

Pérdida de la actividad antibiótica del ciprofloxacino irradiado con luz ultravioleta

Loss of Antibiotic Activity in Ciprofloxacin Irradiated with Ultraviolet Light

María Magali Guillen-Morales¹ <https://orcid.org/0000-0003-3958-0420>

Rafael Manuel de Jesús Mex-Álvarez^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-1154-0566>

María Isabel Novelo-Pérez¹ <https://orcid.org/0000-0003-1380-5492>

Garma Quen Patricia Margarita¹ <https://orcid.org/0000-0003-4347-0347>

Roger Enrique Chan-Martínez¹ <https://orcid.org/0009-0007-6563-9023>

Dylan Manuel Ferrer-Dzul¹ <https://orcid.org/0009-0004-8311-2995>

¹Universidad Autónoma de Campeche, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Laboratorio de Análisis de Medicamentos Área de Farmacia. Campeche, México.

*Autor para la correspondencia: rafammex@uacam.mx

RESUMEN

Introducción: La problemática desencadenada por el uso irracional de antibióticos, así como la disposición y el desecho inadecuado de estos, ocasiona la contaminación del agua y del suelo, lo que afecta a los cultivos vegetales, las plantas, los animales e inclusive a las personas, por ello es fundamental reducir la contaminación ambiental por antibióticos para reducir la aparición, transmisión y propagación de bacterias resistentes.

Objetivos: Evaluar la pérdida de la bioactividad de ciprofloxacino expuesto a luz ultravioleta en *Artemia salina*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* y *Bacillus clausii* para contribuir al diseño de métodos de tratamiento e inactivación de ciprofloxacino.

Métodos: Se irradiaron soluciones de ciprofloxacino durante dos horas con luz ultravioleta (254 nm) y se evaluó la bioactividad residual de las muestras irradiadas por los métodos antimicrobianos de difusión y microdilución en pozo y con el bioensayo de letalidad de *Artemia salina*.

Resultados: El ciprofloxacino irradiado no mostró actividad antibiótica y la *Artemia salina* expuesta obtuvo 100 % de supervivencia.

Conclusiones: La exposición a radiación ultravioleta provoca una disminución significativa en la bioactividad del ciprofloxacino debido a su degradación, por lo que la radiación ultravioleta puede ser utilizada como una herramienta eficaz para reducir la concentración de ciprofloxacino en entornos acuáticos contaminados, al contribuir potencialmente a la mitigación de la resistencia bacteriana.

Palabras clave: actividad antibiótica; ciprofloxacino; irradiación ultravioleta.

ABSTRACT

Introduction: The problems caused by the irrational use of antibiotics, as well as their improper disposal, lead to water and soil contamination, which affects crops, plants, animals, and even humans. Therefore, it is essential to reduce environmental contamination by antibiotics to curb the emergence, transmission, and spread of resistant bacteria.

Objectives: To evaluate the loss of bioactivity of ciprofloxacin exposed to ultraviolet light in *Artemia salina*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, and *Bacillus clausii* in order to contribute to the development of methods for the treatment and inactivation of ciprofloxacin.

Methods: Ciprofloxacin solutions were irradiated for two hours with ultraviolet light (254 nm), and the residual bioactivity of the irradiated samples was evaluated using the antimicrobial diffusion and well microdilution methods, as well as the *Artemia salina* lethality bioassay.

Results: Irradiated ciprofloxacin showed no antibiotic activity, and the exposed *Artemia salina* achieved 100% survival.

Conclusions: Exposure to ultraviolet radiation causes a significant decrease in the bioactivity of ciprofloxacin due to its degradation; therefore, irradiation can be used as an effective tool to reduce the concentration of ciprofloxacin in contaminated aquatic environments, potentially contributing to the mitigation of bacterial resistance.

Keywords: antibiotic activity; ciprofloxacin; ultraviolet irradiation.

