La U.S. Food and Drug Administration (FDA) advierte sobre los riesgos para la salud asociados con la exposición al ciprofloxacino. Entre estos se encuentra el riesgo de aneurisma y disección aórtica relacionado con el uso de fluoroquinolonas. Asimismo, estos medicamentos se han asociado con efectos secundarios incapacitantes y potencialmente permanentes que afectan a los tendones, músculos, articulaciones,

nervios y al sistema nervioso central, los cuales pueden presentarse de manera simultánea en un mismo paciente(12).

En el caso de las vitaminas, la presencia de estas en los depósitos de agua, aunque a menudo se subestima, es un tema de notable importancia debido a su impacto negativo en los ecosistemas acuáticos y la salud humana. Las vitaminas, aunque son esenciales para el metabolismo en concentraciones adecuadas, su acumulación puede provocar efectos adversos. Por ejemplo, los estudios han demostrado que altas concentraciones de vitaminas como B12 y C pueden estimular el crecimiento de microorganismos y algas, acelerando el proceso de eutrofización(13,14). Este fenómeno implica una disminución del contenido de oxígeno en el agua, provocando la extinción masiva de peces y otros organismos, cambiando el equilibrio ecológico. Además, un exceso de vitamina B1 en el agua puede alterar los ciclos biogeoquímicos y afectar la salud de la fauna acuática.

La vitamina B1 es un nutriente orgánico esencial para los eucariotas fotosintéticos(13,15,16) que desempeña un papel fundamental en el metabolismo de los carbohidratos(17) y la síntesis de aminoácidos, ácidos nucleicos y ácidos grasos(18). Muchos organismos del bacterioplancton requieren vitamina B1 exógena(19); esta influye en la productividad primaria, la sucesión de especies, la composición de la comunidad de algas y el secuestro de carbono en las aguas oceánicas(14,16,20,21).

Aunque la presencia de medicamentos en el agua representa un tema de gran relevancia, también existen otras moléculas que requieren ser estudiadas como la melamina y la glucosa. La existencia de estas moléculas en el agua puede causar daños a la salud humana y el entorno natural. La melamina, empleada en la producción de plásticos, resulta tóxica al consumirse, pudiendo provocar daño renal e incluso efectos potencialmente mortales en dosis elevadas. Su prolongada exposición puede conducir a la creación de cálculos y daño renal crónico. En contraposición, la glucosa, a pesar de no ser tóxica por sí misma, puede promover el desarrollo excesivo de bacterias y microorganismos en el agua, provocando eutrofización, que disminuye los niveles de oxígeno y repercute de manera negativa en los ecosistemas acuáticos. Esto resalta la relevancia de supervisar la calidad del agua para prevenir riesgos para la salud pública y del ecosistema.

Siguiendo con los contaminantes químicos de interés, algunos de los más relevantes en los últimos años son los metales pesados, los cuales representan una de las principales preocupaciones ambientales. Existen más de 50 metales pesados que pueden resultar tóxicos para los humanos, de los cuales 17 se consideran altamente tóxicos y de fácil acceso. Entre los metales pesados que se conoce como tóxicos para los humanos se encuentran el arsénico, el cadmio, el cromo, el cobre, el plomo, el mercurio y el zinc, estos metales son ambientalmente persistentes lo que exacerba cualquier exposición potencialmente tóxica, con frecuencia tienden acumularse bajo determinadas condiciones ambientales(22).

Esta contaminación proviene tanto de fuentes antrópicas (industrias y agricultura) como naturales (actividad volcánica y erosión del suelo)(23). Se conoce que dichos metales son tóxicos y cancerígenos para los seres humanos, asimismo pueden afectar a los organismos acuáticos. El plomo está clasificado como el segundo contaminante más peligroso después del arsénico por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y la Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR)(24). Los iones de Pb(II) consiguen ser liberados al medio ambiente por las baterías, los cosméticos, los pesticidas, la fabricación de vidrio y la industria de pinturas. El Pb(II) es altamente tóxico y su concentración en el agua potable y los alimentos está restringida por ley(25).

Niveles altos de Cr(VI) pueden provocar cáncer, anemia, daño reproductivo, dañar el estómago o los intestinos. El Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS), la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) y la Asociación de Protección Ambiental (EPA) han determinado que los compuestos de Cr(VI) son carcinogénicos en seres humanos(26). Además, el contacto directo con Cr(VI) puede causar erupciones de la piel alérgicas en algunas personas(27).

Después de examinar los contaminantes del agua, tales como los metales pesados, moléculas orgánicas y medicamentos, queda claro que existe un área de estudio a desarrollar por lo cual se han implementado distintos métodos de detección de dichos contaminantes, algunos de los métodos más utilizados para analizar contaminantes son espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente/ espectrometría de masas (ICP-MS/AES)(28), espectrometría de absorción atómica (AAS)(29), espectrometría de fluorescencia atómica (AFS)(30), espectrometría de ruptura inducida por láser (LIBS)(31), cromatografía de gases acoplado con espectroscopia de masas(32), la cromatografía líquida de alto rendimiento acoplada a detección de matriz de diodos (HPLC-DAD)(33), fotoluminiscencia(34), entre otros. Sin embargo, la mayoría de ellos requieren una laboriosa preparación de muestras, el uso de instrumentos complejos y costosos, así como personal altamente calificado para realizar las mediciones.

Todas estas carencias han llevado en los últimos años a la búsqueda de sensores mejorados basados en procesos simples y rentables. En este sentido, los sensores colorimétricos son una de las mejores opciones porque el equipo necesario para evaluar las concentraciones de contaminantes es sencillo y económico, además este tipo de sensores de contaminación suelen operar rápidamente y permiten la detección *in situ*. En los últimos años se han investigado y desarrollado sensores colorimétricos basados en nanopartículas de metales nobles para la determinación de contaminantes presentes en el agua entre ellos iones de metales pesados, fármacos, pesticidas y otras moléculas de interés(4).

Las propiedades ópticas de las nanopartículas metálicas están relacionadas con la resonancia de plasmón superficial localizado (LSPR), la cual es una oscilación colectiva de electrones de la banda de conducción en nanopartículas metálicas excitadas por el

campo electromagnético de la luz incidente(35). Este fenómeno produce una luz cuya intensidad es proporcional a la concentración de analito en la muestra. Para la mayoría de las nanopartículas metálicas, la LSPR se encuentra en la región visible. La banda de absorción de la LSPR depende de varios parámetros físicos, como tamaño, forma, dispersión de partículas, modificaciones de la superficie, etc(36,37). La presencia de cambios significativos en cualquiera de estos parámetros causaría un desplazamiento y/o disminución en la banda de absorbancia de la LSPR. Estas alteraciones pueden detectarse visualmente a través de modulaciones de color, un fenómeno conocido como detección colorimétrica. Debido a la presencia de LSPR en las regiones UV y visible, la utilización de espectrofotometría UV-vis simple es generalmente adecuada para visualizar y cuantificar los cambios en la absorbancia y en la señal(38).

La LSPR se puede considerar como un fenómeno que permite la detección de modificaciones químicas en la superficie de una partícula de metal noble. Tal respuesta puede generar señales ópticas detectables que pueden correlacionarse con la concentración del analito. De esta manera, la respuesta se puede utilizar para detectar la existencia y cantidad de analito en la muestra.

Entre las diversas nanopartículas de metales nobles utilizadas para la detección de contaminantes, las nanopartículas de oro (AuNp) y las nanopartículas de plata (AgNp) son las más estudiadas y utilizadas debido a sus distintas propiedades físicas, químicas y biológicas. Estas nanopartículas son de fácil obtención, bajo costo, y alta sensibilidad, por lo han sido ampliamente utilizadas en diversos campos(39). Además, las AuNp y AgNp frecuentemente se emplean en la funcionalización con biomoléculas para diversas aplicaciones(40).

La síntesis de nanopartículas de morfología y propiedades deseadas se ha investigado desde el inicio de los nanomateriales, principalmente se clasifican en dos principales enfoques *top-down* y *bottom-up*, en la metodología *top-down* se basa en la descomposición o reducción materiales de gran tamaño para obtener nanoestructuras y en el enfoque *bottom-up* se centra en la construcción de estructuras a partir de átomos y moléculas individuales. Para sintetizar nanopartículas metálicas, los métodos químicos son los más comunes entre las diferentes estrategias, este pertenece al enfoque *bottom-up* ya que se basa en la formación de nanoestructuras a partir de la reducción de iones metálicos y la posterior nucleación y crecimiento de átomos metálicos dentro de la solución este procedimiento es conveniente, eficiente y simple. La reducción química de soluciones acuosas de sales de iones metálicos se realiza utilizando un agente reductor y un agente estabilizante(41). El control de parámetros en las nanopartículas ha llevado a los investigadores a probar distintas ramas de las ciencias entre ellas la síntesis verde, la cual ha adoptado diversos recursos biológicos como hongos, bacterias y extractos de plantas en su metodología. Entre los métodos ecológicos disponibles de síntesis para nanopartículas de metal/óxido metálico, la utilización de extractos de plantas es notable debido a que es un proceso bastante simple y fácil para producir nanopartículas a gran escala en relación con la síntesis mediada por bacterias y/u hongos. Para la síntesis de

nanopartículas de metal/óxido metálico, la biodiversidad vegetal se ha considerado ampliamente debido a la disponibilidad de fitoquímicos efectivos en diversos extractos de plantas, especialmente en hojas como cetonas, aldehídos, flavonas, amidas, terpenoides, ácidos carboxílicos y fenoles. Los residuos agroindustriales son una buena fuente de recursos biológicos para síntesis verde. El cultivo de la nuez pecana (*Carya illinoensis*) genera una cantidad considerable de subproductos, en particular cáscaras, que a menudo se desechan a pesar de ser ricas en compuestos bioactivos y estructurales. Estos residuos agroindustriales, que comprenden casi el 50 % de la masa total de la nuez, contienen altos niveles de polifenoles (ácido gálico, ácido elágico, ácido vainílico, catequinas), con concentraciones de fenoles y flavonoides que se reportan entre 5 y 20 veces mayores que las de las semillas comestibles, fibra dietética y materia lignocelulósica, lo que los hace idóneos para aplicaciones de economía circular.(42,43) Estos componentes son capaces de reducir las sales metálicas en nanopartículas metálicas(44). Según varias revisiones, en la síntesis de nanopartículas metálicas mediada por plantas y extractos de plantas, los alcoholes, aldehídos, fenoles, flavonoides y otros metabolitos actúan como reductores y agentes estabilizantes(41,45). Las características básicas de estos nanomateriales se han investigado para su uso en diagnósticos biomédicos, antimicrobianos, catálisis, detección molecular, imágenes ópticas, detección colorimétrica(46) y etiquetado de sistemas biológicos(47).

El mayor inconveniente de un método verde es que se producen tamaños de partícula superiores a los 30 nm lo cual dificulta la detección colorimétrica, pues está reportado que las nanopartículas de tamaños entre 10-20 nm muestran mejores resultados en su utilización como sensores colorimétricos(48).

Por otro lado, la selectividad de un sensor está determinada por sus receptores, que a su vez mejoran el rendimiento general del sensor. El receptor es el componente que se encarga de reconocer los analitos, proporciona medios de interacción que establecen una señal y también se lo conoce como “elemento de reconocimiento”. El proceso de añadir receptores a la superficie de las nanopartículas metálicas se conoce como modificación y/o funcionalización de la superficie, Este proceso implica la inmovilización de conjugados químicos (sales inorgánicas, ligandos, monómeros, etc.) y/o elementos biológicos (proteínas, aptámeros, ADN, etc.) en la superficie de las nanopartículas metálicas, en ocasiones sustituyendo al agente estabilizador ya existente(38). Del mismo modo, también se ha demostrado que las AuNp funcionalizadas son adecuadas para servir como sondas colorimétricas sensibles y selectivas para la detección de iones metálicos(49,50).

1.1 JUSTIFICACIÓN

En este proyecto se propone la síntesis de nanopartículas metálicas de Ag y Au por medio de reducción química y su posterior funcionalización superficial empleando biomoléculas obtenidas de extractos de plantas. Esta estrategia permitirá aprovechar los beneficios de dos metodologías diferentes, por un lado, una síntesis química capaz de producir tamaños de partícula por debajo de los 30 nm y, por otro lado, el aprovechamiento de biomoléculas presentes en extractos de plantas que pueden ser de utilidad para la detección colorimétrica. Finalmente, se evaluará el uso de las nanopartículas funcionalizadas, en la determinación colorimétrica de 3 tipos de contaminantes: iones de metales pesados (Pb(II) y Cr(VI)), fármacos (ciprofloxacino y vitamina B1) y moléculas orgánicas (melamina y glucosa).

CAPÍTULO

2. ANTECEDENTES

En 2021 Giancarla Alberti *et al.*(41) presentaron una revisión bibliográfica de la última década que se centra en distintos métodos de síntesis de nanopartículas de Au, Ag y nanopartículas bimetalicas de Au-Ag, utilizando métodos de síntesis físicos, químicos y verdes, así como su uso en la detección de productos farmacéuticos, biomoléculas y contaminantes ambientales. Las propiedades únicas de las nanopartículas y la LSPR, asociadas con sus colores característicos, estado de dispersión y agregación, los hacen ideales para el reconocimiento colorimétrico sensible de varios analitos químicos y biológicos, concluyendo que recientemente se han obtenido resultados bastante buenos aplicando sensores colorimétricos basados en nanopartículas de Ag y Au para el reconocimiento selectivo y sensible de diversos analitos, como especies inorgánicas, pesticidas, fármacos y biomoléculas. En particular, la selectividad de estos sensores se puede ajustar funcionalizando las nanopartículas con diferentes ligandos orgánicos e inorgánicos

En 2022 Sobhan Chatterjee *et al.*(51) presentan una revisión que describe varias nanopartículas de Au y Ag funcionalizadas con moléculas orgánicas, aminoácidos, biomoléculas y fluoróforos a base de tiol para la detección colorimétrica y fluorescente de iones metálicos tóxicos y biomoléculas esenciales. En particular, en esta revisión se han resumido enfoques viables y requisitos previos para la construcción de plataformas de detección basadas en nanopartículas de Au/Ag, centrados en el diseño de receptores orgánicos que poseen sitios de unión para varios iones metálicos y biomoléculas específicas utilizadas como agentes de protección y estabilizadores para la funcionalización de superficies de nanopartículas de Au y Ag. El diseño y la selección de ligandos orgánicos funcionales son cruciales para la detección y formación de complejos de iones metálicos. Además, la selección de ligandos depende de muchos parámetros importantes, entre ellos la naturaleza y la fuerza del enlace entre el ligando y la superficie de las nanopartículas, las energías de unión y las velocidades de difusión del ligando, así como la presencia de grupos funcionales específicos para la modificación química secundaria del ligando.

En 2020 Farid Ahmed *et al.*(52) utilizaron un método verde para sintetizar AgNp a partir del extracto de raíces de *Bistorta amplexicaulis* el cual actúa como agente reductor y estabilizador. Dichas nanopartículas se utilizaron como un sensor colorimétrico extremadamente selectivo y rentable para el reconocimiento simultáneo de Hg^{2+} y Pb^{2+} , con un límite de detección (LOD) de $8,0 \times 10^{-7}$ M y $2,0 \times 10^{-7}$ M para Hg^{2+} y Pb^{2+} , respectivamente. La caracterización de las nanopartículas presentó la banda característica de Ag a 427 nm. Además, las nanopartículas mostraron una actividad catalítica prometedora para la degradación del colorante naranja de metilo.

En 2020 Abolghasem Jouyban *et al.*(53) presentaron una revisión bibliográfica basada en la última década (2010-2020). Esta revisión se centra en los nanosensores ópticos basados en AgNp y su aplicación en la determinación de compuestos farmacéuticos. Los métodos ópticos reportados se clasifican en cuatro tipos: espectrofotometría, espectrofluorimetría, dispersión y quimioluminiscencia. En espectrofotometría la unión del analito a la superficie de AgNp conduce a la aparición de una señal que puede ser detectada espectrofotométricamente. Los iones Ag^+ en presencia de un analito reductor también pueden ser utilizados para la determinación cuantitativa del analito. Se han reportado estudios para la cuantificación de fármacos de la familia de las fluoroquinolonas en presencia de AgNp estabilizadas con citrato, así como estudios para la determinación de vitamina B1 en muestras de alimentos y cuantificación de paracetamol en productos farmacéuticos en presencia de polivinilpirrolidona (PVP).

