



PRISMA ODS
REVISTA MULTIDISCIPLINARIA
SOBRE DESARROLLO SOSTENIBLE

ISSN: 3072-8452

**COMBINACIÓN DE
MATERIALES INTELIGENTES Y
RESIDUOS ÓSEOS
REUTILIZADOS PARA MEJORAR
LA ADMINISTRACIÓN DE
ANTIBIÓTICOS EN EL CUERPO
HUMANO**

*COMBINATION OF SMART MATERIALS
AND REUSED BONE WASTE TO
IMPROVE ANTIBIOTIC DELIVERY IN
THE HUMAN BODY*

AUTORES

**DELIA MONSERRAT
ÁVILA MÁRQUEZ**
TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE
TIANGUISTENCO
MÉXICO

**ALIEN BLANCO
FLORES**
TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE
TIANGUISTENCO
MÉXICO

**ALFREDO RAFAEL
VILCHIS NESTOR**
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO
DE MÉXICO, CENTRO CONJUNTO DE
INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA
SUSTENTABLE UAEM-UNAM (CCQUIS)
MÉXICO

**MARTHA STEPHANIE
PEREZ MENDOZA**
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO
DE MÉXICO, CENTRO CONJUNTO DE
INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA
SUSTENTABLE UAEM-UNAM (CCQUIS)
MÉXICO

Combinación de Materiales Inteligentes y Residuos Óseos Reutilizados para Mejorar la Administración de Antibióticos en el Cuerpo Humano

Combination of Smart Materials and Reused Bone Waste to Improve Antibiotic
Delivery in the Human Body

Delia Monserrat Ávila Márquez

deliam_am@test.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0003-8548-6563>

Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco

Santiago Tianguistenco – México

Alien Blanco Flores

alien.blanco@test.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4035-0550>

Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco

Santiago Tianguistenco – México

Alfredo Rafael Vilchis Nestor

arvilchisn@uaemex.mx

<https://orcid.org/0000-0001-8490-0900>

Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Conjunto de Investigación en Química
Sustentable UAEM-UNAM (CCQUIS)

Toluca – México

Martha Stephanie Perez Mendoza

mperezm035@alumno.uaemex.mx

<https://orcid.org/0009-0009-3062-1506>

Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Conjunto de Investigación en Química
Sustentable UAEM-UNAM (CCQUIS)

Toluca – México

Artículo recibido: 30/01/2026

Aceptado para publicación: 15/02/2026

Conflictos de Intereses: Ninguno que declarar

RESUMEN

El presente trabajo presenta una alternativa de material compuesto el cual ayudará a mejorar la liberación controlada del antibiótico (ciprofloxacina) combinando un material inteligente (ZIF-8) y residuo óseo (hueso), teniendo como novedad la combinación de ambos materiales, logrando una mejor biocompatibilidad y una liberación más eficiente y constante en el tiempo. Además de la novedad académica y científica, también se abordan retos actuales en la salud pública como los efectos secundarios generados por los fármacos administrados y la resistencia antimicrobiana, por lo cual, es un tema completamente innovador, con impacto social, ambiental y clínico. De acuerdo con los resultados obtenidos se puede concluir que cuando la morfología del material es lisa (pocos poros) se logra la máxima capacidad de adsorción del antibiótico en el material a 90 min y una liberación eficiente del antibiótico. Considerando una síntesis rápida, reproducible y económica del material, lo que sugiere una adecuada factibilidad técnica y económica de la propuesta, también ambientalmente sostenible e innovadora.

Palabras clave: antibiótico, residuo óseo, materiales inteligentes, cuerpo humano

ABSTRACT

This paper presents an alternative composite material that will help improve the controlled release of the antibiotic (ciprofloxacin) by combining a smart material (MOF) and bone waste (bone), with the novelty of combining both materials, achieving better biocompatibility and a more efficient and constant release over time. In addition to its academic and scientific novelty, it also addresses current public health challenges such as the side effects of administered drugs and antimicrobial resistance, making it a completely innovative topic with social, environmental, and clinical impact. Based on the results obtained, it can be concluded that when the morphology of the material is smooth (few pores), maximum antibiotic adsorption capacity in the material is achieved at 90 min and efficient release of the antibiotic. Considering the rapid, reproducible, and economical synthesis of the material, this suggests adequate technical and economic feasibility of the proposal, which is also environmentally sustainable and innovative.

Keywords: ciprofloxacin, bone residue, smart materials, human body

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se da un uso indiscriminado de antibióticos, los cuales son básicamente medicamentos que ayudan a combatir infecciones causadas por bacterias, ya sea matando o inhibiendo su crecimiento. La aplicación de estos es por vía oral, inyectable o tópica, dependiendo de la forma de aplicación, y en todos los casos las concentraciones en el cuerpo cambian. Para muchas enfermedades las concentraciones requeridas para tener una mejoría en el paciente son extremadamente altas creando efectos secundarios negativos que deterioran la calidad de vida del paciente. Sin embargo, la problemática más alarmante en el 2025 es el aumento a la resistencia antimicrobiana (capacidad de los microorganismos para volverse resistente a los medicamentos) (Osman y col., 2022).

Derivado de lo anterior, es que se están buscando nuevos sistemas de administración de fármacos más efectivos, es decir, de manera específica y controlada. Esta alternativa tiene como ventajas principales, la reducción del costo de tratamiento y reducción de efectos secundarios, por mencionar algunos. Sin embargo, como todo proceso también tiene limitaciones; estos vienen dados por la complejidad del diseño del material y su liberación, forma en que se administra el fármaco, costos de producción y lo más sobresaliente la biocompatibilidad con el cuerpo humano. Para la liberación controlada de antibióticos, existen una amplia variedad de plataformas como hidrogeles, liposomas, polímeros, nanocápsulas, redes metal orgánicas (MOFs) y micelas entre otros (Horta y col., 2021). Las características, ventajas y desventajas se pueden muestran en la Figura 1.