Recibido: 18/06/2025

Aceptado: 19/10/2025

Introducción

Entre los contaminantes emergentes presentes en el medio ambiente destacan los fármacos. Los antibióticos generan gran preocupación, debido a que en el periodo comprendido entre los años 2000-2015, el consumo global per cápita de antibióticos aumentó en un 90 % y se estima que en el año 2023 el consumo de antibióticos a nivel mundial fue de 49 300 millones de dosis diarias definidas^(1,2)

En humanos los antimicrobianos más consumidos son las penicilinas, los macrólidos y las fluoroquinolonas como el ciprofloxacino (CPX), además de que se debe considerar su empleo también en animales, por lo que se ha detectado su presencia en suelos agrícolas, heces de animales, agua residual urbana, industrial y hospitalaria, así como en diferentes cuerpos de agua.^(3,4)

La problemática se desencadena debido al uso irracional de antibióticos, así como a la disposición y el desecho inadecuado de estos, y ocasiona la contaminación del agua y del suelo afectando a los cultivos vegetales y las plantas, los animales y las personas, por lo que resulta fundamental reducir la contaminación ambiental por antibióticos para reducir la aparición, transmisión y propagación de bacterias resistentes.

Para este fin urge disponer de métodos de tratamiento y de disposición final de los antibióticos, pues en este momento no existe ni el diseño, ni la aplicación de normas para

el manejo de este tipo de residuos.⁽⁵⁾

El CPX es un contaminante de difícil remoción en aguas hospitalarias debido a que los métodos de tratamiento tradicionales son poco eficaces para su degradación, aunque, gracias a su estructura química, es capaz de interactuar con la luz ultravioleta siendo posible utilizarla para su eliminación.^(3,4)

Por ello el objetivo del estudio fue evaluar el efecto de la radiación ultravioleta sobre la bioactividad de ciprofloxacino en *Artemia salina*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* y *Bacillus clausii* para contribuir al diseño de métodos de tratamiento e inactivación de ciprofloxacino.

Métodos

Para evaluar el efecto de la radiación ultravioleta sobre su bioactividad, se preparó una solución de ciprofloxacino en agua ($C = 2000 \text{ mg l}^{-1}$) y se colocaron alícuotas de 10 ml del antibiótico en ocho recipientes de acrílico transparente sin tapa para exponerlos a la radiación ultravioleta en una cámara blanca de fotorreacción cerrada; para lo cual se empleó como fuente de radiación ultravioleta una lámpara de 60 W Germicidal (AC85-265V, 1119 luxes, UV-C = 254 nm).

La irradiación se realizó durante dos horas, retirando un recipiente cada 15 minutos para así evaluar posteriormente el efecto a los 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 y 120 minutos respectivamente; escogiéndose estos valores debido a que en las pruebas preliminares al evaluarse su concentración cada dos horas, se observó su degradación total entre las dos y cuatro horas de irradiación.

La determinación de la concentración residual de ciprofloxacino se llevó a cabo por espectrofotometría UV-Visible, empleado el método de quelación del ion férrico; para ello se colocó 500 μl de agua destilada en un tubo de ensayo y se añadió 500 μl de la muestra de ciprofloxacino y 100 μl de solución de nitrato férrico al 1,0 %, se agitó perfectamente y se dejó reaccionar 15 minutos para posteriormente realizar la lectura de la absorbancia en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 400 nm.

Se realizó una curva calibración con soluciones estándares de ciprofloxacino para obtener la ecuación de la recta que permitiera determinar su concentración residual en las muestras irradiadas.

En las pruebas microbiológicas se emplearon las siguientes cepas de bacterias: *Escherichia coli* (ATCC-25922), *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC-27853), *Staphylococcus aureus* (ATCC-6538) y *Bacillus clausii* (Enterogermina®).