En 2022 Junjie Wang *et al.* (54) sintetizaron nanopartículas núcleo-coraza de oro-plata de dos grosores de coraza diferentes. Para ello emplearon un método químico y se evaluaron como sensores colorimétricos de H_2O_2 y glucosa. A partir de la corrosión oxidativa de la capa de plata, se pudo determinar cuantitativamente la concentración de peróxido de hidrógeno y glucosa mediante el cambio espectral. Los resultados demostraron que el grosor de la coraza de plata jugó un papel crucial en el proceso de detección, el rango de detección para glucosa fue de 0–1 mM.

En 2022 Francisco Rodríguez-Félix *et al.*(55) presentaron una recopilación de artículos sobre los principales residuos generados que se encuentran en cultivos agrícolas e industriales provenientes de frutas y hortalizas, cereales, bagazo de la industria alimentaria y bebidas alcohólicas, tortas de aceite de la industria petrolera, entre otros. En estos residuos, las principales biomoléculas encontradas son compuestos fenólicos, alcaloides, terpenos, celulosa, hemicelulosa, lignina y proteínas, cuya función es reducir al ion plata. Por tanto, el objetivo de esta revisión fue promover el uso de residuos agroalimentarios para la síntesis verde sostenible de AgNp y su aplicación como agentes antibacterianos y anticancerígenos. Los tamaños obtenidos en esta recopilación van desde los 3 hasta los 200 nm con diferentes morfologías.

En 2011, Narayanan *et al.* (56) presentaron una revisión bibliográfica sobre la síntesis de nanopartículas metálicas utilizando extractos de plantas y biomasa de forma extracelular. Para AgNp se han reportado el uso de extractos de diversas plantas empleando las hojas, raíces, frutos y flores. Por ejemplo, en 2021, Momeni M. *et al.* (57) sintetizaron AgNp a partir de AgNO_3 usando extractos acuosos de *Bougainvillea glabra* como agente reductor y estabilizador. Dichas nanopartículas se evaluaron mediante su actividad antimicrobiana contra cepas estándar de *S. aureus* y *E. coli*. Las condiciones óptimas que utilizaron son una concentración de 0.01 M de AgNO_3 , 4 mL del extracto de *Bougainvillea glabra* en un agitador a 150 rpm por 120 min a un pH 7-8.5, el cual es el pH óptimo en las biosíntesis de nanopartículas. Se observó en el espectro de UV-vis la presencia de la banda de absorción características de las AgNp a 420 nm.

En 2024 Cicek C. *et al.* (58) desarrollaron un enfoque espectrofotométrico rápido y preciso para la detección de ciprofloxacino utilizando nanopartículas de oro. Se utilizó la banda de absorción de las nanopartículas debida a la LSPR localizada a 523 nm como detección espectrofotométrica de ciprofloxacino. El rango de operación lineal para el método espectrofotométrico desarrollado fue de 0.015 a 1.48 µg/mL en una solución tampón de fosfato de pH 7. En el estudio de recuperación realizado para detectar la cantidad de ciprofloxacino en gotas comerciales para los oídos, el valor de recuperación se calculó como $91.06 \pm 1.21\%$

2.1 ANÁLISIS CRÍTICO DE LA LITERATURA

Existen diversos reportes sobre métodos de detección de medicamentos entre ellos vitamina B1 y ciprofloxacino utilizando nanopartículas de plata sintetizadas mediante reducción química. Para la detección de metales se han reportado la implementación de nanopartículas de plata sintetizadas por distintos métodos. En el caso de moléculas orgánicas existen diversos reportes de su detección utilizando nanopartículas núcleo-coraza que permiten un bajo nivel de detección en muestras simuladas. En dichos reportes la preparación de la muestra, el tamaño y composición de las nanopartículas juega un papel fundamental. Asimismo, existen reporte de síntesis de nanopartículas utilizando extractos naturales; sin embargo, existen pocos reportes sobre el uso de nanopartículas de Au, Ag o bimetálicas de Au/Ag funcionalizadas con extractos naturales para detectar distintos tipos contaminantes utilizando un solo método de síntesis.

En este trabajo se propone sintetizar nanopartículas de plata y oro empleando NaBH_4 como agente reductor y citrato de sodio como estabilizador, dichas nanopartículas serán funcionalizadas utilizando extractos acuosos de cáscara de nuez pecana para mejorar la detección. Se espera que esta estrategia permita la detección individual de vitamina B1, ciprofloxacino, Pb(II), Cr(VI), melamina y glucosa en muestras simuladas.

2.2 APORTACIÓN CIENTÍFICA

Nanopartículas metálicas funcionalizadas con biomoléculas, que sean capaces de determinar cuantitativamente diversos contaminantes, de manera individual, por métodos colorimétricos.

2.3 HIPÓTESIS

Las nanopartículas metálicas funcionalizadas superficialmente con biomoléculas permiten la determinación colorimétrica de contaminantes con un LOD menor que las nanopartículas metálicas sin funcionalizar.

2.4 OBJETIVOS

2.4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el uso de nanopartículas metálicas, funcionalizadas superficialmente con biomoléculas, en la determinación colorimétrica de contaminantes.

2.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Sintetizar nanopartículas metálicas de Ag y Au por medio de reducción química.
2. Caracterizar las nanopartículas metálicas mediante UV-vis, SEM y TEM.
3. Obtener biomoléculas mediante extractos acuosos cáscaras de nuez pecana.
4. Caracterizar las familias de biomoléculas presentes en los extractos por medio de UV-vis y FT-IR.
5. Funcionalizar las nanopartículas metálicas con las biomoléculas obtenidas.
6. Evaluar el desempeño de las nanopartículas funcionalizadas en la determinación cuantitativa de iones de metales pesados.
7. Evaluar el desempeño de las nanopartículas funcionalizadas en la determinación cuantitativa de fármacos.
8. Evaluar el desempeño de las nanopartículas funcionalizadas en la determinación cuantitativa de moléculas orgánicas.

2.5. METAS

- Desarrollar conocimiento en el campo de la Química de los Materiales.
- Llevar a cabo una estancia de investigación en otra institución ajena a la UANL.
- Difundir los resultados obtenidos en al menos un congreso internacional en modalidad oral y/o póster.
- Publicar los resultados obtenidos en al menos un artículo de arbitraje estricto y circulación internacional.
- Obtener el grado de Doctorado en Ciencias con Orientación en Química de los Materiales.

Capítulo

3. METODOLOGÍA DEL TRABAJO

3.1. MATERIALES Y EQUIPO

Los reactivos utilizados fueron: nitrato de plata (Sigma-Aldrich, $\geq 99.0\%$), vitamina B1 (Sigma-Aldrich 99%), ciprofloxacino (Sigma-Aldrich 99%), citrato de sodio (Sigma-Aldrich 99%), borohidruro de sodio (Sigma-Aldrich 99%), ácido tetracloroáurico (Sigma-Aldrich 99%), melamina (Sigma-Aldrich 99%), glucosa (Sigma-Aldrich 99%), cromato de potasio (Sigma-Aldrich 99%), nitrato de plomo(II) (Sigma-Aldrich 99%) se utilizaron sin previa purificación. Los equipos que se utilizaron fueron: espectrofotómetro UV-vis “UV5” mettler Toledo ubicado en el laboratorio de orgánica 4, empleado para evidenciar los cambios en la absorbancia debidos a la interacción entre las partículas y los analitos, el equipo de espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR) Perkin-Elmer Spectrum One, ubicado en el laboratorio de Instrumentación Analítica, para demostrar los grupos funcionales de las moléculas presentes en los extractos, responsables de la funcionalización de las nanopartículas y el equipo HRTEM JEOL JEM2100, ubicado en las instalaciones de la UJAT.

3.2. PARTE EXPERIMENTAL

Las nanopartículas de Ag se obtuvieron mediante reducción química empleando NaBH_4 como agente reductor y citrato de sodio como agente estabilizante de acuerdo con la metodología propuesta por C. Puente *et al.* (59) En un vaso de precipitado se agregaron 58 mL de agua destilada, 10 mL de una solución de AgNO_3 1 mM y 30 mL de citrato de sodio 5 mM. Una vez mezclada la solución se añadieron gota a gota 2 mL de una solución de NaBH_4 8 mM. Para la caracterización de las nanopartículas se empleó espectrofotometría UV-vis, con el fin de analizar la banda de absorción debida a la LSPR, así como microscopía electrónica de transmisión (TEM) para determinar su morfología.

Para la síntesis de nanopartículas de oro se utilizó el método de crecimiento controlado por semillas reportado por Neus G. Bastús *et al.* (60). Para ello, se colocaron 150 mL de citrato de sodio 2.2 mM en un baño de agua a 90°C durante 15 minutos bajo agitación constante. Transcurrido este tiempo, se agregó 1 mL de HAuCl_4 25 mM y se dejó reaccionar por 10 minutos. Posteriormente se agregaron 1 mL de citrato de sodio 60 mM y 1 mL de HAuCl_4 25 mM, y se mantuvo la agitación durante 30 minutos. Finalmente, la dispersión se dejó enfriar a temperatura ambiente y las nanopartículas obtenidas se almacenaron en un frasco ámbar hasta su utilización. Para la caracterización de las nanopartículas se empleó espectrofotometría UV-vis, con el fin de analizar la banda de absorción debida a la LSPR, así como TEM para determinar su morfología.

Para la obtención de extractos de cáscaras de nuez pecana, las cáscaras se lavaron con agua destilada y se secaron a temperatura ambiente; después se trituraron hasta obtener un polvo, dicho polvo se almacenó hasta su utilización. Para cada extracción, se pesaron 100 mg de polvo de cáscara de nuez y se agregaron 100 mL de agua destilada. La mezcla se llevó a ebullición durante 10 min y posteriormente se dejó enfriar a temperatura ambiente. Los residuos de biomasa se separaron mediante filtración. Para la caracterización de los extractos se empleó espectrofotometría UV-vis, con el fin de analizar la banda de absorción de los grupos cromóforos presentes en las biomoléculas y espectroscopia FT-IR para determinar los grupos funcionales de dichas moléculas.

Con el fin de lograr una funcionalización superficial, las nanopartículas se mezclaron con los extractos obtenidos previamente en diferentes proporciones (1:1, 1:2 y 2:1). En adelante, las nanopartículas funcionalizadas de plata y oro se identificarán como N:AgNp y N:AuNp, respectivamente, seguidas de la relación de funcionalización correspondiente y se dejaron reaccionar por 24 h, para asegurar el intercambio de moléculas presentes en la superficie de las nanopartículas (citrato de sodio) por las biomoléculas presentes en los extractos de cáscaras de nuez pecana. Se analizó su espectro UV-vis con el fin de evidenciar algún cambio en la banda de absorción. Una vez seleccionadas las nanopartículas funcionalizadas que mostraron un comportamiento adecuado, se realizaron pruebas de detección con diferentes contaminantes para determinar cuáles podrían ser detectados mediante dichas nanopartículas.

Para la determinación colorimétrica se prepararon soluciones de los diferentes contaminantes: $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 3×10^{-4} M, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 3×10^{-4} M, vitamina B1 5×10^{-4} M, melamina 3×10^{-3} M, glucosa 0.01 M y ciprofloxacino 0.001 M. Las soluciones preparadas se mezclaron con la dispersión de nanopartículas funcionalizadas y posteriormente se analizó su espectro UV-vis con el fin de evidenciar algún cambio en la banda de absorción. Una vez seleccionadas las nanopartículas funcionalizadas que permitieron la detección de contaminantes, se realizaron análisis a diferentes concentraciones de estos para determinar los rangos de linealidad.

A continuación, se presenta una serie de tablas que resumen los experimentos realizados utilizando las nanopartículas de oro y plata funcionalizadas, tanto funcionalizadas como sin funcionalizar, para la detección de los contaminantes de interés. En estas tablas se muestran las condiciones experimentales empleadas en cada ensayo. Asimismo, cada tabla incluye información sobre el tipo de nanopartícula utilizada y el contaminante evaluado.

En la **Tabla 1** se presentan las relaciones utilizadas para analizar las N:AgNp 1:1 en presencia de vitamina B1 (5×10^{-4} M) y $K_2Cr_2O_7$ (3×10^{-4} M).

Tabla 1. Relación de las muestras preparadas con N:AgNp relación 1:1.

Analito (mL)	N:AgNp 1:1 (mL)	H ₂ O (mL)
3	3	3
2.5	3	3.5
2.0	3	4
1.5	3	4.5
1	3	5
0.5	3	5.5
0	3	6

En la **Tabla 2** se presentan las relaciones utilizadas para analizar las N:AgNp 1:2 en presencia de vitamina B1 (5×10^{-4} M), $K_2Cr_2O_7$ 3×10^{-4} M, glucosa 0.01 M y ciprofloxacino 0.001 M.

Tabla 2. Relación de las muestras preparadas con N:AgNp relación 1:2.

Analito (mL)	N:AgNp 1:2 (mL)	H ₂ O (mL)
6	3	0
5.5	3	0.5
5	3	1
4.5	3	1.5
4	3	2
3.5	3	2.5
3	3	3
2.5	3	3.5
2.0	3	4
1.5	3	4.5
1	3	5
0.5	3	5.5
0.4	3	5.6
0.3	3	5.7
0.2	3	5.8
0.1	3	5.9
0	3	6

En la **Tabla 3** se presentan las relaciones utilizadas para analizar las H₂O:AgNp 1:2 en presencia de vitamina B1 (5×10^{-4} M) y K₂Cr₂O₇ (3×10^{-4} M)

Tabla 3. Relación de las muestras preparadas con H₂O:AgNp relación 1:2.

Analito (mL)	H ₂ O:AgNp 1:2 (mL)	H ₂ O (mL)
6	3	0
5.5	3	0.5
5	3	1
4.5	3	1.5
4	3	2
3.5	3	2.5
3	3	3
2.5	3	3.5
2.0	3	4
1.5	3	4.5
1	3	5
0.5	3	5.5
0.4	3	5.6
0.3	3	5.7
0.2	3	5.8
0.1	3	5.9
0	3	6

En la **Tabla 4** se presentan las relaciones utilizadas para analizar las N:AgNp 1:2 en presencia de vitamina B1 (5×10^{-4} M) a pH ácido (pH: 4) y pH básico (pH: 9).

Tabla 4. Relación de las muestras preparadas con N:AgNp relación 1:2 para vitamina B1 en pH ácido y básico.

Analito (mL) en pH ácido y básico	N:AgNp 1:2 (mL)	H ₂ O (mL)
6	3	0
5.5	3	0.5
5	3	1
4.5	3	1.5
4	3	2
3.5	3	2.5
3	3	3
2.5	3	3.5
2.0	3	4
1.5	3	4.5
1	3	5
0.5	3	5.5
0.4	3	5.6
0.3	3	5.7
0.2	3	5.8
0.1	3	5.9
0	3	6

En la **Tabla 5** se presentan las relaciones utilizadas para analizar las N:AgNp 1:2 en presencia de vitamina B1 con interferencia de distintos cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} y Al^{3+})

Tabla 5. Relación de las muestras preparadas con N:AgNp relación 1:2 para vitamina B1 con interferencia de cationes.

Catión	Analito (mL)	N:AgNp 1:1 (mL)	H ₂ O (mL)
Na^+	3.5	3	2.5
K^+	3.5	3	2.5
Ca^{2+}	3.5	3	2.5
Mg^{2+}	3.5	3	2.5
Fe^{3+}	3.5	3	2.5
Al^{3+}	3.5	3	2.5

En la **Tabla 6** se presentan las relaciones utilizadas para analizar las N:AuNp 1:1 en presencia de vitamina B1 (5×10^{-4} M) y ciprofloxacino 0.001 M.

Tabla 6. Relación de las muestras preparadas con N:AuNp relación 1:1.

Analito (mL)	N:AuNp 1:2 (mL)	H ₂ O (mL)
6	3	0
5.5	3	0.5
5	3	1
4.5	3	1.5
4	3	2
3.5	3	2.5
3	3	3
2.5	3	3.5
2.0	3	4
1.5	3	4.5
1	3	5
0.5	3	5.5
0.4	3	5.6
0.3	3	5.7
0.2	3	5.8
0.1	3	5.9
0	3	6

En la **Tabla 7** se presentan las relaciones utilizadas para analizar las N:AuNp 1:2 en presencia de vitamina B1 (5×10^{-4} M).

Tabla 7. Relación de las muestras preparadas con N:AuNp relación 1:2.

Analito (mL)	N:AuNp 1:2 (mL)	H ₂ O (mL)
6	3	0
5.5	3	0.5
5	3	1
4.5	3	1.5
4	3	2
3.5	3	2.5
3	3	3
2.5	3	3.5
2.0	3	4
1.5	3	4.5
1	3	5
0.5	3	5.5
0.4	3	5.6
0.3	3	5.7
0.2	3	5.8
0.1	3	5.9
0	3	6

En la **Tabla 8** se presentan las relaciones utilizadas para analizar las H₂O:AuNp 1:1 en presencia de vitamina B1 (5×10^{-4} M) y ciprofloxacino 0.001 M.