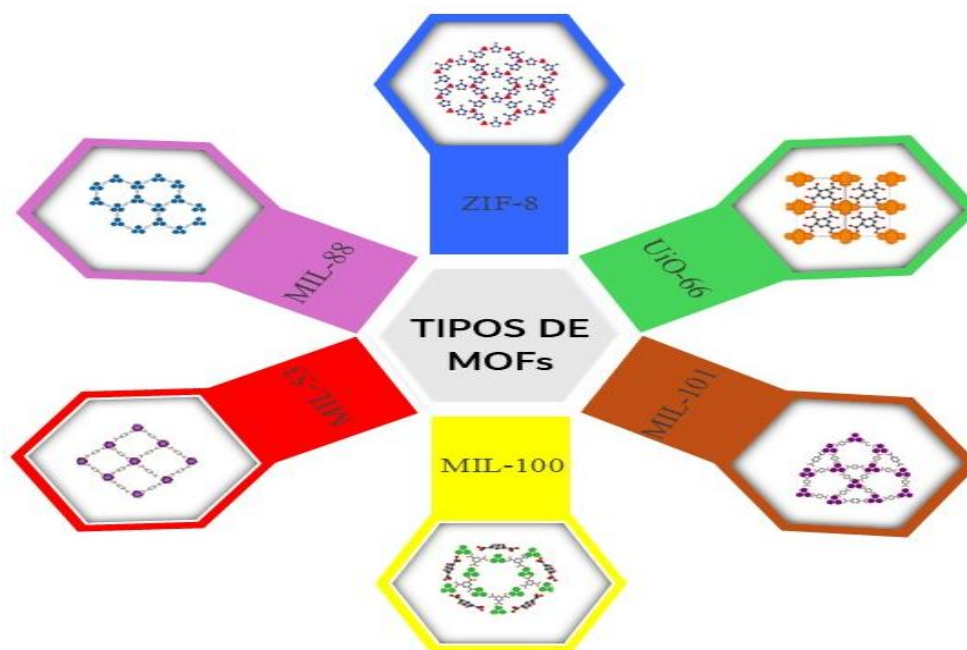
Figura 1. Características principales de los materiales para liberación de fármacos



Fuente: Elaboración propia.

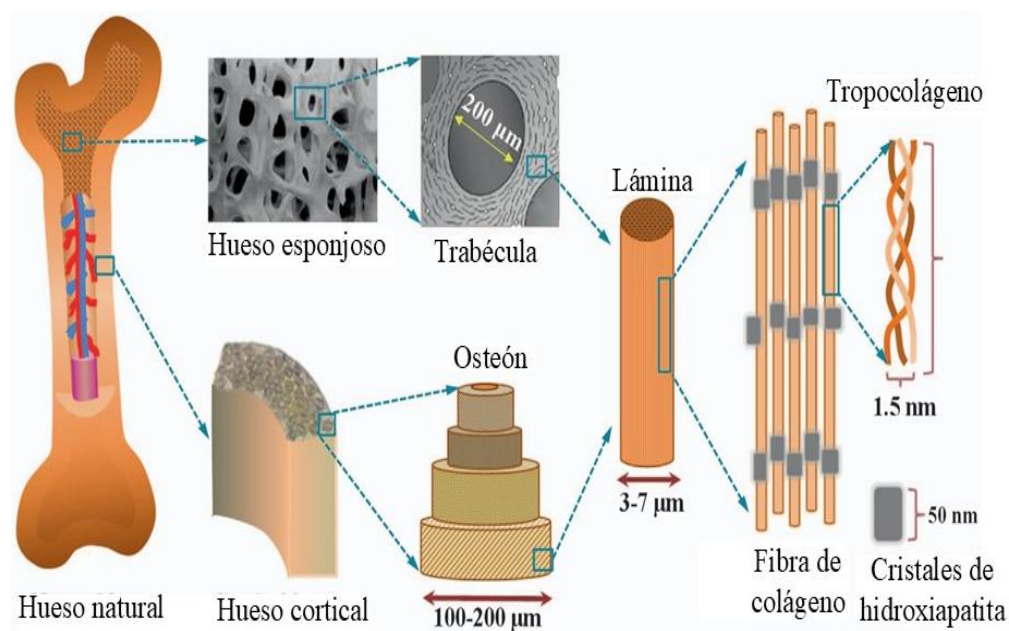
A pesar del desarrollo que existe en el área relacionada con la liberación de antibióticos, hasta la fecha aún no existe una propuesta exitosa, debido a que no se libera de forma completa el fármaco, derivado de la baja permeabilidad (capacidad de pasar un fluido), bajos tiempos de retención y nula estabilidad coloidal (Burbano y col., 2021). Para solucionar los tres aspectos mencionados anteriormente se deben considerar diferentes propiedades de los materiales como son la porosidad, estabilidad mecánica, área superficial, toxicidad, control de solubilidad y biodegradabilidad. Estas características se logran incorporar en los materiales utilizando materiales con propiedades diferentes a los convencionales y que se conocen como materiales inteligentes, por ejemplo, los MOFs, que se componen de un centro metálico y un ligando orgánico. Adicional a ello se caracterizan por tener un amplio potencial de adsorción debido a la posibilidad de ajustar sus canales o cavidades, conocidas como poros (Bashir y col., 2020). Dependiendo del MOF, o sea, de la combinación ion metálico-ligando orgánico entre otros factores, sus propiedades cambian, sobre todo el área superficial que influirá directamente tanto en procesos de adsorción como de desorción, este último término, sinónimo de liberación del antibiótico. La principal ventaja de los MOFs es que poseen una alta capacidad para almacenar sustancias orgánicas (medicamentos o fármacos) así como la biocompatibilidad que se reporta de algunos (Christodoulou y col., 2020).