Determinación de los halos de inhibición del ciprofloxacino irradiado

La preparación de las suspensiones de los microorganismos a evaluar se realizó tomando colonias morfológicamente idénticas e inoculándolas en un tubo con caldo Mueller-Hinton, posteriormente, con un nefelómetro se verificó que las suspensiones presenten una turbidez equivalente a 0,5 en la escala de McFarland.

Las suspensiones se sembraron en cajas de Petri con medio Mueller-Hinton a las cuales se les abrieron pozos de 5 mm.

En cada pozo se depositó 50 µl de la solución correspondiente (agua estéril para el control negativo, ciprofloxacino no irradiado como testigo).

Las cajas de Petri con medio de cultivo inoculado fueron incubadas a 35 ± 2 °C durante 24 h; transcurrido este tiempo, se midió el diámetro de los halos de inhibición.⁽⁶⁾

Determinación de la concentración mínima inhibitoria del ciprofloxacino irradiado

La determinación de la concentración mínima inhibitoria del ciprofloxacino irradiado se realizó por el método de microdilución en placa de 96 pozos descrito por el Instituto de Normas Clínicas y de Laboratorio, año 2012 (CLSI por sus siglas en inglés de Clinical and Laboratory Standards Institute (<https://clsi.org/about>) modificado; se colocaron 50 µl de agua estéril en los 96 pozos de la microplaca y se realizaron diluciones seriadas 1:2 de la solución correspondiente (agua estéril para el control negativo y ciprofloxacino no irradiado para el testigo); a las primeras dos columnas se añadió 150 µl de caldo Mueller-Hinton como control de esterilidad, en las columnas tres y cuatro se añadieron 150 µl

del inóculo bacteriano (control de crecimiento), en la columna correspondiente al testigo y a los pozos que contenían las diluciones de ciprofloxacino irradiado, se complementaron con 150 μ l de inóculo bacteriano (ajustado a 0,5 en la escala de McFarland).

Los valores de la concentración mínima inhibitoria (MIC) se definieron como la concentración mínima de la muestra de ciprofloxacino irradiada que evita el crecimiento bacteriano visible después de 16 a 20 horas de incubación a 35 ± 2 °C.

Para revelar los resultados se utilizó 50 μ l de MTT [bromuro de 3- (4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-difenil-2H-tetrazolio]] y se dejó incubar cuatro horas más a 37 °C.

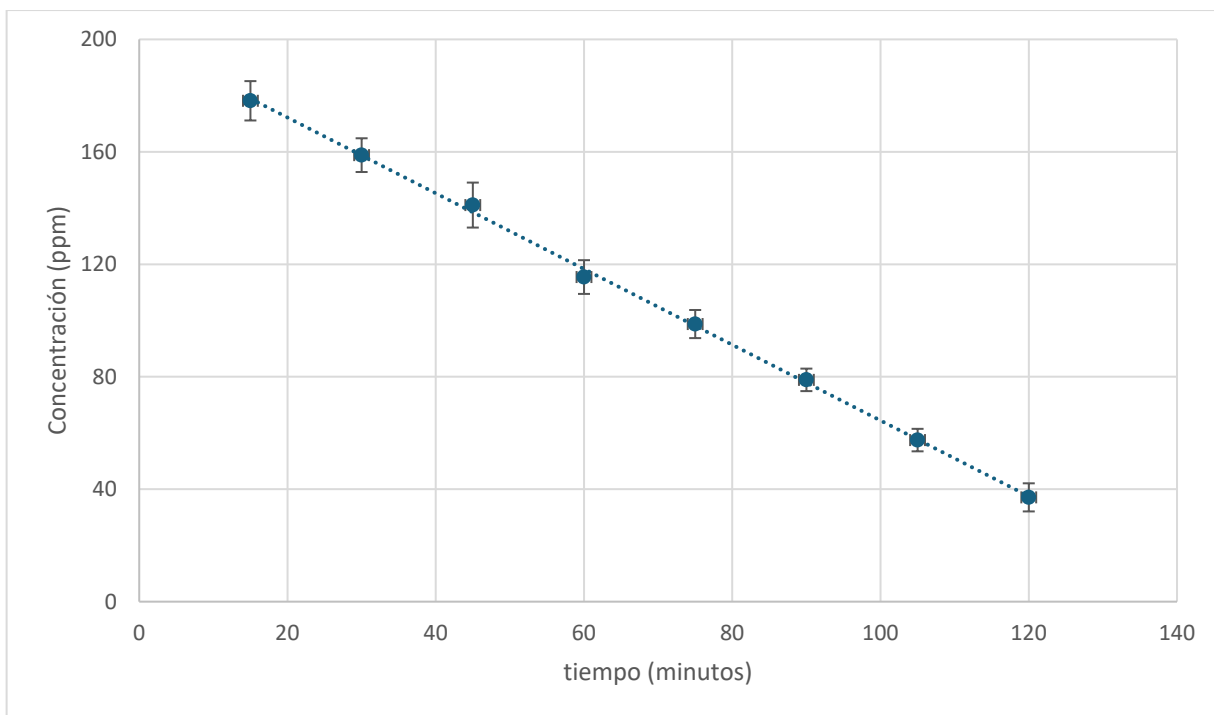
Estimación de la concentración letal al 50 % sobre *Artemia salina*