Tabla 8. Relación de las muestras preparadas con H₂O:AgNp relación 1:1.

Analito (mL)	H ₂ O:AuNp 1:1 (mL)	H ₂ O (mL)
6	3	0
5.5	3	0.5
5	3	1
4.5	3	1.5
4	3	2
3.5	3	2.5
3	3	3
2.5	3	3.5
2.0	3	4
1.5	3	4.5
1	3	5
0.5	3	5.5
0.4	3	5.6
0.3	3	5.7
0.2	3	5.8
0.1	3	5.9
0	3	6

En la **Tabla 9** se presentan las relaciones utilizadas para analizar las H₂O:AuNp 1:2 en presencia de vitamina B1 (5×10^{-4} M).

Tabla 9. Relación de las muestras preparadas con H₂O:AgNp relación 1:2.

Analito (mL)	H ₂ O:AuNp 1:1 (mL)	H ₂ O (mL)
6	3	0
5.5	3	0.5
5	3	1
4.5	3	1.5
4	3	2
3.5	3	2.5
3	3	3
2.5	3	3.5
2.0	3	4
1.5	3	4.5
1	3	5
0.5	3	5.5
0.4	3	5.6
0.3	3	5.7
0.2	3	5.8
0.1	3	5.9
0	3	6

En la **Tabla 10** se presentan las relaciones utilizadas para analizar las N:AuNp 1:1 en presencia de vitamina B1 (5×10^{-4} M) a pH ácido (pH: 4) y pH básico (pH: 9) y ciprofloxacino 0.001 M a pH ácido (pH: 4) y pH básico (pH: 9).

Tabla 10. Relación de las muestras preparadas con N:AuNp relación 1:1 para analitos en pH ácido y básico.

Analito (mL) en pH ácido y básico	N:AuNp 1:1 (mL)	H ₂ O (mL)
6	3	0
5.5	3	0.5
5	3	1
4.5	3	1.5
4	3	2
3.5	3	2.5
3	3	3
2.5	3	3.5
2.0	3	4
1.5	3	4.5
1	3	5
0.5	3	5.5
0.4	3	5.6
0.3	3	5.7
0.2	3	5.8
0.1	3	5.9
0	3	6

En la **Tabla 11** se presentan las relaciones utilizadas para analizar las N:AuNp 1:2 en presencia de vitamina B1 (5×10^{-4} M) a pH ácido (pH: 4) y pH básico (pH: 9).

Tabla 11. Relación de las muestras preparadas con N:AgNp relación 1:2 para analitos en pH ácido y básico.

Analito (mL) en pH ácido y básico	N:AuNp 1:2 (mL)	H ₂ O (mL)
6	3	0
5.5	3	0.5
5	3	1
4.5	3	1.5
4	3	2
3.5	3	2.5
3	3	3
2.5	3	3.5
2.0	3	4
1.5	3	4.5
1	3	5
0.5	3	5.5
0.4	3	5.6
0.3	3	5.7
0.2	3	5.8
0.1	3	5.9
0	3	6

En la **Tabla 12** se presentan las relaciones utilizadas para analizar las N:AuNp 1:1 en presencia de vitamina B1 y ciprofloxacino con interferencia de distintos cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} y Al^{3+})

Tabla 12. Relación de las muestras preparadas con N:AuNp relación 1:1 para vitamina B1 y ciprofloxacino con interferencia de cationes.

Catión	Analito (mL)	N:AuNp 1:1 (mL)	H ₂ O (mL)
Na^+	3.5	3	2.5
K^+	3.5	3	2.5
Ca^{2+}	3.5	3	2.5
Mg^{2+}	3.5	3	2.5
Fe^{3+}	3.5	3	2.5
Al^{3+}	3.5	3	2.5

En la **Tabla 13** se presentan las relaciones utilizadas para analizar las N:AuNp 1:2 en presencia de vitamina B1 con interferencia de distintos cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} y Al^{3+})

Tabla 13. Relación de las muestras preparadas con N:AuNp relación 1:2 para vitamina B1 con interferencia de cationes.

Catión	Analito (mL)	N:AuNp 1:2 (mL)	H ₂ O (mL)
Na^+	3.5	3	2.5
K^+	3.5	3	2.5
Ca^{2+}	3.5	3	2.5
Mg^{2+}	3.5	3	2.5
Fe^{3+}	3.5	3	2.5
Al^{3+}	3.5	3	2.5

3.3. DISPOSICIÓN DE RESIDUOS GENERADOS

Los residuos generados se desecharon siguiendo el procedimiento para la clasificación de residuos peligrosos del departamento de Medio Ambiente y Seguridad de la Facultad de Ciencias Químicas.

Tabla 14. Disposición de residuos generados.

Residuo	Colector
Soluciones salinas, citrato de sodio, borohidruro de sodio.	Colector A: soluciones salinas de pH 6-8, sales, ácidos y bases orgánicas
Residuos de fármacos y moléculas orgánicas.	Colector C: Tóxicos e inflamables, aminas, solventes orgánicos no halogenados.
Residuos de Pb y Cr.	Colector E inorgánico: Sales de metales tóxicos.
Sales de Ag y Sales de Au.	Colector F: Reciclo de sales de metales preciosos.
Contenedores o frascos vacíos de vidrio que contuvieron reactivos o residuos peligrosos. Contenedor o frascos que haya sido quebrado y contuvieron reactivos o residuos peligrosos.	Vidrio impregnado con sustancias peligrosas.
Contenedores vacíos que contuvieron reactivos o residuos peligrosos. Frascos vacíos que contuvieron reactivos o residuos peligrosos.	Plástico impregnado con sustancias peligrosas.
Arena o diaper (sanitas, papel, magitel) impregnado con residuos peligrosos. Absorbente que se utilizan para recolectar derrames. Guantes de plástico y látex.	Basura industrial.

CAPÍTULO

4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA

Se realizaron análisis de UV-vis de las AgNp sintetizadas, de los extractos obtenidos, de las nanopartículas funcionalizadas con dichos extractos y de las muestras en presencia de distintos analitos. En la **Figura 1** se observa el UV-vis de las AgNp sintetizadas mediante reducción química, las cuales presentan una banda de LSPR a 404 nm. Este resultado sugiere la formación de nanopartículas con un tamaño inferior a los 20 nm, tal como lo reporta Puente y colaboradores en su artículo(59). Además, al tener poca anchura a media banda (Full Width at Half Maximum, FWHM) indica una distribución de tamaño relativamente uniforme, lo que sugiere que no existe una variación considerable en la morfología de las nanopartículas.

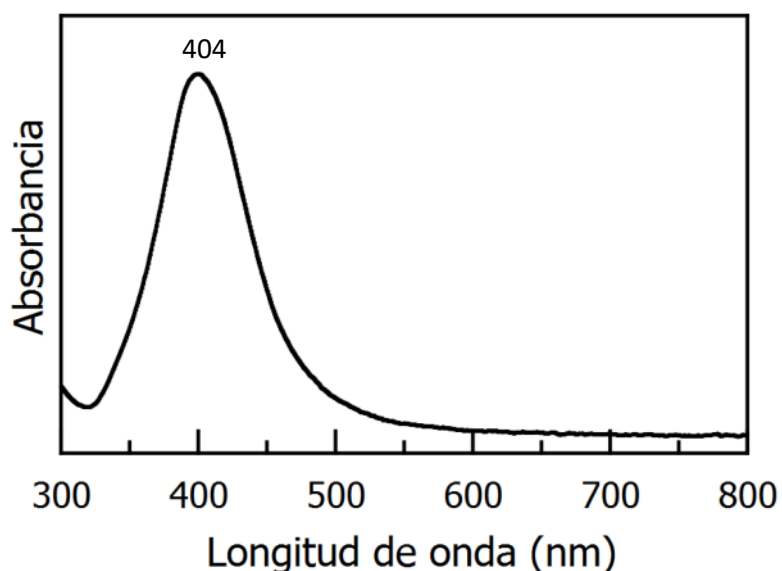


Figura 1. Espectro UV-vis de nanopartículas de plata sintetizadas.

En la **Figura 2** se muestra la micrografía TEM de las AgNp sintetizadas. La síntesis conduce a la obtención de partículas con morfología esférica y un tamaño promedio de 8.2 nm(Figura 2 (d)). Los incisos (a) y (b) presentan las imágenes TEM obtenidas a diferentes aumentos, mientras que el inciso (c) muestra el patrón de difracción de electrones de área seleccionada (SAED), lo que revela que las partículas son cristalinas. Los anillos de difracción se pueden indexar en función de la estructura FCC de la plata.

Los cuatro anillos observados corresponden a las reflexiones de los planos reticulares (111), (200), (220) y (311) de la plata FCC, respectivamente, similar a lo reportado por Veeraswamy Thiruvengadam y Ankur V. Bansod en su artículo (61).

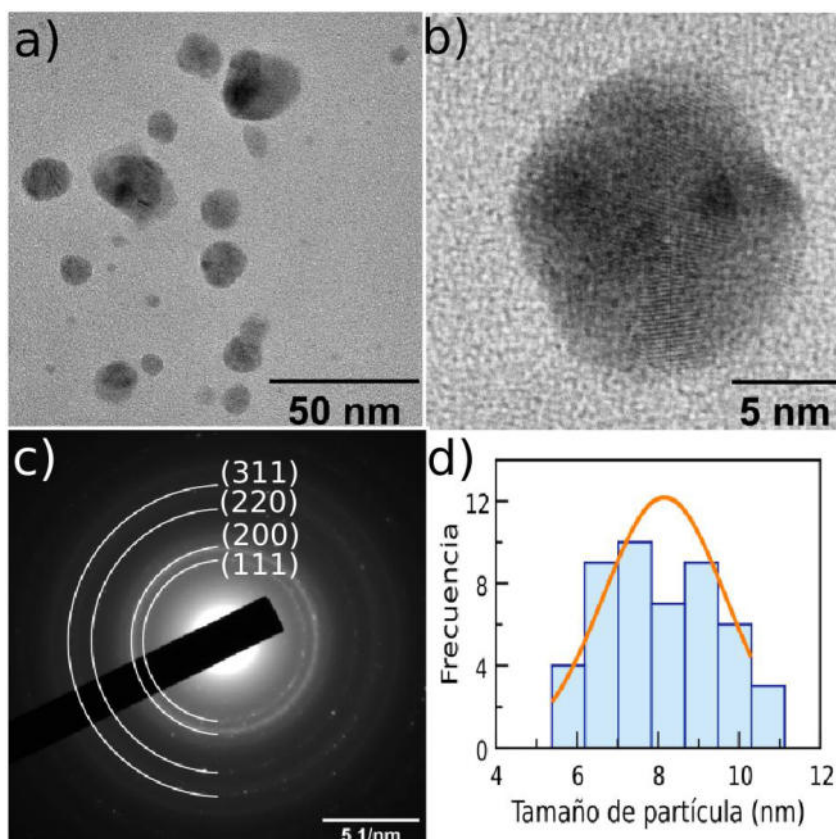


Figura 2. a) Imagen de microscopía electrónica de transmisión (TEM), b) microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM), c) Difracción de electrones de área seleccionada (SAED) y d) histograma de las nanopartículas de plata sintetizadas.

4.2. FUNCIONALIZACIÓN CON EXTRACTO DE CÁSCARA DE NUEZ

La **Figura 3** presenta el espectro UV-vis del extracto acuoso de cáscara de nuez, este espectro exhibe una banda entre 260 - 290 nm, la cual puede atribuirse a los polifenoles presentes en el extracto (62). Asimismo, la banda entre 400 y 500 nm se atribuye a los grupos cromóforos característicos de los compuestos presentes en los frutos de coloración marrón rojiza.

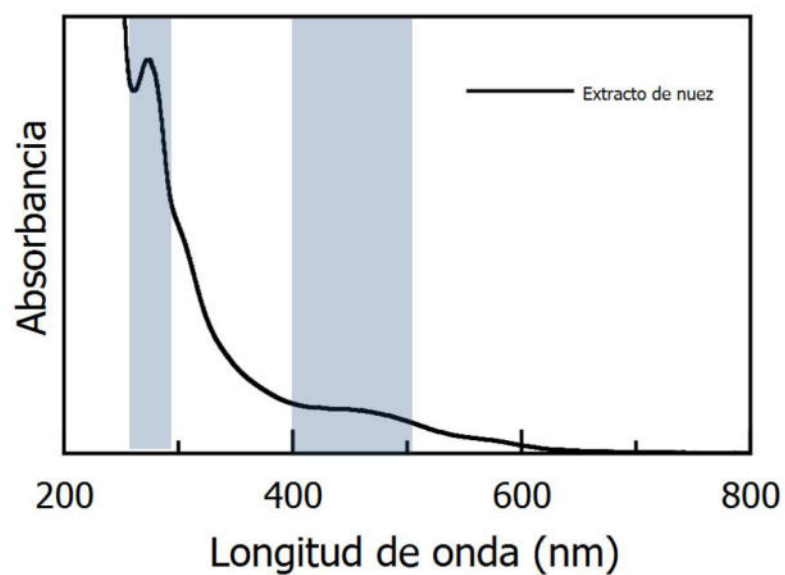


Figura 3. Espectros UV-vis del extracto acuosos de cáscara de nuez.

Conjuntamente, se obtuvo el espectro FT-IR del extracto acuoso de cáscara de nuez (Figura 4) para corroborar la presencia de los grupos funcionales correspondientes a las moléculas presentes. Las bandas observadas en $3600\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ se asocia con fenoles, en el rango de $2920\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$ corresponde a grupos alifáticos, de $1750\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$ representa a los grupos carbonilos, de $1600\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$, se asocia con compuestos fenólicos y estructuras aromáticas, de $1300\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ está asociado con enlaces C-O, $1200\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ represente los enlaces C-O-C, todo esto es compatible con los compuestos fenólicos y compuestos aromáticos presentes en el extracto de cáscara de nuez

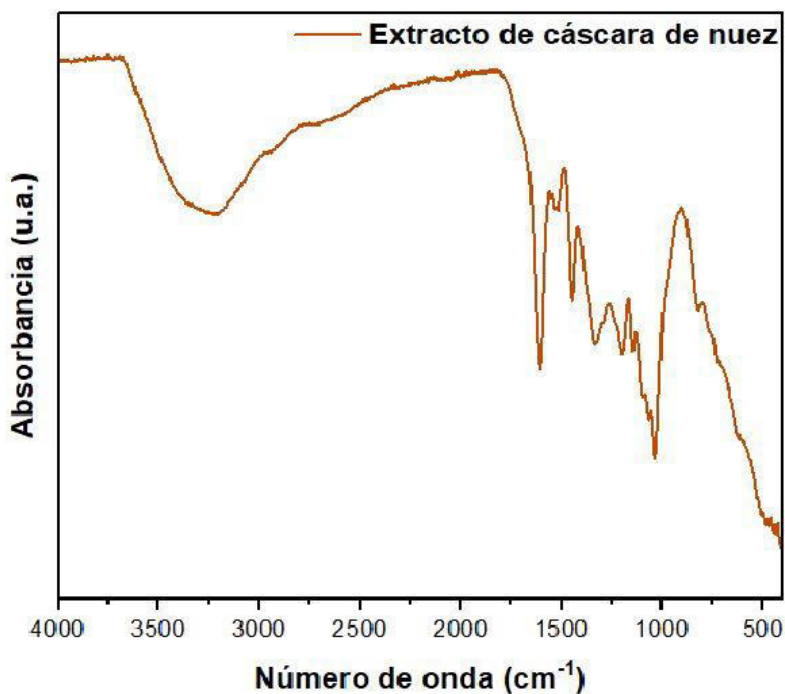


Figura 4. Espectro FT-IR del extracto acuoso de cáscara de nuez.

En la **Figura 5** se muestran los espectros UV-vis de las nanopartículas de plata funcionalizadas con extracto acuoso de cáscara de nuez (N:AgNp). Se observa un cambio en la posición de la banda LSPR, lo que apunta a un cambio en el tamaño de las nanopartículas. Esto puede deberse a dos razones: la aglomeración de las nanopartículas inducida por moléculas como el ácido elágico, lo que ocasiona que se comporten ópticamente como una partícula de mayor tamaño; o bien que las nanopartículas estén creciendo debido a una reducción de iones plata libre remanentes de la síntesis, lo cual puede ser provocado por moléculas como el ácido gálico que tienen grupos fenol que se pueden oxidar fácilmente. No obstante, se requieren análisis adicionales para evidenciar alguno de estos mecanismos. Además, se puede observar que se obtuvieron mejores resultados con la relación 1:1 y 1:2 por lo cual la relación 2:1 se descartó para futuras muestras.