Es conocido que existen muchos MOFs, entre ellos está el UiO-66, MIL-101 y MIL-88. En el caso del primero, este se caracteriza por tener una estabilidad extrema; los últimos dos destacan por tener una alta área superficial y una buena capacidad de adsorción para fármacos hidrofóbicos (repelentes al agua), pero sus síntesis son muy complicadas. Pero lo que se menciona como ventaja, resulta que en realidad son desventajas, ya que el tener una estabilidad alta, provoca que la hidrólisis no sea rápida y por tanto la liberación tampoco, y a pesar de tener alta área superficial, el costo de obtención de los MOFs es muy elevado. Derivado de ello es que se plantea el ZIF-8 como una alternativa viable de plataforma para liberación de fármacos, ya que este tiene un balance idóneo entre estabilidad química, una liberación correcta en el cuerpo humano y también la síntesis es rápida y económica, lo que favorece tener un proceso más factible (Cai y col., 2023). Considerando todos los puntos desfavorables de los MOFs, a pesar de su variedad y versatilidad (Figura 2) (Claudio-Rizo y col., 2021), aun no se ha encontrado el idóneo para liberación de fármacos. Otra de las razones es su alta capacidad de almacenamiento lo que hace que su liberación sea muy prolongada, lo cual también es desventajoso.

Figura 2. Diferentes MOFs utilizados en la liberación de fármacos

Fuente: Elaboración propia.

Para solucionar la liberación prolongada de específicamente antibióticos como la ciprofloxacina, se propone integrar un residuo óseo (Figura 3) con el ZIF-8. Esta propuesta surge con la intención de aprovechar las grandes cantidades de este residuo que se genera en México y en el mundo. Con solo datos, México se ubica en el séptimo lugar a nivel mundial, con 7.3 millones de toneladas de carne que se consume y por ende se generan residuos óseos (Cañon y col., 2022). En este contexto, se reporta una producción de aproximadamente 340 000 millones de toneladas al año de carne en el mundo (Alibekov y col., 2024). De esta el 30 % corresponde a carne de ganado. En el caso del ganado vacuno, alrededor del 38 % del peso corporal total se convierte en residuo, lo que significa que un animal de 350 kg produce aproximadamente 210 kg de residuos. Se estima que el 45 % de la producción mundial de residuos óseos animales corresponden a hueso de ganado vacuno (Sustainable Energy Research, 2023). Adicional a ello, la composición química del hueso viene dada principalmente por hidroxiapatita que es considerado un biomaterial altamente biocompatible con el cuerpo humano, así como sostenible con el medio ambiente y rentable por su bajo costo. Además, presenta iones o sitios de anclaje que pueden combinarse correctamente con los MOFs (como con el ZIF-8) y generar un material con efecto sinérgico que propicie una buena respuesta en cuanto a liberación de fármacos.

Figura 3. Composición química del hueso (Chengde y col., 2017)

Fuente: Elaboración propia.

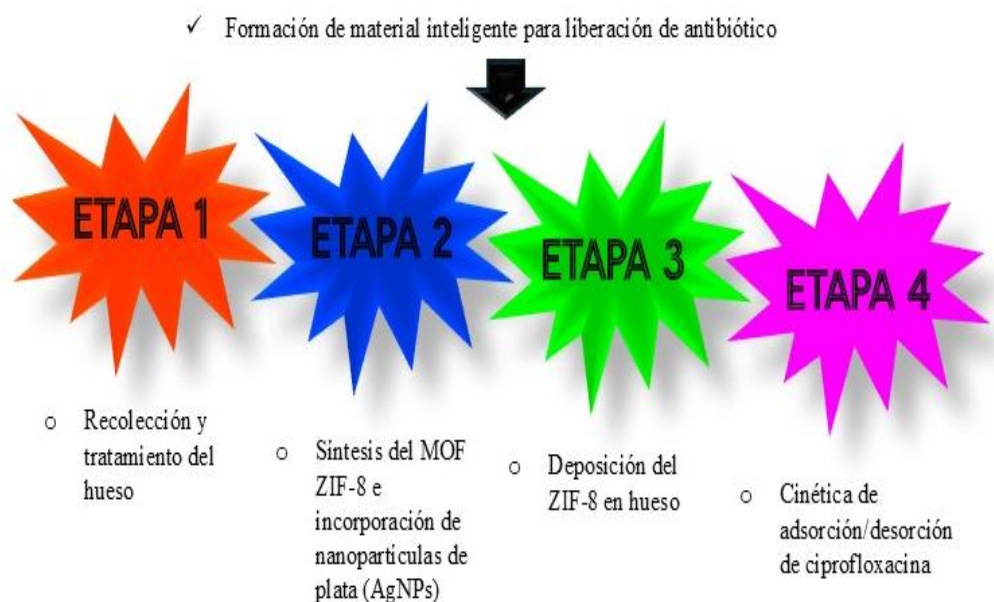
Se conoce que integrar sistemas nanoestructurados metálicos a un compuesto formado por MOF soportado en una matriz biocompatible, puede ser ventajoso ya que puede mejorar la liberación y/o la eficacia global del antibiótico, a través de la disminución de la cantidad de antibiótico a utilizar y también puede darle mayor estabilidad al sistema o plataforma de liberación (Li y col., 2025). El trabajo que se presenta es importante ya que se combinan diferentes áreas de la Ciencia e Ingeniería con impacto en los materiales inteligentes, específicamente composites híbridos (hueso+MOF) para lograr una liberación eficiente del antibiótico ciprofloxacina. Es por ello por lo que al compuesto hueso+ZIF-8 se le incorporan nanopartículas de plata en muy pequeñas cantidades para evitar efectos citotóxicos indeseados y considerar una carga de la ciprofloxacina pequeña pero eficiente microbiológicamente. Esto último se estudiará en futuras etapas de la investigación.