La eclosión de *Artemia salina* se llevó a cabo empleando 1 g de quistes en 1 l de agua con 30 g de sal de mar durante 48 horas.

Posteriormente, en una placa de 24 pozos se añadieron 100 μ l de la solución correspondiente de ciprofloxacino (se emplearon seis concentraciones diferentes por muestra) y 3,0 ml de solución salina con 20-30 nauplios de *Artemia salina*, y se dejó en incubación a 25°C durante 24 horas; terminado el tiempo de exposición se realizó el conteo de nauplios de *Artemia salina* muertos en cada pozo, se calculó el porcentaje de letalidad y se determinó la concentración letal media (CL50) mediante el método Probit.⁽⁷⁾

Resultados

En la determinación cuantitativa del ciprofloxacino residual, posterior a la irradiación ultravioleta (fig. 1), se puede observar una degradación lineal dependiente del tiempo de exposición.



Fuente: elaboración propia.

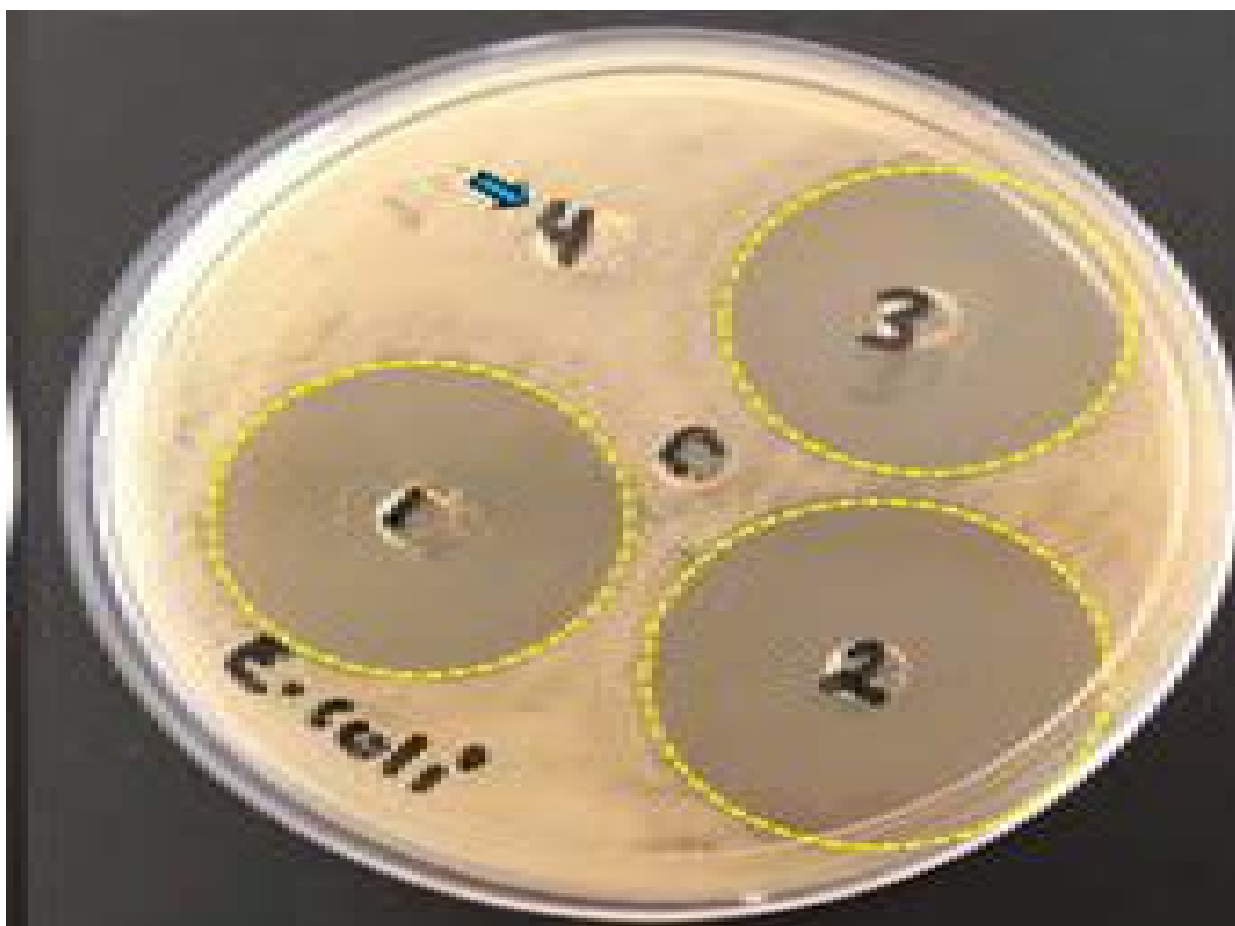
Fig. 1 - Disminución de concentración de CPX irradiado con luz ultravioleta tipo UV-C.

Halos de inhibición del ciprofloxacino irradiado

Con base en la cuantificación del antibiótico residual, se ajustaron las concentraciones para obtener una dilución final de 50 mg l⁻¹ de ciprofloxacino que se colocó en cada uno de los pozos.

Las dimensiones de los halos de inhibición obtenidos en la prueba de difusión en el pozo se muestran en las figuras 2 y 3, así como en la tabla, en las que es posible observar una disminución de la actividad antibiótica a partir de los 105 minutos de irradiación y una pérdida de la bioactividad a los 120 minutos, frente a todas las cepas evaluadas.

En el caso de los grampositivos (*Staphylococcus aureus* y *Bacillus clausii*) se observó una disminución progresiva en el tamaño de los halos de inhibición, a partir de los 45 minutos de irradiación, y se evidencia una reducción más pronunciada en la actividad inhibitoria del CPX, con halos de inhibición más pequeños (en *B. clausii* 25,0 mm a los 15 m, 24,5 mm de 30 a 90 minutos). Esta tendencia se intensifica con el aumento del tiempo de irradiación, llegando a un nulo halo de inhibición tras 120 m de irradiación.