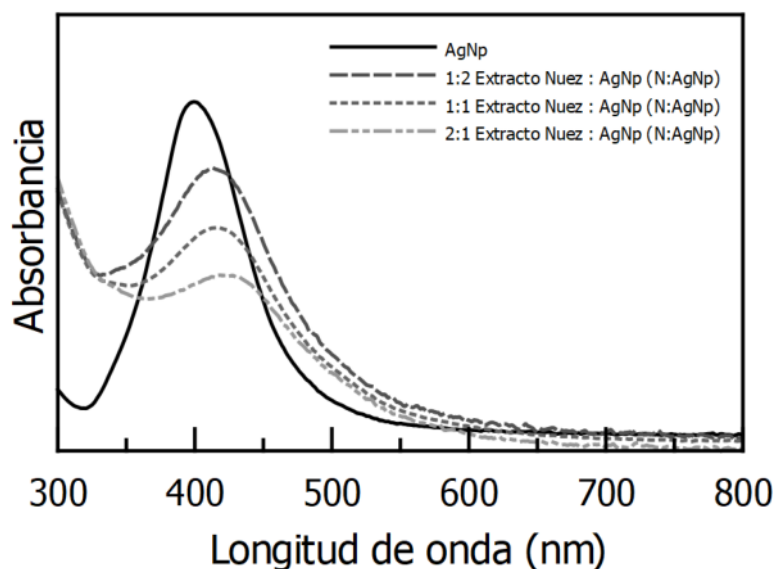


Figura 5. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata funcionalizadas con extracto acuoso de cáscara de nuez en relación 1:1, 1:2 y 2:1.

Se realizaron muestras para evaluar la interacción de las N:AgNp en relación 1:1 y 1:2 con los analitos de interés. En la **Figura 6** se muestran los espectros correspondientes a las 1:1 N:AgNp en presencia de los analitos a las diferentes concentraciones: (Cr(VI) 300×10^{-6} M, Pb(II) 300×10^{-6} M, vitamina B1 5×10^{-4} M y melamina 0.003 M), las N:AgNp en presencia de Cr(VI) presentaron desplazamiento hipsocrómico acompañado de un aumento significativo en la absorbancia. Por otro lado, al estar en presencia de Pb(II) únicamente se observa un ligero aumento de la absorbancia de las N:AgNp. En el caso de la vitamina B1 (Vit B1) la absorbancia de la banda disminuye junto con un desplazamiento batocrómico. Finalmente, en presencia de melamina la banda no presenta un cambio significativo por lo cual se considera que no es detectable por este método bajo las condiciones evaluadas.

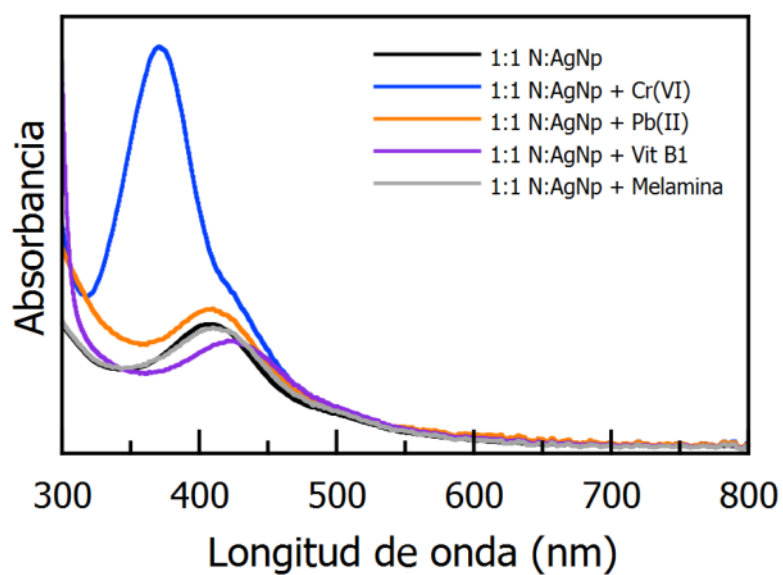


Figura 6. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata funcionalizadas con extracto acuoso de cáscara de nuez relación 1:1 en presencia de Cr(VI), Pb(II), vitamina B1 y melamina.

En la **Figura 7** se muestran los espectros de las N:AgNp 1:2 en presencia de Cr(VI) 300×10^{-6} M, Pb(II) 300×10^{-6} M, vitamina B1 5×10^{-4} M, melamina 0.003 M, ciprofloxacino 0.001M y glucosa 0.01M. Al entrar en contacto con Cr(VI) la banda presenta desplazamiento hipsocrómico acompañado de un aumento en la absorbancia. En el caso de Pb(II) la banda muestra un ligero aumento apenas perceptible. La muestra con Vit B1 presenta un ligero desplazamiento batocrómico junto con una disminución en la intensidad de la absorbancia. Por otro lado, al estar en presencia de la melamina la banda muestra un leve desplazamiento batocrómico mientras que en presencia de glucosa presenta un desplazamiento batocrómico junto con una ligera disminución de la absorbancia. Finalmente, en presencia de ciprofloxacino exhibe la aparición de la señal característica del ciprofloxacino, además de un ligero desplazamiento batocrómico. Con base en estos resultados se decidió realizar experimentación con las muestras que presentaron mayores cambios en el espectro por lo cual se realizaron pruebas con Cr(VI) y Vit B1.

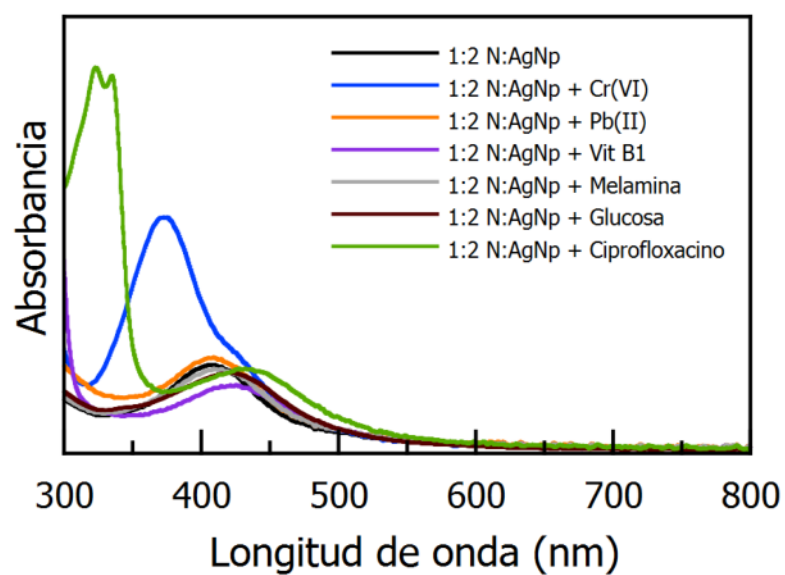


Figura 7. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata funcionalizadas con extracto acuoso de cáscara de nuez relación 1:2 en presencia de Cr(VI), Pb(II), Vitamina B1, Melamina, Ciprofloxacino y Glucosa.

En la **Figura 8** se presentan los espectros de 1:1 N:AgNp en presencia de distintas concentraciones de Cr(VI) de 17– 100 μ M. Se observa que, conforme se aumenta la concentración de Cr(VI), la banda de las nanopartículas se desplaza hipsocrómicamente acompañado de un incremento gradual en la absorbancia. Debido a que el Cr(VI) presenta coloración amarilla característica, se realizaron los espectros de las distintas concentraciones de dicho analito para descartar posibles interferencias.

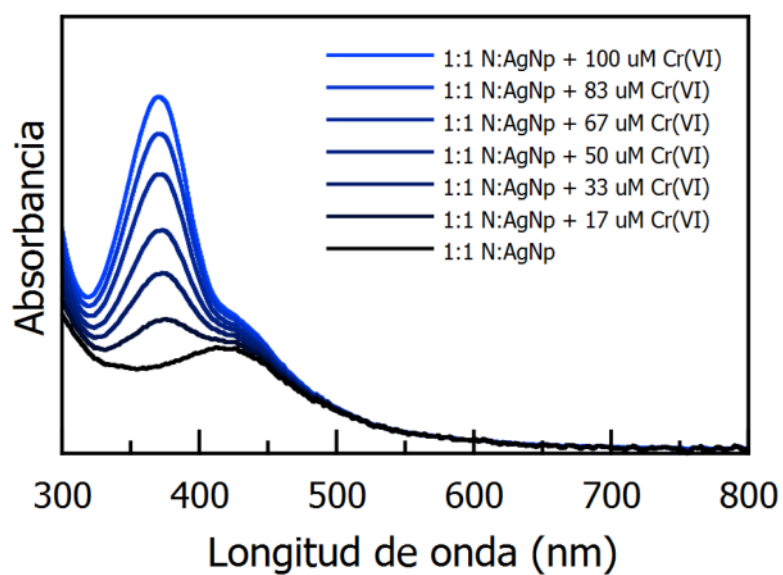


Figura 8. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata funcionalizadas con extracto acuoso de cáscara de nuez relación 1:1 en presencia de Cr(VI) en concentraciones 100, 83, 67, 50, 33 y 17 μM .

En la **Figura 9**, se observa una banda cerca de los 350 nm la cual corresponde al Cr(VI), se presenta un aumento gradual en la absorbancia, este no es tan predominante como cuando se encuentra en presencia de las N:AgNp por lo cual se descarta la interferencia debido al color característico del $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Con base en estos resultados se procedió a la realización de una curva de calibración para comprobar la eficiencia del método de detección.

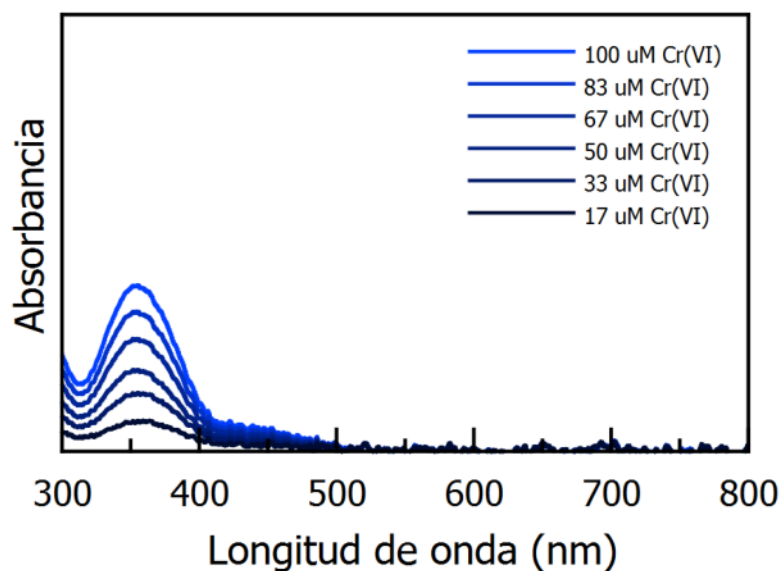


Figura 9. Espectro UV-vis de Cr(VI) en concentraciones 17, 33, 50, 67, 83 y 100 μM .

En la **Figura 10** Se muestra la curva de calibración de las 1:1 N:AgNp en presencia de Cr(VI), la cual presenta un coeficiente de correlación (R^2) de 0.9965, lo que indica una alta linealidad y una buena respuesta del sensor, también se realizó la curva de calibración del Cr(VI) el cual se muestra en la **Figura 12**.

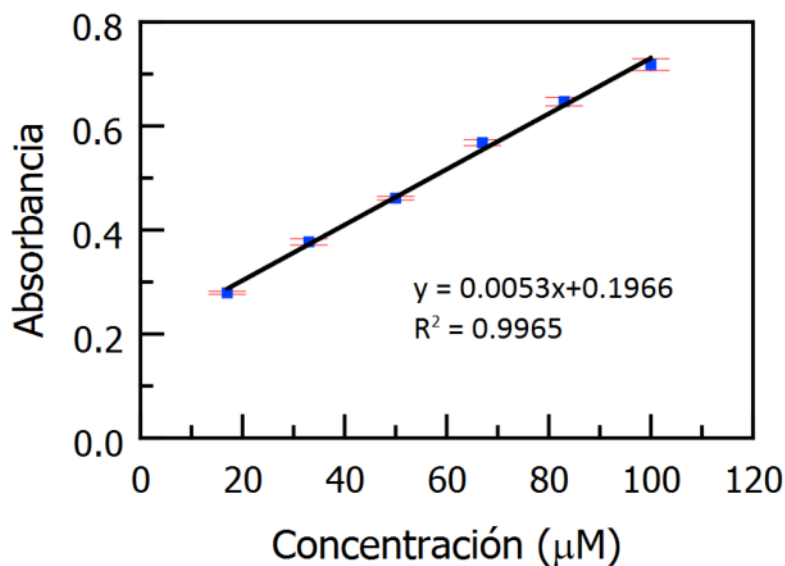


Figura 10. Curva de calibración de las 1:1 N:AgNp en presencia de Cr(VI).

En la **Figura 11** se observa la curva de calibración de Cr(VI) la cual presenta una R^2 de 0.9989, lo que indica una alta linealidad. Estos resultados sugieren que es posible detectar Cr(VI) espectrofotométricamente incluso en ausencia de las nanopartículas funcionalizadas.

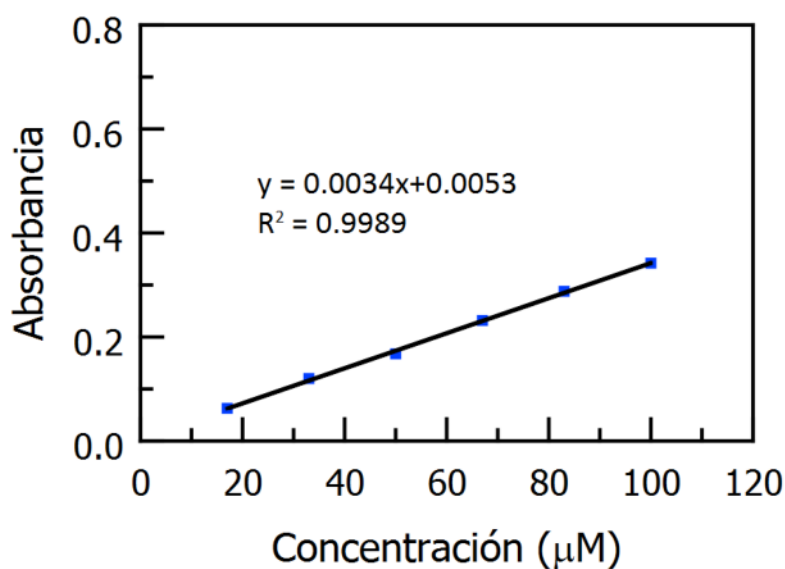


Figura 11. Curva de calibración de Cr(VI).

En la **Figura 12** se muestran los espectros de las 1:2 N:AgNp en presencia de Cr(VI) en concentraciones de 17 – 100 μM. Al igual que en el caso de las nanopartículas relación 1:1, se observa un incremento gradual en la absorbancia, acompañado de un desplazamiento hipsocrómico de la banda. Con el fin de verificar la eficiencia de la funcionalización se realizaron pruebas utilizando las AgNp sin funcionalizar.

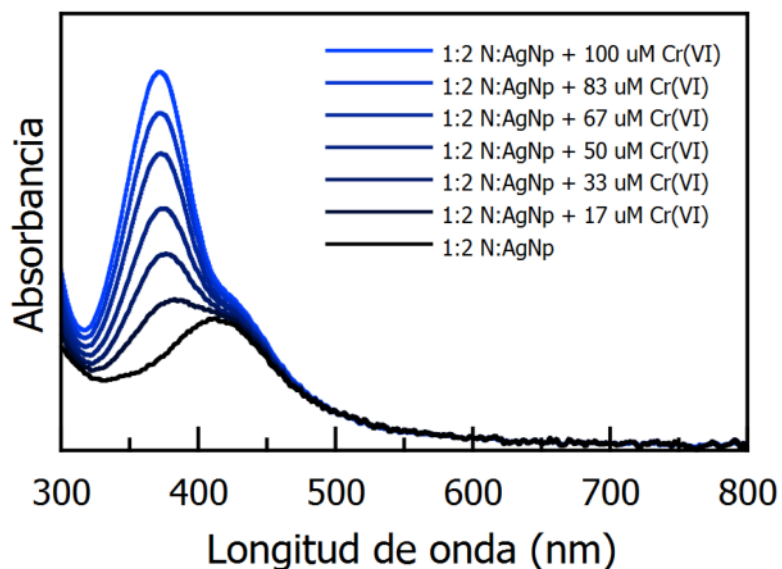


Figura 12. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata funcionalizadas con extracto acuoso de cáscara de nuez relación 1:2 en presencia de Cr(VI) en concentraciones 17, 33, 50, 67, 83 y 100 μM.