El estudio se enfoca en la ciprofloxacina ya que es un antibiótico de amplio espectro, lo cual contribuye a combatir un gran número de infecciones, a su vez es una estructura muy estable, lo que facilita hacer un seguimiento analítico en laboratorios, sin contar con equipos muy especializados (Ishfaq y col., 2025). Pero lo más relevante de este antibiótico es que la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2025 lo clasificó dentro de los medicamentos críticos derivado de la alta resistencia bacteriana. Por lo cual el objetivo de la investigación fue desarrollar un material inteligente (hueso+MOF) para liberación controlada de ciprofloxacina como alternativa para el tratamiento local de infecciones bacterianas.

METODOLOGÍA

La metodología que se siguió en la investigación para cumplir con el objetivo general se dividió en cuatro etapas (Figura 4).

Figura 4. Metodología de trabajo



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se detallan las actividades realizadas en cada etapa trabajo.

Lavado del residuo óseo (hueso)

La recolección del hueso fue en carnicerías del Estado de México donde generan este residuo en grandes cantidades. El tratamiento del hueso inició con un lavado con agua caliente para eliminar grasas y otras suciedades. Posteriormente se sometió a un lavado con una solución de baja concentración de una base fuerte (NaOH 1M) para continuar eliminando compuestos presentes que pudieran interferir con la aplicación final del material. El sólido se mantuvo durante 1 h a una temperatura entre 60-70°C, con agitación constante.

Al terminar el proceso, la solución se retiró y el material se lavó con agua destilada hasta tener un pH neutro. Una vez alcanzado este objetivo nuevamente se sometió el hueso a un lavado, pero en este caso con una solución de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 30%, dejándolo agitar durante 1 h a temperatura ambiente.

Tras retirar esta solución, el material se lavó nuevamente con agua destilada y finalmente, el hueso se secó en una estufa a 60 °C. Seguido se molió hasta obtener un polvo fino.

Con esta propuesta de tratamiento se busca incidir directamente en la viabilidad económica de la propuesta, donde ya no sería necesario un tratamiento térmico alto para obtener hidroxiapatita, como suelen reportar la mayoría de los investigadores en la literatura

especializada (Yetri y col., 2024). De esta forma el consumo energético también se ve disminuido.

Síntesis del ZIF-8

Para la síntesis del MOF se utilizó etanol como solvente. Es importante resaltar que se siguió un procedimiento que no implicara el uso de solventes agresivos con el medio ambiente y mucho menos costosos, de manera que sea posible el escalamiento del procedimiento si es que fuese el caso en futuras etapas de trabajo. En un vaso de precipitado se mezcló la solución del ligando orgánico (2-metilimidazol, 1.6 mol/L) y una solución acuosa del precursor metálico que fue el Zn^{2+} (concentración de 0.04 mol/L). Dicha mezcla se dejó agitando de forma rápida por 20 min a temperatura ambiente. Al finalizar el tiempo se centrifugó la mezcla y al término se retiró el líquido. Se adicionaron 5 mL de etanol para lavar, proceso que se repitió tres veces, para finalizar se puso a secar a 80°C por 24 h y se almacenó el producto deseado.

Deposición del ZIF-8 en el hueso

Para depositar el ZIF-8 sobre el hueso tratado y en polvo, se utilizó el método *insitu*.

Se pesaron 3 g de hueso tratado y se mezcló con la solución de nitrato de zinc a la concentración antes mencionada durante 1 h a 400 rpm a temperatura ambiente, seguido se agregó la solución de 2-metilimidazol y se dejó agitando 1 h más, cuando finalizó el tiempo se centrifugó y se lavó con 5 mL de etanol por tres veces, el polvo obtenido se secó en la estufa a 60 °C.

Síntesis de las nanopartículas de plata (AgNPs)

Preparación del extracto

Se pasaron 0.25 g de chilca (planta) y se mezcló con 25 mL de agua desionizada a una temperatura de 60 °C, el tiempo de contacto fue de 5 min con una agitación de 250 rpm. Al finalizar se dejó enfriar la infusión y se filtró para dejar en reposo por 24 h solo el líquido. Al líquido obtenido se le nombró extracto puro.

Para la síntesis este fue diluido en una relación 1:9 (extracto puro: agua), para completar un volumen final de 10 mL.

Obtención de las nanopartículas de plata

Se pusieron en contacto 5 mL de una solución de nitrato de plata (AgNO_3) de 1×10^{-3} mol/L, con 0.5 mL del extracto diluido y 14.5 mL de agua desionizada, dicha mezcla se agitó por 1 min y se dejó en reposo durante 3 h para obtener las AgNPs. Se siguió el mismo procedimiento reportado por García Romero, G, 2024.

Deposición de las AgNPs

La deposición de las nanopartículas de plata se realizó sobre el material hueso+ZIF-8, para ello se adsorbieron primeramente los iones plata en éste y posteriormente se añadió el extracto

diluido. El sistema se mantuvo en contacto durante 2h. Posterior a ello se filtró y se secó para obtener el material con las nanopartículas depositadas.

Carga del antibiótico

El hueso+ZIF-8@AgNPs, se puso en contacto con 100 mL de una solución de ciprofloxacina de concentración de 80 mg/L durante 90 min, posteriormente se separó el sólido, se secó y se almacenó para tener el material inteligente cargado con el antibiótico y llevar a cabo la liberación correspondiente del mismo.