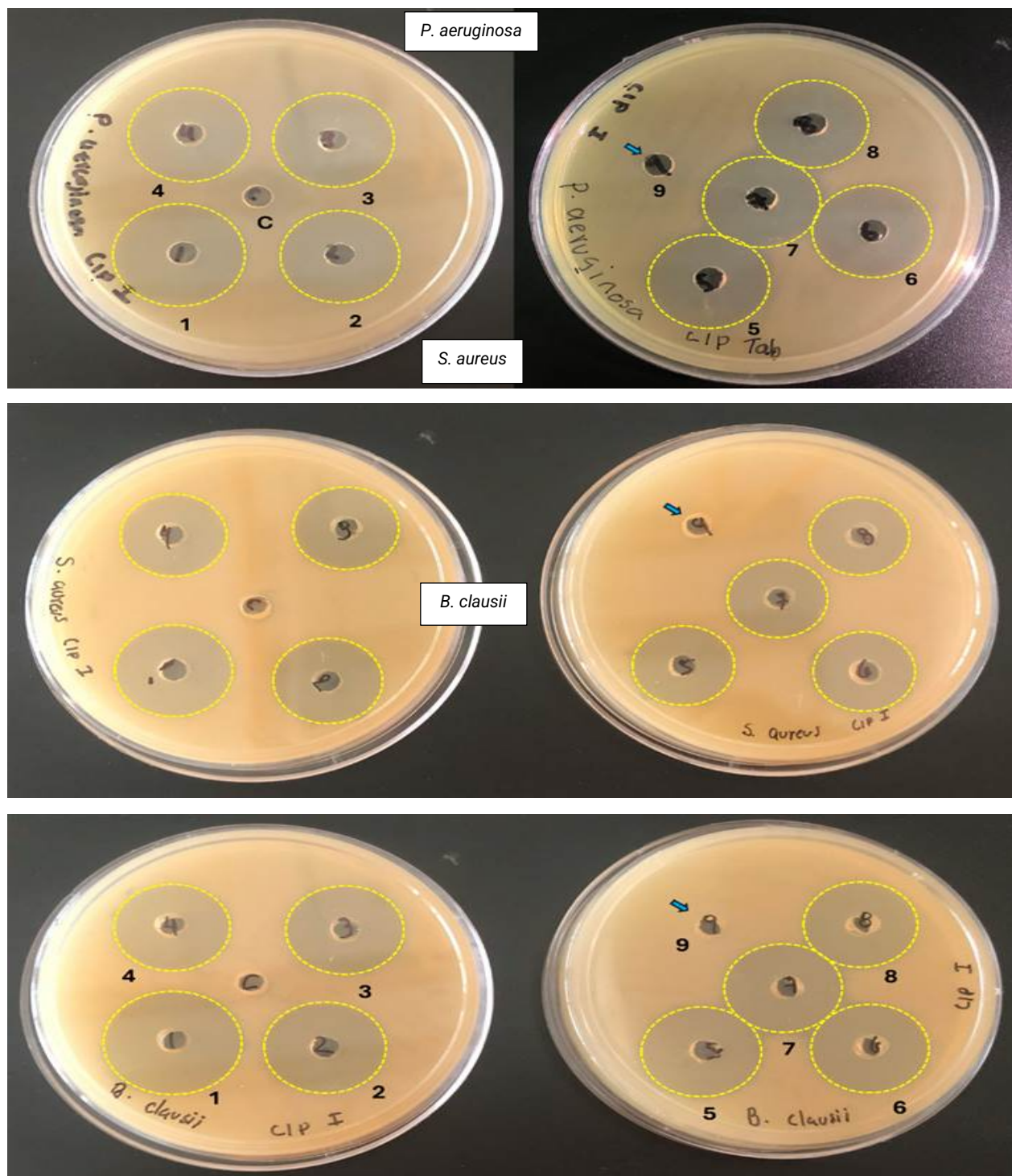
Legenda: 1= Testigo 1, 2= testigo 2, 3= 105 minutos, 4= 120 minutos y C= control negativo (agua estéril).

Todas las concentraciones se ajustaron a 50 mg L⁻¹.

Fig. 2 - Halos de inhibición *del crecimiento* de *E. coli* por CPX irradiado y no irradiado.