La AgNp en presencia de Cr(VI) (**Figura 13**) presentan un desplazamiento hipsocrómico de 400 a 360 nm, acompañado de un aumento gradual en la absorbancia. Este comportamiento es similar al observado en las nanopartículas funcionalizadas; por lo tanto, se realizaron curvas de calibración con el fin de comparar ambos sistemas y determinar cuál método presenta mayor precisión en la detección del analito.

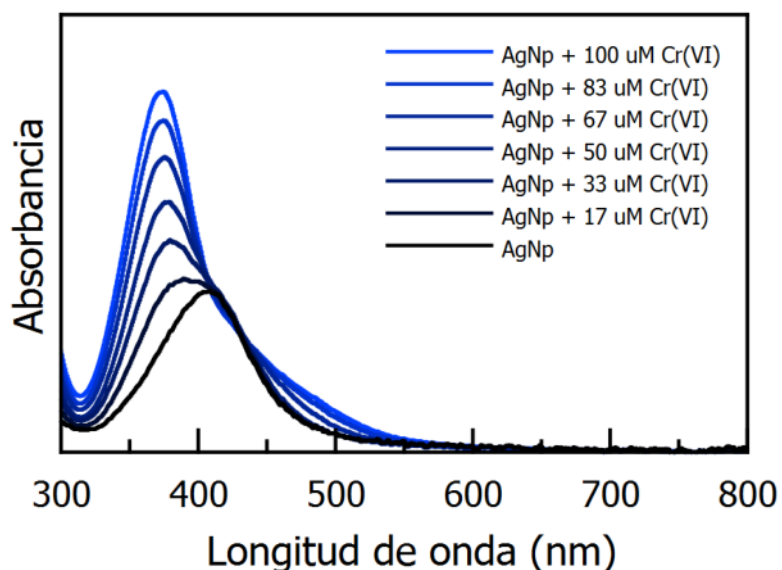


Figura 13. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata en presencia de Cr(VI) en concentraciones 17, 33, 50, 67, 83 y 100 μ M.

En las **Figuras 14** y **15** se presentan las curvas de calibración de las 1:2 N:AgNp en presencia de Cr(VI) y las AgNp en presencia de Cr(VI), respectivamente. En ambos casos se obtuvo una R^2 cercana a 1, con valores de 0.9979 para el caso de las 1:2 N:AgNp y 0.9939 para las AgNp. Estos resultados indican alta linealidad en ambos sistemas; sin embargo, las nanopartículas funcionalizadas de relación 1:2 presentan una respuesta ligeramente más eficiente para la detección de Cr(VI) que las AgNp sin funcionalizar.

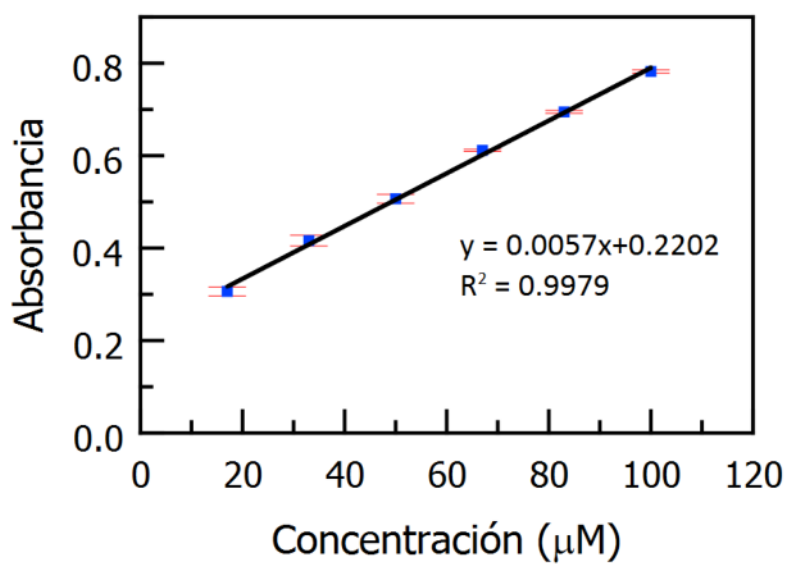


Figura 14. Curva de calibración de las 1:2 N:AgNp en presencia de Cr(VI).

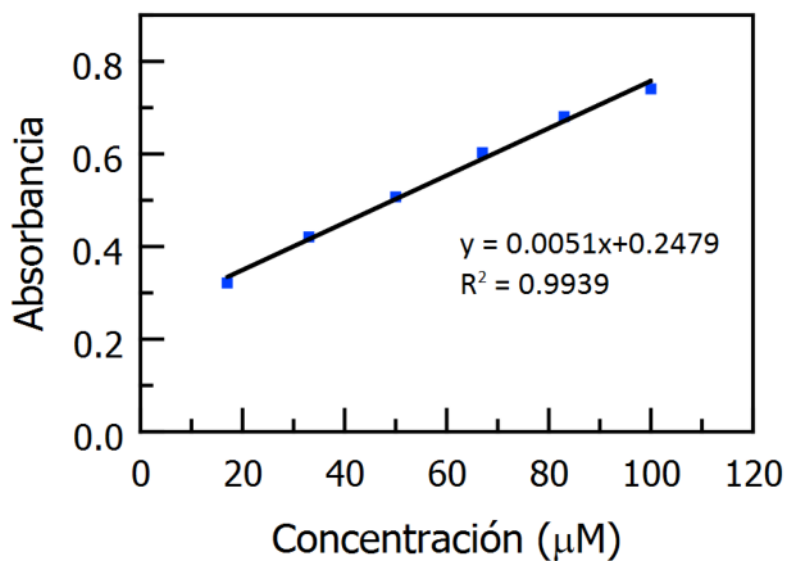


Figura 15. Curva de calibración de las AgNp en presencia de Cr(VI).

Después de realizar los análisis en presencia de Cr(VI), se continuó con el estudio de Vit B1. Debido a que los mejores resultados se obtuvieron con las nanopartículas funcionalizadas en relación 1:2, se decidió evaluar la Vit B1 únicamente con este sistema. Para ello, se realizó una prueba de linealidad, en el cual se observó que el rango lineal

de detección se encuentra entre 28 y 195 μM de concentración de vitamina B1 (**Figura 16**).

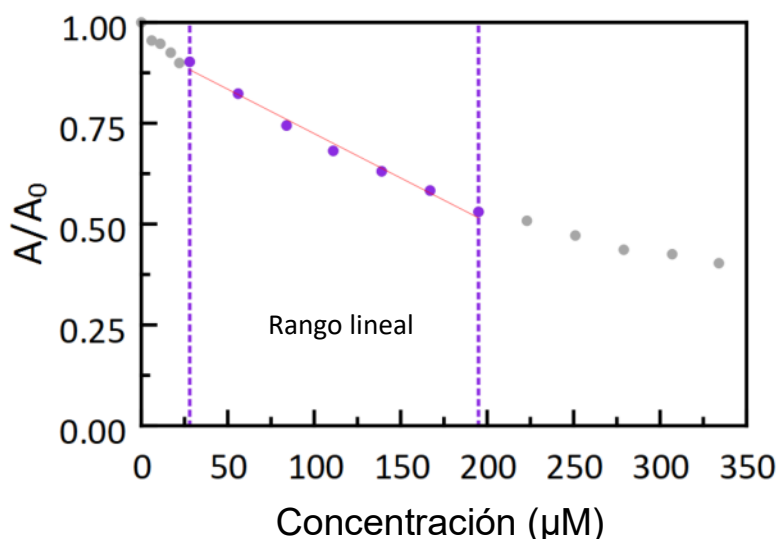


Figura 16. Prueba de linealidad para las nanopartículas de plata funcionalizadas.

En la **Figura 17**, se muestran los espectros de las 1:2 N:AgNp en presencia de Vit B1 en concentraciones que van desde 28 a 167 μM . Se aprecia que, conforme aumenta la concentración Vit B1, la intensidad de la banda disminuye gradualmente, lo cual es un comportamiento opuesto a lo observado con el Cr(VI). Además, en este caso la banda no presenta un desplazamiento.

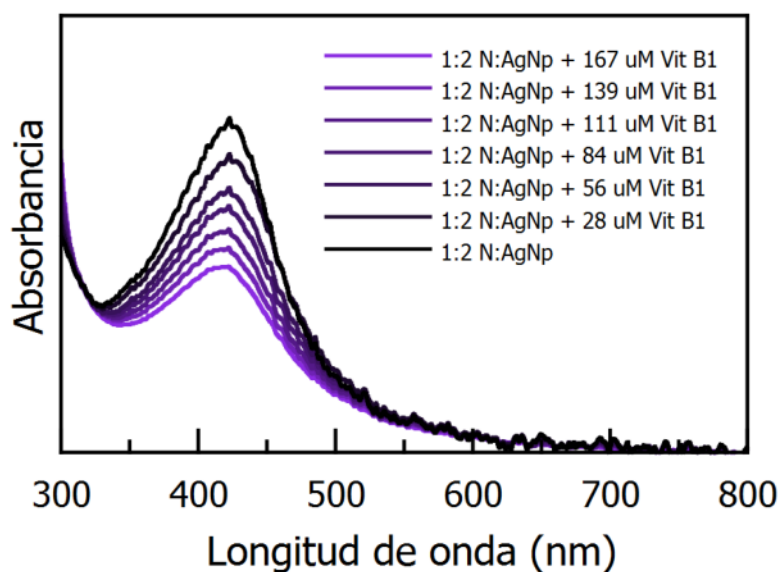


Figura 17. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata funcionalizadas con extracto acuoso de cáscara de nuez relación 1:2 en presencia de Vitamina B1 en concentraciones 28, 56, 84, 111, 139, 167 μM .

Con el fin de comprobar si la funcionalización con extracto acuoso de cáscara de nuez mejora la respuesta del sistema, se realizaron pruebas utilizando AgNp sin funcionalizar en presencia de Vit B1 (**Figura 18**). De manera similar a lo observado con las N:AgNp, las AgNp presentaron una disminución de la absorbancia conforme aumentaba la cantidad de Vit B1 presente en la muestra. No obstante, en este caso la disminución de la banda no fue tan uniforme como la observada para las nanopartículas funcionalizadas.

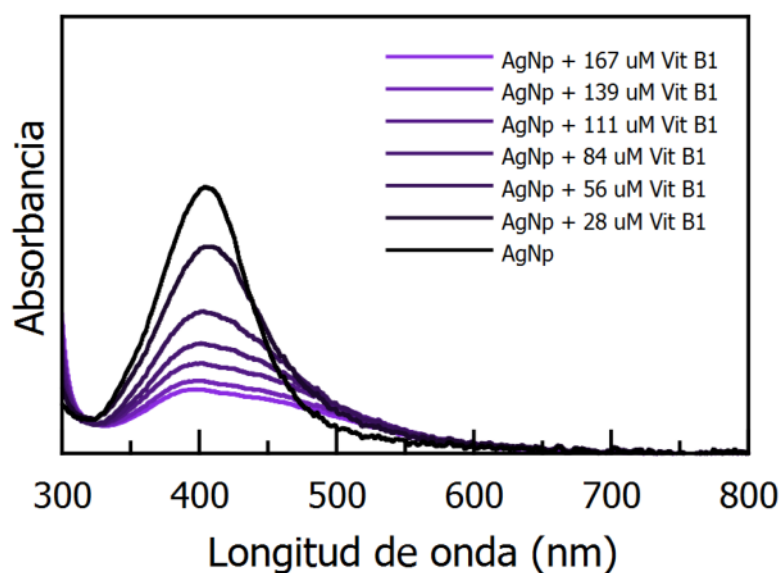


Figura 18. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata presencia de Vitamina B1 en concentraciones 28, 56, 84, 111, 139, 167 μM .

Se realizaron gráficas de la relación de absorbancia para las 1:2 N:AgNp (**Figura 19 b**) y para las AgNp (**Figura 19 a**), ambas en presencia de Vit B1, con el fin de comparar cuál sistema presenta una mayor precisión en la detección del analito.

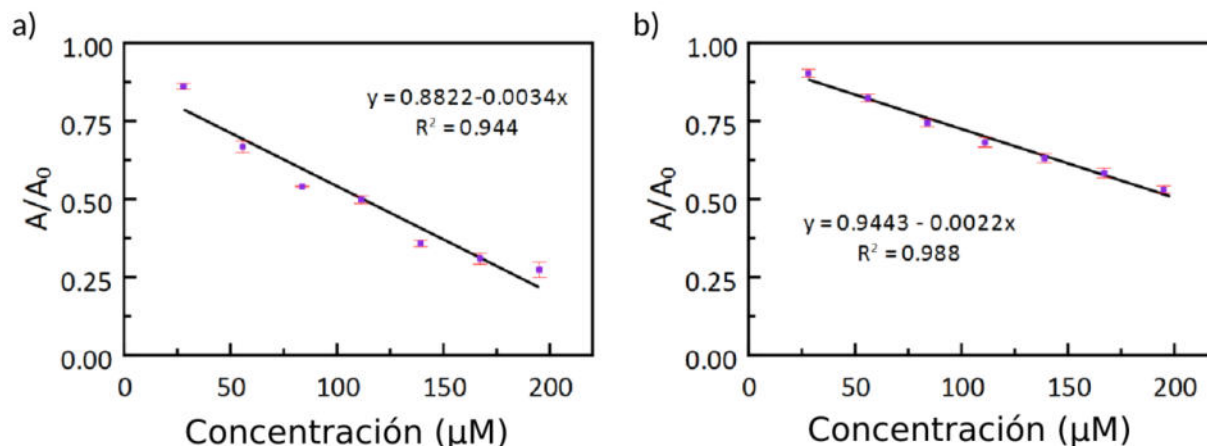


Figura 19. Gráfica de relación de absorbancia con a) AgNp y b) 1:2 N:AgNp.

Tras analizar los datos mediante el método de mínimos cuadrados, se observa que la funcionalización de las nanopartículas de Ag permite obtener un límite de detección (LOD, relación señal/ruido = 3) de $18.5 \mu M$ con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.988. En contraste, la detección colorimétrica de vitamina B1 con nanopartículas de plata no funcionalizadas presenta un LOD de $40.5 \mu M$ y un R^2 de 0.944. Estos resultados sugieren que las biomoléculas presentes en el extracto acuoso de cáscara de nuez pecana mejoran la detección colorimétrica de vitamina B1, al aumentar la linealidad y disminuir la concentración mínima detectable. Es probable que esta mejora esté relacionada con la interacción entre el ácido gálico adsorbido en la superficie de las nanopartículas y el anillo de tiazolio cargado positivamente de la vitamina B1.

La determinación colorimétrica de vitamina B1 con nanopartículas funcionalizadas también se realizó en condiciones ácidas (pH 4.4) y básicas (pH 9.1), utilizando HNO_3 y $NaOH$ para el ajuste del pH (**Figura 20 a**). La respuesta del sensor evidenció una linealidad deficiente en ambos casos, posiblemente debido a alteraciones en las interacciones responsables de la detección. En condiciones ácidas el ácido gálico se encuentra completamente protonado, lo que le impide que adquiera una carga negativa. Como consecuencia, se dificulta la interacción electrostática con la vitamina B1, que posee carga positiva, reduciendo la sensibilidad del sensor. En cambio, en condiciones básicas, un incremento en la concentración de iones hidróxido puede afectar la estabilidad coloidal de las nanopartículas de plata (63), favoreciendo su aglomeración y provocando una disminución en el rendimiento del sensor.

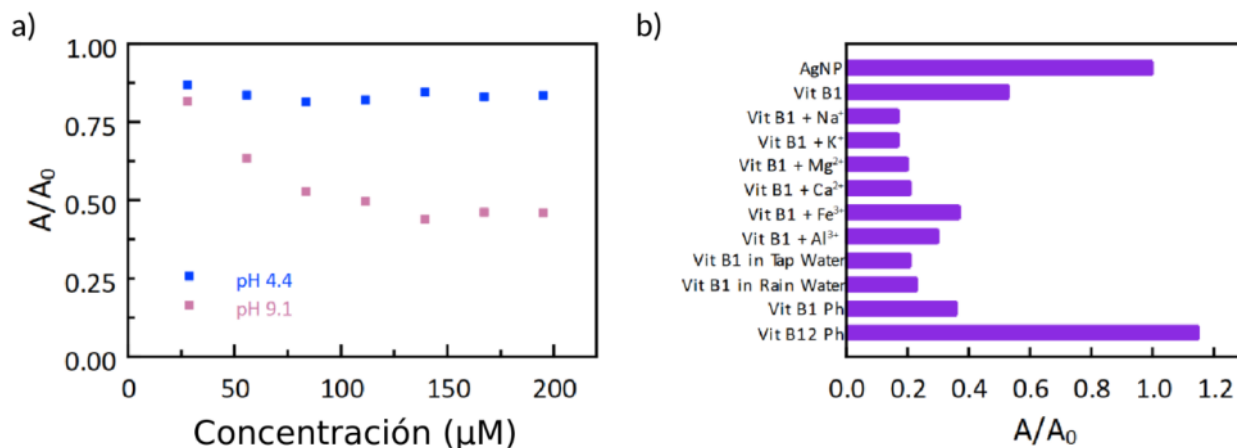


Figura 20. a) Efecto del pH y b) interferencias en el rendimiento del sensor.