Caracterización de los materiales obtenidos

Para determinar la obtención de nanopartículas de plata, se realizaron pruebas en el equipo UV-Vis, en donde se obtuvieron barridos de longitud de onda de 190-1100 nm, de las soluciones de la síntesis de las AgNPs, para identificar el plasmón de resonancia superficial y así confirmar la síntesis de las nanopartículas.

Para determinar la morfología del material final, este se caracterizó por Microcopia Electrónica de Barrido (SEM), en un microscopio JEOL JSM-610LV (JEOL, Tokio, Japón) operado a 15 kV y equipado con un espectrómetro de rayos X de dispersión de energía (EDS) Bruker QUANTAX 200 (Bruker, Billerica, MA, EE. UU.) para la caracterización elemental. Todas las muestras se fijaron en un soporte con una película de carbono y se recubrieron por pulverización con platino.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lavado del residuo óseo (hueso)

Después de los tratamientos mencionados, y lavado el residuo tratado se obtuvo un polvo fino, apto para ser utilizado como soporte del ZIF-8 (Figura 5). Ávila-Márquez y col 2025., identificaron por espectroscopia infrarroja los principales grupos funcionales del hueso, confirmando de esta manera la presencia de hidroxiapatita como fase mayoritaria en el hueso.

Figura 5. Obtención del hueso tratado



Fuente: Elaboración propia.

Síntesis del MOF ZIF-8 y deposición en el hueso

Se realizó la síntesis del ZIF-8, obteniendo un polvo blanco con tamaños de partículas visibles. Para hacer crecer el ZIF-8 sobre el hueso, se siguió la misma ruta de síntesis del ZIF-8, solo que adicionalmente se añadió determinada masa de hueso en el medio de la reacción (Figura 6).

Figura 6. Síntesis del ZIF-8 y su obtención sobre el hueso

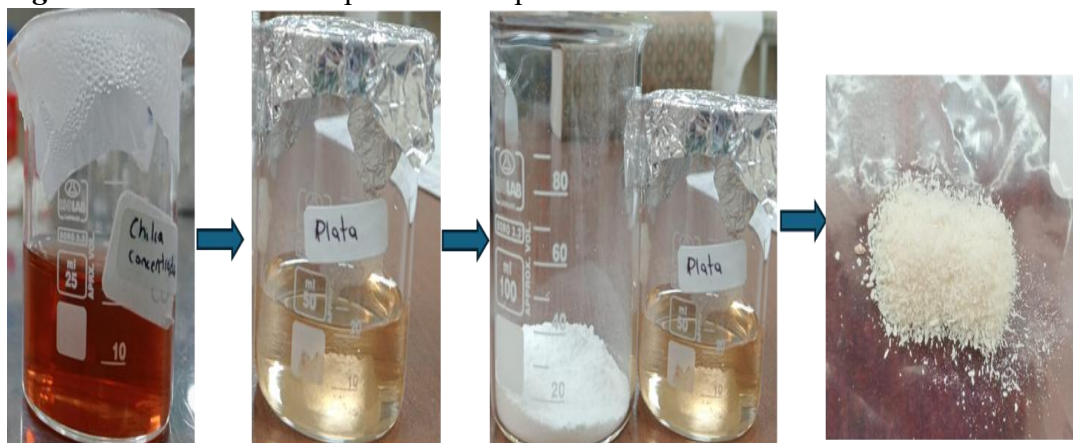


Fuente: Elaboración propia.

Síntesis de las AgNPs y deposición en el material hueso+ZIF-8

La síntesis de las nanopartículas de plata se siguió a través de los cambios de color que fueron dándose en la medida que la reacción transcurría. Estos cambios fueron coherentes con los que se reportan en la literatura (Figura 7). El material final obtenido: hueso+ZIF-8@AgNPs se obtuvo con una coloración grisácea; esto permitió inferir que las nanopartículas fueron obtenidas y depositadas en el material previo.

Figura 7. Síntesis de nanopartículas de plata sobre hueso/ZIF-8



Fuente: Elaboración propia.

Carga del antibiótico

El valor de concentración inicial del antibiótico de 80 mg/L se seleccionó porque se consideró el equivalente para lograr una deposición de 6 mg/g. Justo, pequeñas cantidades para ver el proceso de liberación posterior y a partir del mismo iniciar procesos de optimización tanto de la cantidad cargada como del perfil de liberación. Este valor de referencia se tomó porque en estudios previos se realizó una cinética de adsorción de ciprofloxacina y se encontró este valor para el tiempo de equilibrio de 90 min (indicado en la metodología). Los cálculos del porcentaje de carga indicaron que se logró un 80% de ciprofloxacina en el material hueso+ZIF-8@AgNPs.

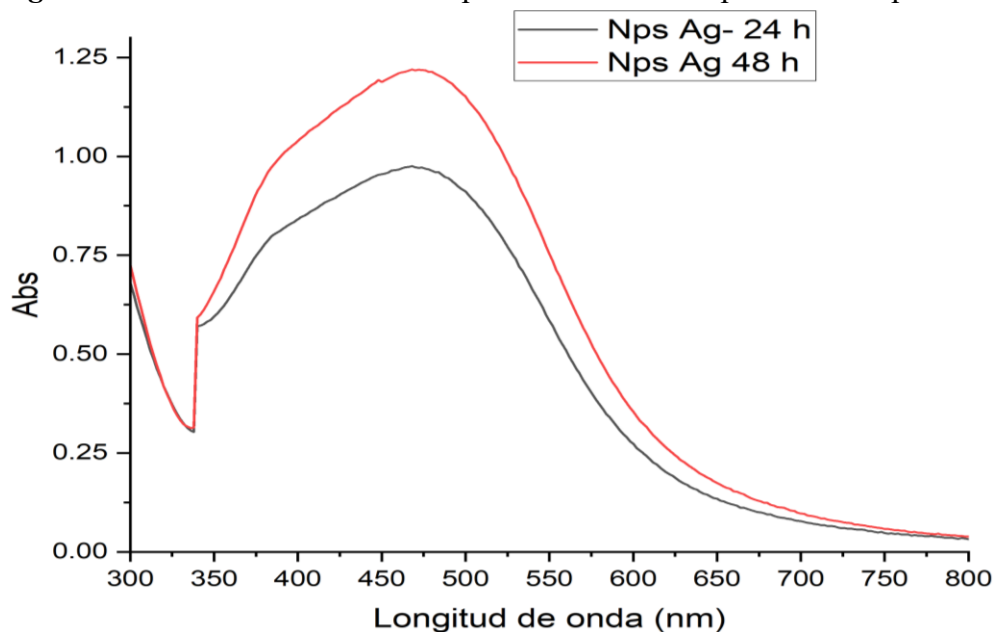
Caracterización de los materiales

Las nanopartículas de plata obtenidas se analizaron a través del espectro de absorción obtenido para estas y el mismo indicó que en efecto fueron sintetizadas exitosamente. El plasmón de resonancia superficial apareció entre 400-450 nm (Figura 8), lo cual coincide con lo reportado en la literatura. Significa que el extracto de la planta utilizada funciona como un buen agente antioxidante.

Se observó el material obtenido (hueso+ZIF-8@AgNPs) en el SEM (Figura 9), notando que la deposición del ZIF-8 sobre el hueso fue de manera homogénea y logrando cuantificar por EDS la existencia del zinc; a su vez, se observó que el hueso es un material poroso, teniendo diferentes tamaños de poros.

DISCUSIÓN

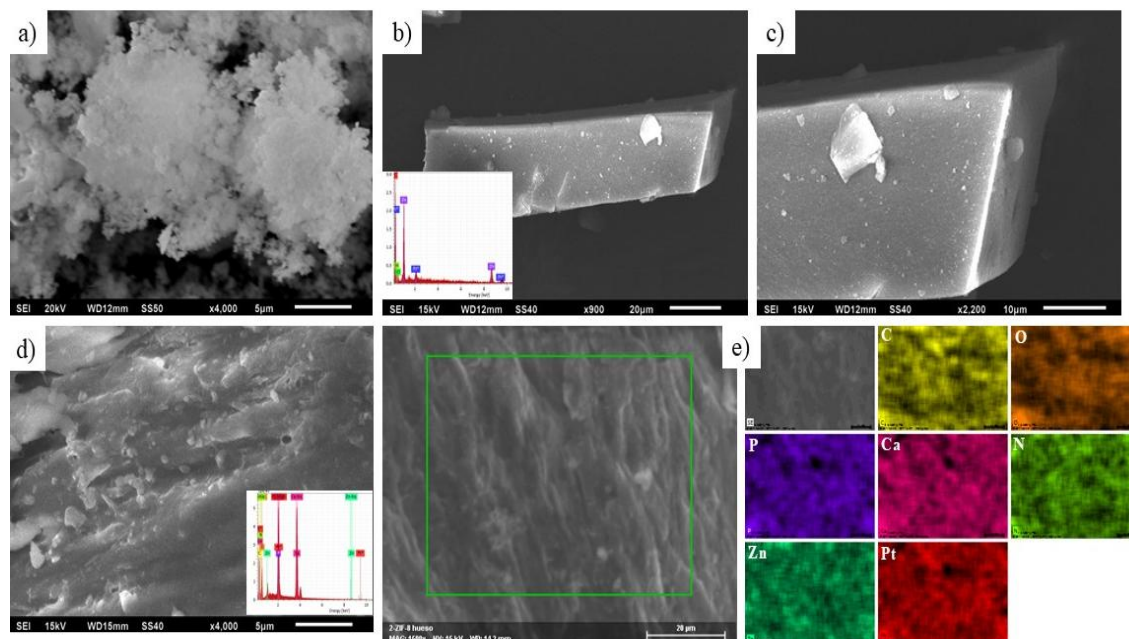
La deposición de las nanopartículas de plata se siguió en el tiempo ya que conforme pasó este, se pudieron percibir diferentes cambios de coloración, indicando la formación de las AgNPs. A diferentes intervalos de tiempo se tomó muestra de la síntesis y se obtuvo en cada caso el espectro de absorción en el rango de longitudes de onda antes mencionado. En base a los gráficos obtenidos, se pudo concluir que se obtuvieron estas de la forma esperada (Figura 8). Este espectro ancho indica que hay cierta polidispersidad de las nanopartículas en el medio de reacción. Los tamaños para este valor de longitud de onda pueden estar entre 40-60 nm e incluso es sinónimo esta forma del espectro de una densa capa de agentes orgánicos que capean las nanopartículas, consistente con el medio de reacción donde aparecen sustancias orgánicas, que a la vez de reducir el estado de oxidación de los iones plata, protegen las nanopartículas evitando un tamaño grande e incluso mayor aglomeración.

Figura 8. Plasmón de resonancia superficial de las nanopartículas de plata

Fuente: Elaboración propia.