Se evaluó el funcionamiento del sensor en condiciones más cercanas a sistemas reales (**Figura 20 b**), considerando la posible interferencia de diferentes iones metálicos. Curiosamente, la detección colorimétrica de la vitamina B1 mejoró en presencia de estos iones. Esta observación es consistente con la bibliografía, puesto que se conoce que los valores de pKa de la vitamina B1 son dependientes de la fuerza iónica del medio(64).

Posteriormente, se logró analizar la vitamina B1 en muestras reales de agua, específicamente en agua lluvia y agua potable. Los resultados mostraron que el rendimiento del sensor en estas matrices fue consistente con los hallazgos de nuestro estudio de interferencia. Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de cationes monovalentes y divalentes comunes en estas muestras de agua, los cuales, como se observó previamente, no afectan negativamente la respuesta del sensor e incluso pueden mejorar la detección. Finalmente, se analizó la vitamina B1 en una muestra preparada a partir de una formulación farmacéutica disuelta en agua destilada. La detección de la vitamina B1 fue positiva, con una relación de absorbancia (A/A_0) menor que la de la vitamina B1 pura. Esto puede deberse a la presencia de algunas sales, como el estearato de magnesio, comúnmente utilizado como excipiente en formulaciones farmacéuticas. Por el contrario, no fue posible la detección de vitamina B12 en una presentación farmacéutica, lo que demuestra una selectividad del sensor hacia la vitamina B1.

Para determinar la relevancia y competitividad de los resultados obtenidos, estos se compararon con diversos sistemas de detección reportados previamente en la literatura (ver **Tabla 15**).

Tabla 15. Comparación de las características analíticas de trabajos publicados anteriormente para la determinación de vitamina B1.

Referencias	Nanopartículas	Método	Rango lineal (μM)	LOD (μM)	Coefficiente de correlación (R^2)
(65)	AuNp modificadas con L-cisteína	Colorimétrico	74.2 – 1.5x10 ³	20.8	0.992
Este trabajo	AuNp funcionalizadas con extracto de cáscara de nuez pecana	Colorimétrico	28 – 195	18.5	0.988
(66)	Nanoflores de Ag@Ag ₂ O con morfología funcionalizadas con L-triptófano.	Colorimétrico	3 – 60	1.92	0.993
(67)	AgNp recubiertas de glutatión	Colorimétrico	4 – 12	0.05	-
(68)	AgNp recubiertas con maltol	Colorimétrico	0 – 1	0.038	0.9959
(69)	AgNp precubiertas con citrato	Colorimétrico	7.5x10 ⁻⁴ - 50	4.2x10 ⁻⁴	-
(70)	MOF a base de cobre (HKUST-1)	Fluorométrico	4 – 700	1	0.99821
(71)	Y ₂ O ₃ : Eu	Fluorométrico	0 – 44	0.144	0.994
(72)	MnO ₂ nanohojas	Fluorométrico	0.01 – 5	5x10 ⁻³	0.9965
(73)	-	HPLC	7x10 ⁻⁴ – 2x10 ⁻¹	6x10 ⁻⁵	0.986

4.3. SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE ORO

Se realizaron análisis de UV-vis de las AuNp sintetizadas, de los extractos obtenidos, de las nanopartículas funcionalizadas con dichos extractos y de las muestras en presencia de distintos analitos. En la **Figura 21** se observa el UV-vis de las AuNp sintetizadas mediante reducción química, las cuales presentan una banda de LSPR a 520 nm. Esta banda es característica de las nanopartículas de oro que rondan en un tamaño de 5 a 20 nm.

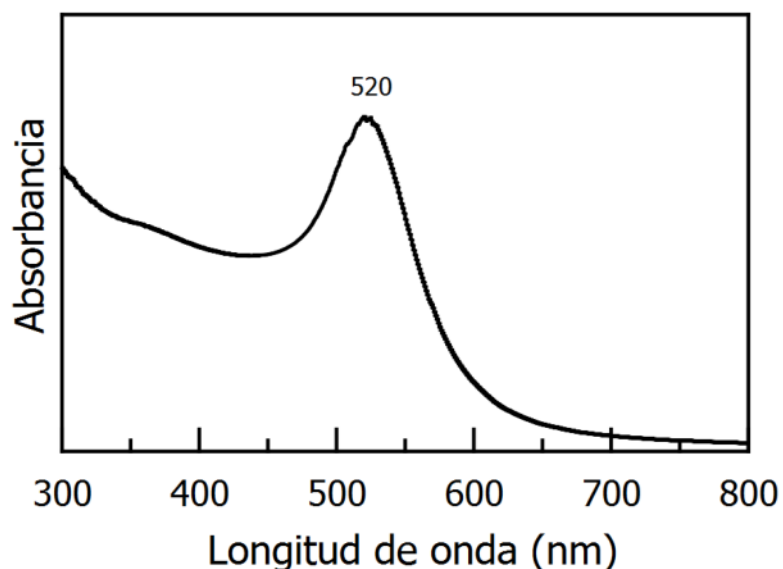


Figura 21. Espectro UV-vis de nanopartículas de oro sintetizadas.

Se realizó el análisis de las AuNp mediante microscopía electrónica de barrido en modo STEM (microscopía electrónica de transmisión de barrido) (**Figura 21**) lo que permitió determinar un tamaño promedio de partícula de 16.8 nm. Este resultado presenta una adecuada correlación con la respuesta óptica observada mediante espectroscopía UV-vis. Asimismo, las micrografías obtenidas evidenciaron una morfología predominantemente esférica y relativamente homogénea, lo que sugiere un proceso de síntesis con un buen control de la morfología.

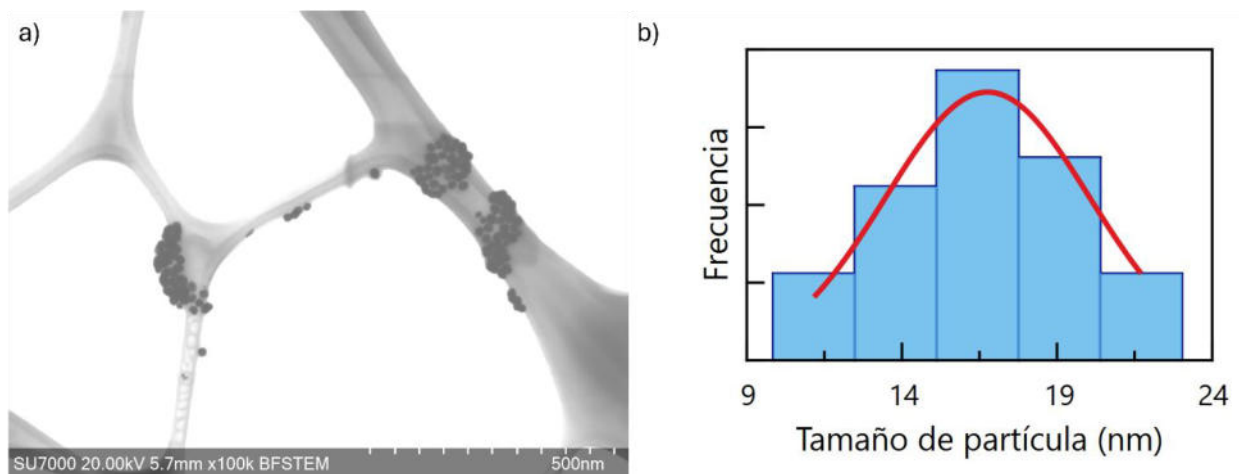


Figura 22. Imagen de microscopía electrónica de barrido modo STEM e histograma de las nanopartículas de oro

En la **Figura 23** se muestra la micrografía TEM de las AuNp sintetizadas. La síntesis conduce a la obtención de partículas con morfología esférica. El inciso (a) presenta la imagen TEM en campo claro, mientras que el inciso (b) muestra el SAED, lo que revela que las partículas son cristalinas. Los anillos de difracción se pueden indexar en función de la estructura FCC del oro. Los cuatro anillos observados corresponden a las reflexiones de los planos reticulares (111), (200), (220) y (311) del oro FCC, respectivamente, similar a lo reportado por Oksana Velgosova *et al.* en su artículo (74).

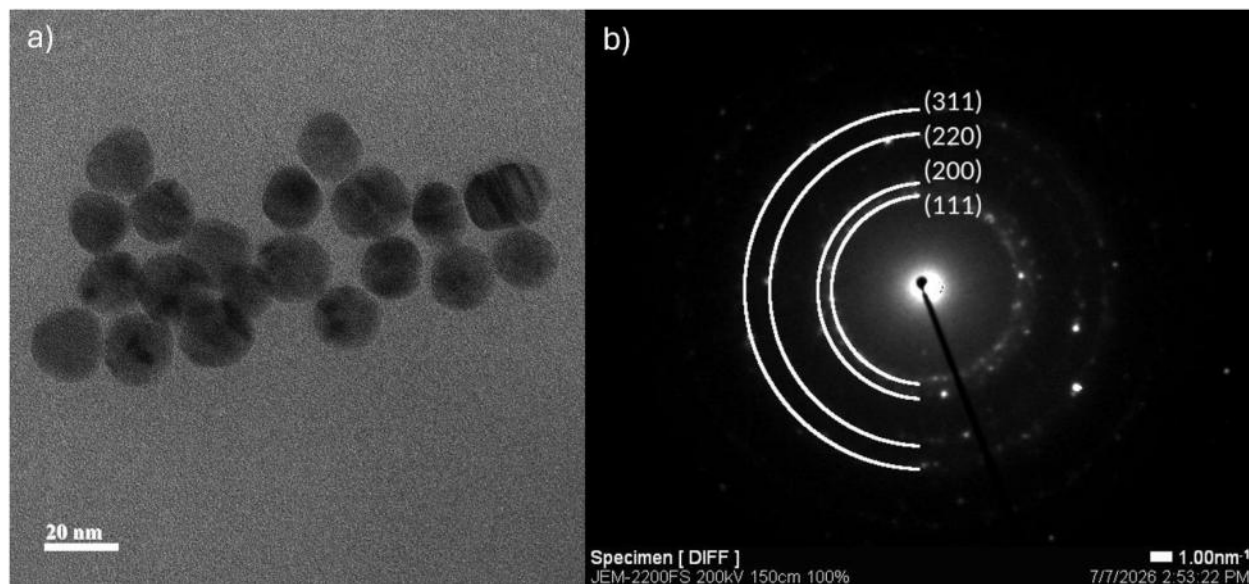


Figura 23. a) Imagen de microscopía electrónica de transmisión (TEM) y b) Difracción de electrones de área seleccionada (SAED) de las nanopartículas de oro sintetizadas.

4.4. FUNCIONALIZACIÓN CON EXTRACTO DE CÁSCARA DE NUEZ

En la **Figura 24** se presentan los espectros UV-vis de las AuNp funcionalizadas en relación 1:1 y 1:2. Se puede observar que en ambas ocurre una disminución en la absorbancia de la banda plasmónica, mientras que la posición del máximo de absorción se mantiene en la longitud de onda característica de las AuNp. Este comportamiento sugiere que, aunque la funcionalización modifica el entorno superficial de las nanopartículas, no induce cambios significativos en su tamaño, morfología o estado de agregación. La disminución en la intensidad de la banda puede atribuirse a la adsorción de las biomoléculas provenientes del extracto sobre la superficie de las nanopartículas, lo que altera el entorno dieléctrico local y, por ende, su respuesta óptica.

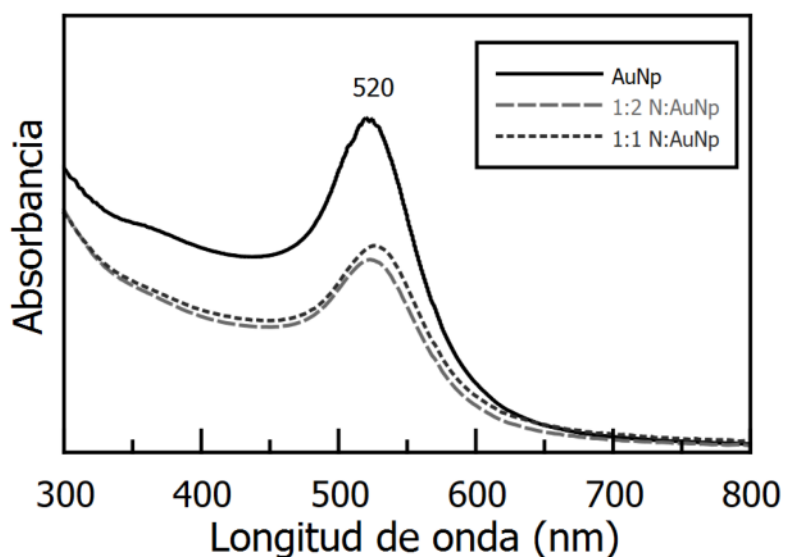


Figura 24. Espectro UV-vis de las nanopartículas de plata funcionalizadas con extracto acuoso de cáscara de nuez en relación 1:1 y 1:2.

Debido a que los mejores resultados se obtuvieron con las nanopartículas funcionalizadas en relación 1:1, se decidió evaluar la Vit B1 únicamente con este sistema. Para ello, se realizó una prueba de linealidad, en el cual se observó que el rango lineal de detección se encuentra entre 11 a 167 μM de concentración de vitamina B1 (**Figura 25**).

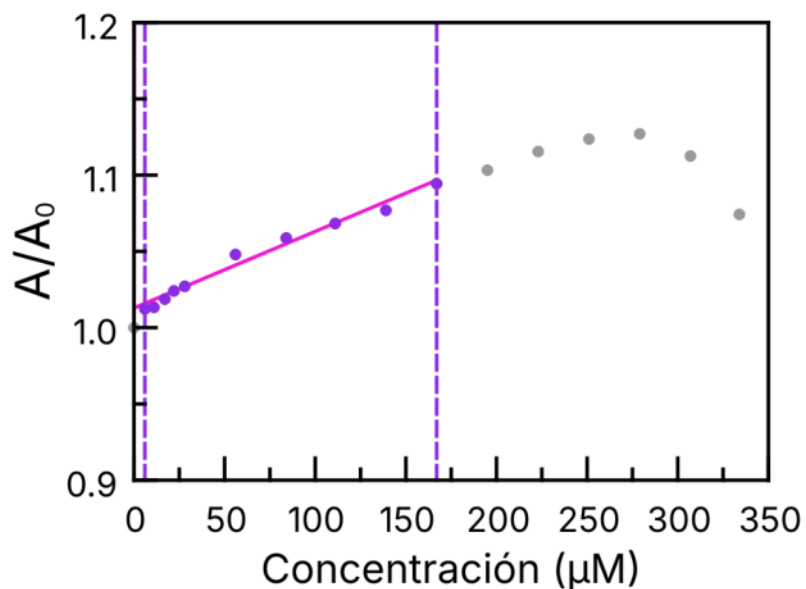


Figura 25. Prueba de linealidad para las nanopartículas de oro funcionalizadas.

4.5. ANÁLISIS DE LAS NANOPARTÍCULAS AuNp Y N:AuNp EN PRESENCIA DE VITAMINA B1.

Se realizó esta misma prueba en presencia de N:AuNp relación 1:1 (**Figura 26**). Estas nanopartículas presentaron un aumento gradual de la absorbancia conforme se aumentaba la concentración de Vit B1 presente en la muestra, lo cual es un comportamiento contrario a lo observado con las nanopartículas de plata, posteriormente realizamos el análisis de las AuNp en presencia de Vit B1.