Para poder conocer la morfología del polvo de hueso, se obtuvieron las imágenes de SEM. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede afirmar que el hueso es un material con partículas aglomeradas de diferentes tamaños (Figura 9a). Para el caso del ZIF-8 se identificó una superficie lisa (Figura 9b), característica de este tipo de materiales con una estructura cristalina bien definida. De este MOF es posible aprovechar las cavidades que se forman y los grupos funcionales presentes para lograr una interacción con el antibiótico y su posterior liberación inducida por temperatura. El material formado por la combinación del ZIF-8 sobre el hueso (hueso+ZIF-8) se muestra con una morfología completamente diferente a los materiales individuales, lo que induce a pensar que efectivamente el crecimiento del MOF tuvo lugar influyendo fuertemente en el cambio de la superficie del material compuesto (Figura 9d). Este MOF se depositó sobre toda la superficie del hueso (Figura 9e) de acuerdo con la distribución del Zn sobre esta, que constituye como ya se sabe, el centro metálico del MOF.

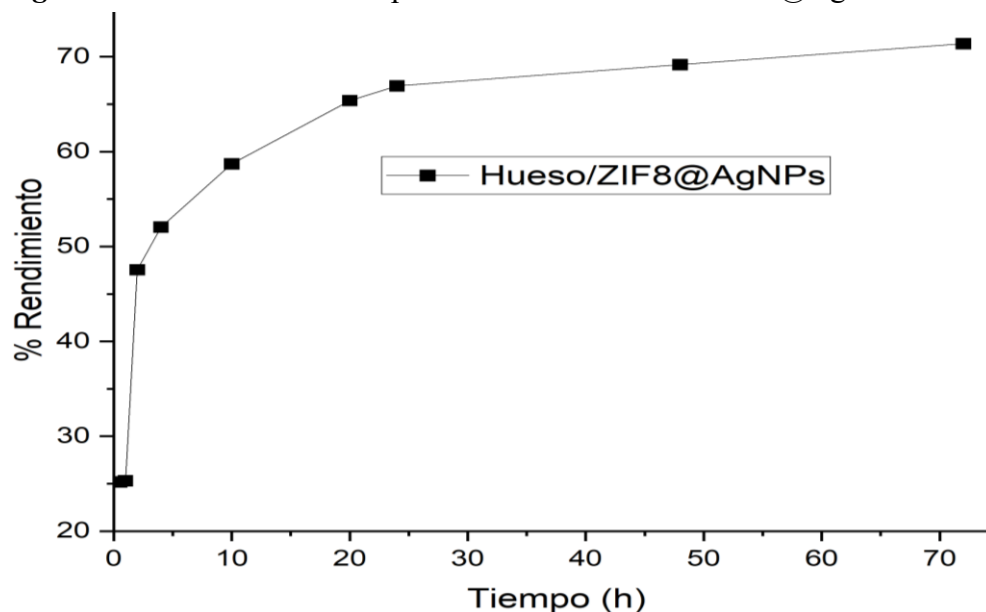
Figura 9. Micrografías SEM del hueso (a), ZIF-8 con EDS y diferentes aumentos (b, c), ZIF-8 sobre hueso (d) y mapeo químico del ZIF-8 sobre hueso (e)



Fuente: Elaboración propia.

La carga del antibiótico en el material final obtenido se consideró idónea, ya que precisamente se pensó en limitar su cantidad para aprovechar los efectos de las nanopartículas de plata. Aun así, fue importante conocer qué sucede con el proceso de liberación del antibiótico en las primeras 72 h.

El porcentaje de liberación entre los primeros 5 min y las últimas 72 h fue de 25 a 71% (Figura 10). Justo el comportamiento que se esperaba, que en la medida que el tiempo transcurría la cantidad liberada se incrementara. Si se observa detalladamente la gráfica hay un incremento brusco en los primeros intervalos de tiempo. Esto puede deberse a una rápida liberación considerando que parte del antibiótico debió retenerse en poros muy accesibles y por un rápido proceso difusivo tuvo lugar esta liberación. Aspecto que debe considerarse a futuro si se desea una liberación controlada en el tiempo. Transcurrido estos primeros tiempos se observa una liberación más lenta, acorde a lo que se pretendía en la investigación. Claramente relacionado con la liberación del antibiótico ubicado de forma menos accesible.

Figura 10. Liberación de la ciprofloxacina en el hueso/ZIF8@AgNPs

Fuente: Elaboración propia.

Esto permite inferir que el material hueso+ZIF-8@AgNPs no solo actúa como un potencial material que admite sobre su superficie cantidades determinadas del antibiótico, sino que además funciona eficientemente como regulador de dicho proceso de liberación. En este actúa de forma directa la morfología del material y procesos difusivos deben gobernar dicho proceso. Es importante mencionar que durante el seguimiento de la liberación por UV—Vis no se observó la aparición de picos adicionales, lo que permite inferir que el material mostró buena estabilidad química, lo que contribuye a potenciarlo como eficiente para la aplicación terapéutica propuesta.

CONCLUSIÓN

Se puede concluir que el trabajo tiene un área de desarrollo de suma relevancia, sobre todo considerando que en el 2025 la OMS, declaró alarma por las cifras en aumento a la resistencia antimicrobiana a antibióticos, declarando que deben plantearse nuevos proyectos que ayuden a resolver dicho problema. Dentro del mismo trabajo se plantea seguir sintetizando diferentes tipos de MOF para poder depositar en el residuo óseo e ir optimizando a capacidad de adsorción de cada uno para posteriormente tener el material optimizado y pasar a las pruebas microbiológicas.

AGRADECIMIENTO

Se agradece al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT), por el apoyo brindado en la convocatoria Investigadores e Investigadoras COMECYT 2025 con folio

CAT2025-0021 y al Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco por el apoyo económico al proyecto con clave DIDT/CI2025/18.

REFERENCIAS

- Alibekov, R. S., Alibekova, Z. I., Bakhtybekova, A. R., Taip, F. S., Urazbayeva, K. A., & Kobzhasarova, Z. I. (2024). Review of the slaughter wastes and the meat by-products recycling opportunities. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1410640.
- Ávila-Márquez, D.M., Blanco Flores, A., Toledo Jaldin, H.P., Burke Irazoque, M., González Torres, M., Vilchis-Nestor, A.R., Toledo, C.C., Gutiérrez-Cortez, S., Díaz Rodríguez, J.P., Dorazco-González, A. MIL-53 MOF on Sustainable Biomaterial for Antimicrobial Evaluation Against *E. coli* and *S. aureus* Bacteria by Efficient Release of Penicillin G. *J. Funct. Biomater.* 2025, 16, 295. <https://doi.org/10.3390/jfb16080295>
- Bashir, S., Chava, S. R., Yuan, D., Palakurthi, S., & Liu, J. (2020). Metal-organic frameworks and exemplified cytotoxicity evaluation. In *Metal-organic frameworks for biomedical applications* (pp. 347-381). Woodhead Publishing.
- Burbano, D. C. R., Ramírez, M. C. M., & Roncancio, L. C. T. (2021). Síntesis y caracterización de un hidrogel electroresponsivo para un sistema de liberación controlada de fármacos.
- Cai, W., Zhang, W., & Chen, Z. (2023). Magnetic Fe₃O₄@ ZIF-8 nanoparticles as a drug release vehicle: pH-sensitive release of norfloxacin and its antibacterial activity. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 223, 113170.
- Cañón Dávila, D. F., Zubieta Otero, L. F., & Martínez Muñoz, P. E., et al. (2022, 27 de junio). El hueso, un desecho en la cocina y una oportunidad para la medicina. *Ciencia UNAM*. <https://ciencia.unam.mx/leer/1279/el-hueso-un-desecho-en-la-cocina-y-una-oportunidad-para-la-medicina>
- Chengde Gao, Shuping Peng, Pei Feng, and Cijun Shuai. Bone biomaterials and interactions with stem cells. *Bone Research* (2017) 5, 17059; <https://doi:10.1038/boneres.2017.59>
- Christodoulou, I., Serre, C., & Gref, R. (2020). Metal-organic frameworks for drug delivery: Degradation mechanism and in vivo fate. In *Metal-organic frameworks for biomedical applications* (pp. 467-489). Woodhead Publishing.
- Claudio-Rizo, J. A., Cano Salazar, L. F., Flores-Guía, T. E., & Cabrera-Munguía, D. A. (2021). Nanostructured metal-organic frameworks (MOFs) applied to controlled drug delivery. *Mundo Nano*, 14(26), 1e-29e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69634>
- Forouzandehdel, S., Forouzandehdel, S., & Rami, M. R. (2020). Synthesis of a novel magnetic starch-alginic acid-based biomaterial for drug delivery. *Carbohydrate research*, 487, 107889.
- García Romero, G. (2024). Síntesis verde de AuNP y AgNP, caracterización y valuación catalítica en la reducción de 4-nitrofenol (Tesis de maestría). Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química.

- Horta, A. G., Angeles, G. A., & Giros, P. G (2022). Estado del arte en el diseño de plataformas inteligentes para la liberación controlada de fármacos. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ishfaq, M., Lateef, D., Ashraf, Z., Sajjad, M., Owais, M., Shoukat, W., ... & Chughtai, A. H. (2025). Zirconium-based MOFs as pH-responsive drug delivery systems: encapsulation and release profiles of ciprofloxacin. *RSC advances*, 15(33), 26647-26659.
- Li, Q. J., Xing, F., Wu, W. T., Zhe, M., Zhang, W. Q., Qin, L., ... & Xie, H. Q. (2025). Multifunctional metal-organic frameworks as promising nanomaterials for antimicrobial strategies. *Burns & Trauma*, 13, tkaf008.
- Mondal, S., Park, S., Choi, J., Vu, T. T. H., Doan, V. H. M., Vo, T. T., ... & Oh, J. (2023). Hydroxyapatite: A journey from biomaterials to advanced functional materials. *Advances in colloid and interface science*, 321, 103013.
- Osman, N., Devnarain, N., Omolo, C. A., Fasiku, V., Jaglal, Y., & Govender, T. (2022). Surface modification of nano-drug delivery systems for enhancing antibiotic delivery and activity. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 14(1), e1758.
- Sustainable Energy Research. (2023). From Waste to Fuel: How Animal Bones Are Revolutionizing Biodiesel Production. Recuperado de <https://www.molengsci.com/posts/from-waste-to-fuel-how-animal-bones-are-revolutionizing-biodiesel-production>
- Yetri, Y., Indra, A., & Affi, J. (2024). Extraction of hydroxyapatite from bovine bones: The manufacturing development and its behavior properties towards acrylic resin/hydroxyapatite/alumina composites. *Materials Chemistry and Physics*, 319, 129244.
- Yu, C., Kim, Y. J., Kim, J., & Eum, K. (2022). ZIF-L to ZIF-8 transformation: morphology and structure controls. *Nanomaterials*, 12(23), 4224.

© Los autores. Este artículo se publica en Prisma ODS bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0). Esto permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, incluidos fines comerciales, siempre que se otorgue la atribución adecuada a los autores y a la fuente original.



doi: <https://doi.org/10.65011/prismaods.v5.i1.168>

Cómo citar este artículo (APA 7ª edición):

Ávila Márquez, D. M. ., Blanco Flores, A. ., Vilchis Nestor, A. R. ., & Perez Mendoza, M. S. . (2026). Combinación de Materiales Inteligentes y Residuos Óseos Reutilizados para Mejorar la Administración de Antibióticos en el Cuerpo Humano. *Prisma ODS: Revista Multidisciplinaria Sobre Desarrollo Sostenible*, 5(1), 293-309. <https://doi.org/10.65011/prismaods.v5.i1.168>