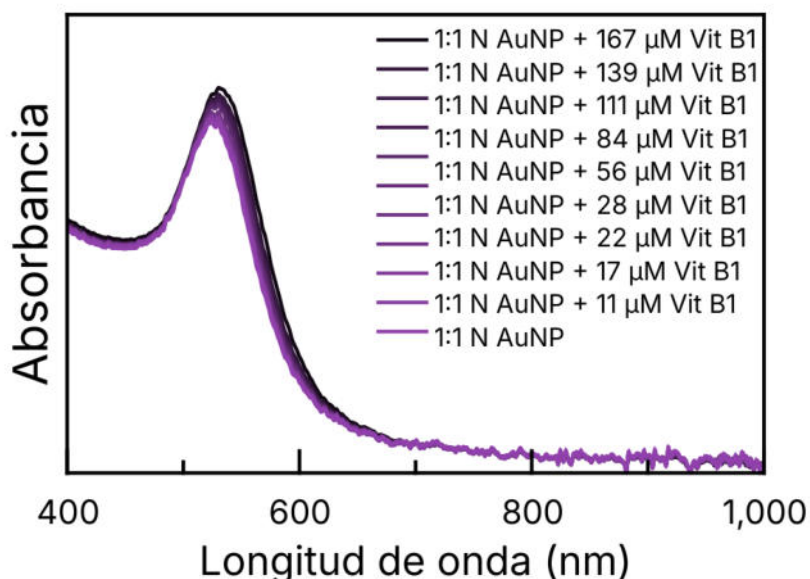


Figura 26. Espectro UV-vis de las nanopartículas de oro funcionalizadas con extracto acuoso de cáscara de nuez relación 1:1 en presencia de vitamina B1 en concentraciones de 11, 17, 22, 28, 56, 84, 111, 139, 167 μM .

En la **Figura 27** se observa el comportamiento de las AuNP en presencia de las distintas concentraciones de Vit B1 el comportamiento presentado por dichas nanopartículas no es correspondiente a un comportamiento lineal por lo cual podemos decir que la funcionalización con extracto de cascara de nuez pecana mejora la respuesta del sensor ante este analito.

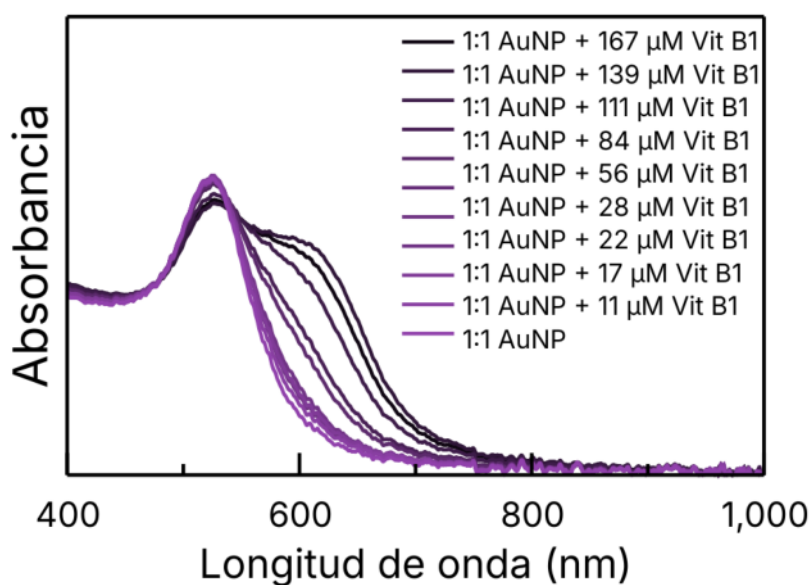


Figura 27. Espectro UV-vis de las nanopartículas de oro sin funcionalizar con relación 1:1 con agua en presencia de vitamina B1 en concentraciones 11, 17, 22, 28, 56, 84, 111, 139, 167 μM .

Tras analizar los datos mediante el método de mínimos cuadrados, se observa que la funcionalización de las nanopartículas de Au permite obtener un límite de detección (LOD, relación señal/ruido = 3) de 12.43 μM con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9811(Figura 29).

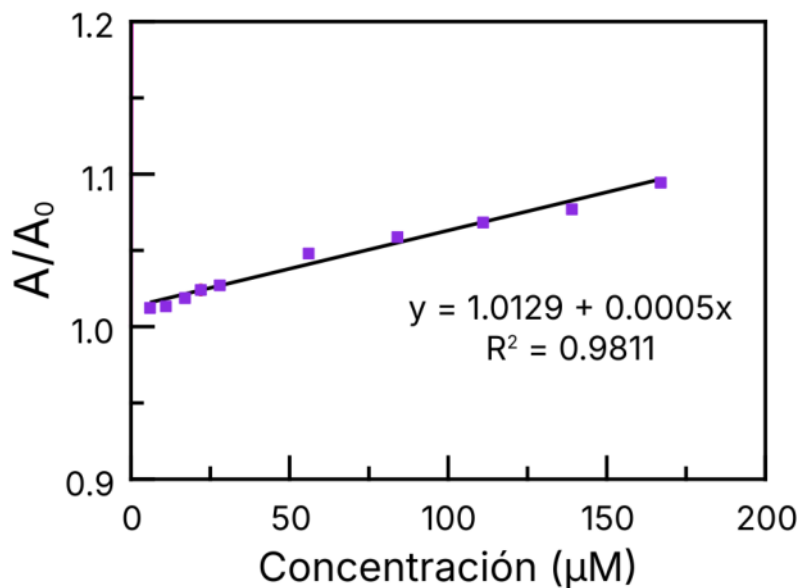


Figura 28. Curva de linealidad de 1:1N:AuNp.

Con el fin de establecer la pertinencia y competitividad de los resultados logrados, se realizó una comparación con sistemas de detección publicados recientemente. La **Tabla 16** resume las propiedades más relevantes de estos métodos, como el tipo de nanopartícula utilizada y la detección límite, además de los hallazgos obtenidos en este estudio.

Tabla 16. Comparación de las características analíticas de trabajos publicados anteriormente para la determinación de vitamina B1.

Referencias	Nanopartículas	Método	Rango lineal (μM)	LOD (μM)	Coefficiente de correlación (R^2)
(75)	AuNP	Colorimétrico	0.0377–3.015	0.0253	0.9843
Este trabajo	AuNP Funcionalizadas con extracto de cascara de nuez	Colorimétrico	11 - 167	12.43	0.9811
(76)	Nanopartículas poliméricas integradas con módulos fluorescentes de transferencia de intramolecular de protones en estado excitado	Fluorométrico	0.1–25	0.0026	0.9946
(77)	Sensores 3D basados en nanopartículas de oro y nanografeno integrados en miniplateformas para la detección de tiamina (PIX/AuNPsnGr)	Electroquímico	0.000001–10	3.0×10^{-7}	0.9916
(78)	-	Adsorción cronopotenciométrica	18.84 – 188.43	0.0253	0.9980
(79)	Puntos cuánticos de carbono dopados con nitrógeno	Fluorométrico	0.2 - 2.0 μM	0.030 μM	0.9987
(73)	-	HPLC	7×10^{-4} – 2×10^{-1}	6×10^{-5}	0.986

CAPÍTULO

5. CONCLUSIONES

Se logró la síntesis de nanopartículas de plata y oro mediante métodos de reducción química. Las AgNp, presentaron una banda de LSPR a 404 nm y una morfología predominantemente esférica con un tamaño promedio de 8.2 nm. La fase cristalina determinada mediante SAED corresponde a la estructura FCC de la plata, donde los anillos de difracción se asocian a los planos reticulares (111), (200), (220) y (311). Por su parte, las AuNp exhibieron una banda LSPR de 520 nm, característica para las nanopartículas de oro y un tamaño promedio de 16.8 nm. La fase cristalina determinada mediante SAED corresponde a la estructura FCC del oro, donde los anillos de difracción se asocian a los planos reticulares (111), (200), (220) y (311).

Se obtuvieron extractos acuosos de cáscara de nuez pecana, cuyo análisis espectroscópico reveló la presencia de compuestos fenólicos, como ácido gálico y ácido elágico, los cuales actúan como agentes estabilizantes y moduladores de la respuesta óptica de las nanopartículas.

La funcionalización en las AgNp provocó cambios en la banda LSPR, asociados a variaciones en el entorno dieléctrico, así como a posibles procesos de agregación y/o crecimiento de las nanopartículas. En el caso de las N:AgNp, se observó un desplazamiento batocrómico de la banda LSPR de 404 nm a 422 nm, acompañado de un aumento de la absorbancia, y un ensanchamiento significativo (FWHM), lo que evidencia modificaciones en el entorno superficial de las nanopartículas derivadas de la adsorción de biomoléculas.

La funcionalización en las AuNp provocó una disminución de la absorbancia de las nanopartículas puede atribuirse a la adsorción de las biomoléculas provenientes del extracto sobre la superficie de las nanopartículas.

Las nanopartículas funcionalizadas de AgNp mostraron una respuesta diferenciada dependiendo del analito y del sistema. Los mejores resultados se obtuvieron para Cr(VI) y vitamina B1. En el caso del Cr(VI) demostraron que es posible detectarlo sin la utilización de las N:AgNp, sin embargo, el uso de estas podría mejorar el límite de detección.

La detección colorimétrica de vitamina B1 utilizando N:AgNp en relación 1:2, presentó un LOD de 18.5 μM y un R_2 de 0.988, lo que representa una mejora notable en comparación con la detección con nanopartículas no funcionalizadas, que arroja un LOD de 40.5 μM y un R_2 de 0.944. Estos resultados indican que la funcionalización con biomoléculas mejora la sensibilidad y la linealidad del sistema.

Adicionalmente, este sistema demostró ser funcional en matrices reales, como agua potable y de lluvia, manteniendo una respuesta consistente y evidenciando su potencial

aplicación práctica. La selectividad hacia vitamina B1 frente a vitamina B12 refuerza la especificidad del sensor desarrollado.

La detección colorimétrica de vitamina B1 utilizando N:AuNp en relación 1:1, presentó un LOD de 12.43 μM y un R_2 de 0.9811, comparado con las AuNp las cuales no presentan un comportamiento lineal. Estos resultados indican que la funcionalización con biomoléculas mejora la sensibilidad y la linealidad del sistema.

CAPÍTULO

6.REFERENCIAS

1. Ukaogo PO, Ewuzie U, Onwuka CV. Environmental pollution: causes, effects, and remedies. En: Microorganisms for Sustainable Environment and Health [Internet]. Elsevier; 2020 [citado 13 de octubre de 2024]. p. 419-29. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128190012000218> doi:10.1016/B978-0-12-819001-2.00021-8
2. Staff I. IMCO [Internet]. 2023 [citado 25 de octubre de 2024]. Situación del agua en México. Disponible en: <https://imco.org.mx/situacion-del-agua-en-mexico/>
3. Agua CN del. gob.mx [Internet]. [citado 25 de octubre de 2024]. Indicadores de Calidad del Agua. Disponible en: <http://www.gob.mx/conagua/articulos/indicadores-de-calidad-del-agua>
4. Proposito P, Burratti L, Venditti I. Silver Nanoparticles as Colorimetric Sensors for Water Pollutants. Chemosensors. 31 de marzo de 2020;8(2):26. doi:10.3390/chemosensors8020026
5. Jurczynski Y, Passos R, Campos LC. A Review of the Most Concerning Chemical Contaminants in Drinking Water for Human Health. Sustainability. 19 de agosto de 2024;16(16):7107. doi:10.3390/su16167107
6. Morin-Crini N, Lichtfouse E, Liu G, Balaram V, Ribeiro ARL, Lu Z, et al. Worldwide cases of water pollution by emerging contaminants: a review. Environ Chem Lett. 1 de agosto de 2022;20(4):2311-38. doi:10.1007/s10311-022-01447-4
7. Kidd KA, Blanchfield PJ, Mills KH, Palace VP, Evans RE, Lazorchak JM, et al. Collapse of a fish population after exposure to a synthetic estrogen. Proc Natl Acad Sci U S A. 22 de mayo de 2007;104(21):8897-901. doi:w PubMed PMID: 17517636; PubMed Central PMCID: PMC1874224.
8. Wellington EMH, Boxall AB, Cross P, Feil EJ, Gaze WH, Hawkey PM, et al. The role of the natural environment in the emergence of antibiotic resistance in gram-negative bacteria. Lancet Infect Dis. febrero de 2013;13(2):155-65. doi:10.1016/S1473-3099(12)70317-1 PubMed PMID: 23347633.
9. Brodin T, Fick J, Jonsson M, Klaminder J. Dilute Concentrations of a Psychiatric Drug Alter Behavior of Fish from Natural Populations. Science. 15 de febrero de 2013;339(6121):814-5. doi:10.1126/science.1226850
10. Horký P, Grabic R, Grabicová K, Brooks BW, Douda K, Slavík O, et al. Methamphetamine pollution elicits addiction in wild fish. J Exp Biol. 1 de julio de 2021;224(13):jeb242145. doi:10.1242/jeb.242145
11. Giono-Cerezo S, Santos-Preciado JI, Morfín-Otero MDR, Torres-López FJ, Alcántar-Curiel MD. Resistencia antimicrobiana. Importancia y esfuerzos por contenerla. Gac Médica México. 19 de febrero de 2020;156(2):3610. doi:10.24875/GMM.20005624

12. Research C for DE and. Fluoroquinolone Antimicrobial Drugs Information. FDA [Internet]. 18 de marzo de 2026 [citado 24 de marzo de 2026]. Disponible en: <https://www.fda.gov/drugs/information-drug-class/fluoroquinolone-antimicrobial-drugs-information>
13. Carlucci AF, Bowes PM. DETERMINATION OF VITAMIN B₁₂, THIAMINE, AND BIOTIN IN LAKE TAHOE WATERS USING MODIFIED MARINE BIOASSAY TECHNIQUES1. *Limnol Oceanogr.* septiembre de 1972;17(5):774-7. doi:10.4319/lo.1972.17.5.0774
14. Gobler C, Norman C, Panzeca C, Taylor G, Sanudo-Wilhelmy S. Effect of B-vitamins (B-1, B-12) and inorganic nutrients on algal bloom dynamics in a coastal ecosystem. *Aquat Microb Ecol.* 15 de noviembre de 2007;49:181-94. doi:10.3354/ame01132
15. Croft MT, Warren MJ, Smith AG. Algae need their vitamins. *Eukaryot Cell.* agosto de 2006;5(8):1175-83. doi:10.1128/EC.00097-06 PubMed PMID: 16896203; PubMed Central PMCID: PMC1539151.
16. Sañudo-Wilhelmy SA, Gómez-Consarnau L, Suffridge C, Webb EA. The role of B vitamins in marine biogeochemistry. *Annu Rev Mar Sci.* 2014;6:339-67. doi:10.1146/annurev-marine-120710-100912 PubMed PMID: 24050603.
17. Manzetti S, Zhang J, van der Spoel D. Thiamin Function, Metabolism, Uptake, and Transport. *Biochemistry.* 11 de febrero de 2014;53(5):821-35. doi:10.1021/bi401618y
18. Kraft CE, Angert ER. Competition for vitamin B1 (thiamin) structures numerous ecological interactions. *Q Rev Biol.* junio de 2017;92(2):151-68. doi:10.1086/692168 PubMed PMID: 29562121.
19. Paerl RW, Sundh J, Tan D, Svenningsen SL, Hylander S, Pinhassi J, et al. Prevalent reliance of bacterioplankton on exogenous vitamin B1 and precursor availability. *Proc Natl Acad Sci.* 30 de octubre de 2018;115(44). doi:10.1073/pnas.1806425115
20. Wang B, Kraft CE. Thiamine limitation of periphyton in Adirondack Mountain streams. *Limnol Oceanogr.* 2021;66(8):2988-98. doi:10.1002/lno.11853
21. Barada LP, Cutter L, Montoya JP, Webb EA, Capone DG, Sañudo-Wilhelmy SA. The distribution of thiamin and pyridoxine in the western tropical North Atlantic Amazon River plume. *Front Microbiol.* 2013;4. doi:10.3389/fmicb.2013.00025
22. Walker DB, Baumgartner DJ, Gerba CP, Fitzsimmons K. Surface Water Pollution. En: *Environmental and Pollution Science* [Internet]. Elsevier; 2019 [citado 1 de octubre de 2023]. p. 261-92. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128147191000161> doi:10.1016/B978-0-12-814719-1.00016-1
23. Briffa J, Sinagra E, Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon.* septiembre de 2020;6(9):e04691. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e04691
24. Abo Markeb A, Moral-Vico J, Sánchez A, Font X. Optimization of lead (II) removal from water and wastewater using a novel magnetic nanocomposite of aminopropyl triethoxysilane coated with carboxymethyl cellulose cross-linked with chitosan nanoparticles. *Arab J Chem.* 1 de agosto de 2023;16(8):105022. doi:10.1016/j.arabjc.2023.105022

25. Zannotti M, Piras S, Magnaghi LR, Biesuz R, Giovannetti R. Silver nanoparticles from orange peel extract: Colorimetric detection of Pb²⁺ and Cd²⁺ ions with a chemometric approach. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc.* diciembre de 2024;323:124881. doi:10.1016/j.saa.2024.124881
26. ToxFAQsTM: Cromo (Chromium) | ToxFAQ | ATSDR [Internet]. 2021 [citado 13 de octubre de 2024]. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts7.html
27. Proposition 65 Warnings Website [Internet]. [citado 25 de octubre de 2024]. Chromium (Hexavalent Compounds) - (Chromium 6, Chromium VI). Disponible en: <https://www.p65warnings.ca.gov/factsheets/chromium-hexavalent-compounds-chromium-6-chromium-vi>
28. Otero-Romaní J, Moreda-Piñeiro A, Bermejo-Barrera P, Martin-Esteban A. Inductively coupled plasma–optical emission spectrometry/mass spectrometry for the determination of Cu, Ni, Pb and Zn in seawater after ionic imprinted polymer based solid phase extraction. *Talanta.* 15 de agosto de 2009;79(3):723-9. doi:10.1016/j.talanta.2009.04.066
29. Prasada Rao T, Karthikeyan S, Vijayalekshmy B, Iyer CSP. Speciative determination of chromium(VI) and chromium(III) using flow-injection on-line preconcentration and flame atomic-absorption spectrometric detection. *Anal Chim Acta.* 10 de agosto de 1998;369(1):69-77. doi:10.1016/S0003-2670(98)00229-3
30. Zeng W, Hu Z, Luo J, Hou X, Jiang X. Highly sensitive determination of trace antimony in water samples by cobalt ion enhanced photochemical vapor generation coupled with atomic fluorescence spectrometry or ICP-MS. *Anal Chim Acta.* 25 de enero de 2022;1191:339361. doi:10.1016/j.aca.2021.339361
31. Jin M, Yuan H, Liu B, Peng J, Xu L, Yang D. Review of the distribution and detection methods of heavy metals in the environment. *Anal Methods.* 23 de diciembre de 2020;12(48):5747-66. doi:10.1039/D0AY01577F
32. Rasheed T, Bilal M, Nabeel F, Adeel M, M.N. Iqbal H. Environmentally-related contaminants of high concern: Potential sources and analytical modalities for detection, quantification, and treatment. *Environ Int.* 1 de enero de 2019;122:52-66. doi:10.1016/j.envint.2018.11.038
33. Garcia S, Perez RM. Applications of Liquid Chromatography with Fluorescence Detector Diodes and the Analysis of Environmental Pollutants; Aplicaciones de la Cromatografía Líquida con Detector de Diodos y Fluorescencia al Análisis de Contaminantes Medioambientales [Internet]. abril de 2012 [citado 25 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21542036>
34. Kamruzzaman M, Alam AM, Kim KM, Lee SH, Suh YS, Kim YH, et al. Enhanced luminescence of lanthanide complexes by silver nanoparticles for ciprofloxacin determination. *J Nanosci Nanotechnol.* julio de 2012;12(7):6125-30. doi:10.1166/jnn.2012.6360 PubMed PMID: 22966720.
35. Localized Surface Plasmon Resonance - an overview | ScienceDirect Topics [Internet]. [citado 4 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/localized-surface-plasmon-resonance>
36. Damborský P, Švitel J, Katrlík J. Optical biosensors. Estrela P, editor. *Essays Biochem.* 30 de junio de 2016;60(1):91-100. doi:10.1042/EBC20150010

37. Yeh YC, Creran B, Rotello VM. Gold nanoparticles: preparation, properties, and applications in bionanotechnology. *Nanoscale*. 1 de marzo de 2012;4(6):1871-80. doi:10.1039/C1NR11188D
38. Ally N, Gumbi B. A review on metal nanoparticles as nano-sensors for environmental detection of emerging contaminants. *Mater Today Proc*. 8 de agosto de 2023. doi:10.1016/j.matpr.2023.08.032
39. Zhao X, Zhao H, Yan L, Li N, Shi J, Jiang C. Recent Developments in Detection Using Noble Metal Nanoparticles. *Crit Rev Anal Chem*. 3 de marzo de 2020;50(2):97-110. doi:10.1080/10408347.2019.1576496
40. Baranwal A, Srivastava A, Kumar P, Bajpai VK, Maurya PK, Chandra P. Prospects of Nanostructure Materials and Their Composites as Antimicrobial Agents. *Front Microbiol*. 9 de marzo de 2018;9:422. doi:10.3389/fmicb.2018.00422
41. Alberti G, Zanoni C, Magnaghi LR, Biesuz R. Gold and Silver Nanoparticle-Based Colorimetric Sensors: New Trends and Applications. *Chemosensors*. 26 de octubre de 2021;9(11):305. doi:10.3390/chemosensors9110305
42. Omotonoko JLY, Polozola M, Svyantek A, Wang Z. Valorization and Environmental Impacts of Pecan Waste: A Critical Review. *Foods*. 4 de enero de 2026;15(1):168. doi:10.3390/foods15010168
43. Ezeanolue IR, George J, Ohioze PA, Oyeniyi OO, Elechi JOG, Loizzo MR, et al. Pecan (*Carya illinoensis*) Shells as a Source of Antioxidants: Implications for Oxidative Stress-Driven Pathologies. *Molecules*. 16 de marzo de 2026;31(6):993. doi:10.3390/molecules31060993
44. Argenziano R, Agustin-Salazar S, Panaro A, Calarco A, Di Salle A, Aprea P, et al. Combining the Potent Reducing Properties of Pecan Nutshell with a Solvent-Free Mechanochemical Approach for Synthesizing High Ag⁰ Content-Silver Nanoparticles: An Eco-Friendly Route to an Efficient Multifunctional Photocatalytic, Antibacterial, and Antioxidant Material. *Nanomaterials*. enero de 2023;13(5):821. doi:10.3390/nano13050821
45. Reynoso R, Garcia FA, Morales D, Gonzalez De Mejia E. Stability of Betalain Pigments from a Cactacea Fruit. *J Agric Food Chem*. 1 de agosto de 1997;45(8):2884-9. doi:10.1021/jf960804r
46. Putri LA, Prabowo YD, Dewi DMM, Mumtazah Z, Adila FP, Fadillah G, et al. Review of Noble Metal Nanoparticle-Based Colorimetric Sensors for Food Safety Monitoring. *ACS Appl Nano Mater*. 13 de septiembre de 2024;7(17):19821-53. doi:10.1021/acsanm.4c04327
47. Singh J, Dutta T, Kim KH, Rawat M, Samddar P, Kumar P. 'Green' synthesis of metals and their oxide nanoparticles: applications for environmental remediation. *J Nanobiotechnology*. diciembre de 2018;16(1):84. doi:10.1186/s12951-018-0408-4
48. Agnihotri S, Mukherji S, Mukherji S. Size-controlled silver nanoparticles synthesized over the range 5–100 nm using the same protocol and their antibacterial efficacy. *RSC Adv*. 2014;4(8):3974-83. doi:10.1039/C3RA44507K
49. Harke SS, Patil RV, Dar MA, Pandit SR, Pawar KD. Functionalization of biogenic silver nanoparticles with Vitamin B12 for the detection of iron in food samples. *Food Chem Adv*. octubre de 2022;1:100017. doi:10.1016/j.focha.2022.100017

50. Wu SP, Chen YP, Sung YM. Colorimetric detection of Fe³⁺ ions using pyrophosphate functionalized gold nanoparticles. *The Analyst*. 2011;136(9):1887. doi:10.1039/c1an15028f
51. Chatterjee S, Lou XY, Liang F, Yang YW. Surface-functionalized gold and silver nanoparticles for colorimetric and fluorescent sensing of metal ions and biomolecules. *Coord Chem Rev*. mayo de 2022;459:214461. doi:10.1016/j.ccr.2022.214461
52. Ahmed F, Kabir H, Xiong H. Dual Colorimetric Sensor for Hg²⁺/Pb²⁺ and an Efficient Catalyst Based on Silver Nanoparticles Mediating by the Root Extract of *Bistorta amplexicaulis*. *Front Chem*. 22 de October de 2020;8:591958. doi:10.3389/fchem.2020.591958
53. Jouyban A, Rahimpour E. Optical sensors based on silver nanoparticles for determination of pharmaceuticals: An overview of advances in the last decade. *Talanta*. septiembre de 2020;217:121071. doi:10.1016/j.talanta.2020.121071
54. Wang J, Yue X, Zhang Y, Zhu C, Kang X, Yu HD, et al. Plasmonic Sensing of Glucose Based on Gold–Silver Core–Shell Nanoparticles. *Chemosensors*. 8 de octubre de 2022;10(10):404. doi:10.3390/chemosensors10100404
55. Rodríguez-Félix F, Graciano-Verdugo AZ, Moreno-Vásquez MJ, Lagarda-Díaz I, Barreras-Urbina CG, Armenta-Villegas L, et al. Trends in Sustainable Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Agri-Food Waste Extracts and Their Applications in Health. Yi DK, editor. *J Nanomater*. 11 de mayo de 2022;2022:1-37. doi:10.1155/2022/8874003
56. Narayanan KB, Sakthivel N. Green synthesis of biogenic metal nanoparticles by terrestrial and aquatic phototrophic and heterotrophic eukaryotes and biocompatible agents. *Adv Colloid Interface Sci*. 12 de diciembre de 2011;169(2):59-79. doi:10.1016/j.cis.2011.08.004 PubMed PMID: 21981929.
57. Mehdi M, Samer A, Mehdi S. Antimicrobial Effect of Silver Nanoparticles Synthesized with *Bougainvillea Glabra* Extract on *Staphylococcus Aureus* and *Escherichia Coli*. Vol. 40. abril de 2021;40(2):395-405. doi:10.30492/ijcce.2020.97592.3369
58. Cicek C, Erdogan ZO. Detection of ciprofloxacin in ear drop using UV spectrophotometric method based on gold nanoparticles as a sensing probe. *J Nanoparticle Res*. 31 de mayo de 2024;26(6):121. doi:10.1007/s11051-024-06027-x
59. Puente C, Pineda Aguilar N, Gómez I, López I. Morphology Effect of Photoconverted Silver Nanoparticles on the Performance of Surface-Enhanced Raman Spectroscopy Substrates. *ACS Omega*. 11 de abril de 2023;8(14):12630-5. doi:10.1021/acsomega.2c05958
60. Bastús NG, Comenge J, Puentes V. Kinetically Controlled Seeded Growth Synthesis of Citrate-Stabilized Gold Nanoparticles of up to 200 nm: Size Focusing versus Ostwald Ripening. *Langmuir*. 6 de septiembre de 2011;27(17):11098-105. doi:10.1021/la201938u
61. Veeraswamy T, Ankur V. B. Characterization of Silver Nanoparticles Synthesized using Chemical Method and its Antibacterial Property. *Biointerface Res Appl Chem*. 7 de junio de 2020;10(6):7257-64. doi:10.33263/BRIAC106.72577264

62. De La Rosa LA, Alvarez-Parrilla E, Shahidi F. Phenolic Compounds and Antioxidant Activity of Kernels and Shells of Mexican Pecan (*Carya illinoensis*). *J Agric Food Chem*. 12 de enero de 2011;59(1):152-62. doi:10.1021/jf1034306
63. MacCuspie RI. Colloidal stability of silver nanoparticles in biologically relevant conditions. *J Nanoparticle Res*. julio de 2011;13(7):2893-908. doi:10.1007/s11051-010-0178-x
64. Voelker AL, Taylor LS, Mauer LJ. Effect of pH and concentration on the chemical stability and reaction kinetics of thiamine mononitrate and thiamine chloride hydrochloride in solution. *BMC Chem*. diciembre de 2021;15(1):47. doi:10.1186/s13065-021-00773-y
65. Khalkho BR, Kurrey R, Deb MK, Shrivastava K, Thakur SS, Pervez S, et al. L-cysteine modified silver nanoparticles for selective and sensitive colorimetric detection of vitamin B1 in food and water samples. *Heliyon*. 1 de febrero de 2020;6(2):e03423. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e03423
66. Tarighat MA, Khosravani Z, Abdi G. Green synthesis of self-oriented flower-like Ag@Ag₂O nanostructures functionalized with L-Tryptophan for colorimetric simultaneous determination of ultra-trace level of thiamin and riboflavin. *Amino Acids*. 12 de octubre de 2024;56(1):58. doi:10.1007/s00726-024-03406-5
67. Rajamanikandan R, Ilanchelian M. Simple and visual approach for highly selective biosensing of vitamin B1 based on glutathione coated silver nanoparticles as a colorimetric probe. *Sens Actuators B Chem*. 1 de junio de 2017;244:380-6. doi:10.1016/j.snb.2016.12.129
68. Naqvi SS, Anwar H, Siddiqui A, Shah MR. Sensitive and highly selective colorimetric biosensing of vitamin-C and vitamin-B1 by flavoring agent-based silver nanoparticles. *JBIC J Biol Inorg Chem*. 1 de agosto de 2022;27(4):471-83. doi:10.1007/s00775-022-01944-5
69. UshaVipinachandran V, Rajendran S, Ali H, Ashokan I, Bhunia SK. Citrate capped silver nanoparticles as an instantaneous colorimetric selective sensor for neomycin and thiamine in wastewater. *New J Chem*. 7 de agosto de 2022;46(29):14081-90. doi:10.1039/d2nj02174a
70. Tan H, Li Q, Zhou Z, Ma C, Song Y, Xu F, et al. A sensitive fluorescent assay for thiamine based on metal-organic frameworks with intrinsic peroxidase-like activity. *Anal Chim Acta*. 26 de enero de 2015;856:90-5. doi:10.1016/j.aca.2014.11.026
71. Bayandori Moghaddam A, Gudarzy F, Ganjkanlou Y. A fluorescent probe for detecting thiamine using the luminescence intensity of nanoparticles. *J Fluoresc*. 1 de julio de 2014;24(4):1025-30. doi:10.1007/s10895-014-1377-0
72. Momeni S, Jaberie H. Developing a highly efficient fluorescence strategy for thiamine detection in real samples. *J Photochem Photobiol Chem*. 1 de febrero de 2025;459:116064. doi:10.1016/j.jphotochem.2024.116064
73. Simultaneous Determination of Thiamine and Riboflavin in Edible Marine Seaweeds by High-Performance Liquid Chromatography | *Journal of Chromatographic Science* | Oxford Academic [Internet]. [citado 28 de agosto de 2026]. Disponible en: <https://academic.oup.com/chromsci/article-abstract/42/3/117/282894?redirectedFrom=fulltext>

74. Velgosova O, Lisnichuk M, Hernández-Saz J. Study of pH Role in the Green Synthesis of Gold Nanoparticles: From Reduction to Size and Shape Control. *Materials*. 30 de junio de 2026;19(13):2780. doi:10.3390/ma19132780 PubMed PMID: 42451860; PubMed Central PMCID: PMC13362575.
75. Kondekar UR, Walekar LS, Pawar SP, Mali MG, Anuse DD, Gardi CG, et al. Surface plasmon resonance based colorimetric probe for vitamin B1 detection: Applications to bio-fluid analysis. *Case Stud Chem Environ Eng*. 1 de diciembre de 2023;8:100380. doi:10.1016/j.csee.2023.100380
76. Gong F, Zou W, Wang Q, Deng R, Cao Z, Gu T. Polymer nanoparticles integrated with excited-state intramolecular proton transfer-fluorescent modules as sensors for the detection of vitamin B1. *Microchem J*. julio de 2019;148:767-73. doi:10.1016/j.microc.2019.05.057
77. Gheorghe DC, Van Staden J (Koos) F, Stefan-van Staden RI, Sfirloaga P. Gold Nanoparticles/Nanographene-Based 3D Sensors Integrated in Mini-Platforms for Thiamine Detection. *Sensors*. 29 de diciembre de 2022;23(1):344. doi:10.3390/s23010344
78. Brezo-Borjan T, Stojanović Z, Suturović Z, Kos J, Kravić S, Đurović A. A simple adsorptive chronopotentiometric stripping method for determination of vitamin B1 in pharmaceutical products. *Monatshefte Für Chem - Chem Mon*. marzo de 2020;151(3):285-91. doi:10.1007/s00706-020-02567-9
79. Thanomsak S, Kerdphon S, Sirikulajorn A, Tuntulani T, Janrungroatsakul W. Un nanosensor fluorescente simple de tipo “encendido-apagado-encendido” basado en puntos cuánticos de carbono dopados con nitrógeno para la detección selectiva de Hg ²⁺ y tiamina. *Opt Mater*. 1 de mayo de 2024;151:115336. doi:10.1016/j.optmat.2024.115336