Tabla - Halos de inhibición observados en la prueba de difusión en pozo

	<i>E. coli</i>	<i>P. aeruginosa</i>	<i>S. aureus</i>	<i>B. clausii</i>
Testigo	32,2	27,1	25,0	28,0
CPX irradiado 105 minutos	30,6	24,0	22,0	24,0
CPX irradiado 120 minutos	0,0	0,0	0,0	0,0
Agua estéril	0,0	0,0	0,0	0,0

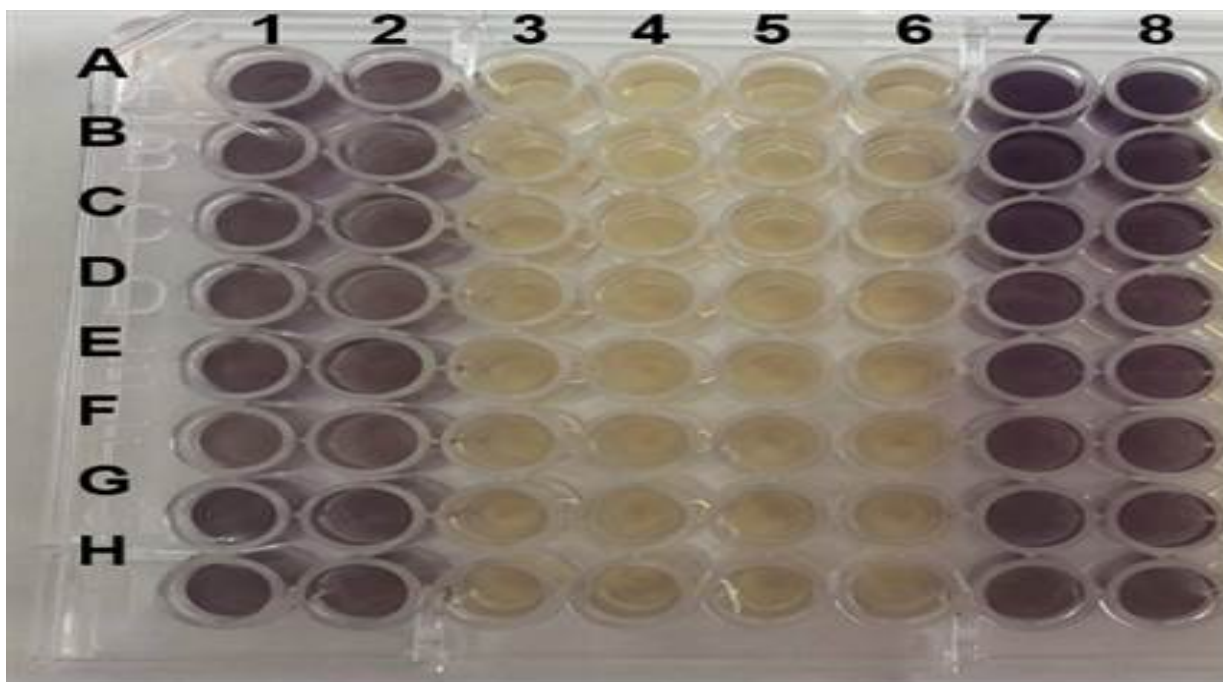


Legenda: Tiempo de irradiación: 1= Testigo (no irradiado), 2= 15 m, 3= 30 m, 4= 45 m, 5= 60 m, 6= 75 m, 7= 90 m, 8= 105 m, 9= 120 m y C= agua estéril.

Fig. 3 - Halos de inhibición de ciprofloxacino irradiado y no irradiado.

Resultados de la MIC de ciprofloxacino irradiado

Los resultados observados en la figura 4 muestran la influencia de la radiación UV-C en la actividad antibacteriana del ciprofloxacino (CPX) frente a *Escherichia coli*, en la que se observó que el ciprofloxacino tuvo una MIC menor a 100 mg l⁻¹ hasta los 105 minutos de irradiación, mientras que la actividad antibiótica se perdió en la muestra irradiada por 120 minutos. Con el resto de las cepas evaluadas, se observó un comportamiento similar.



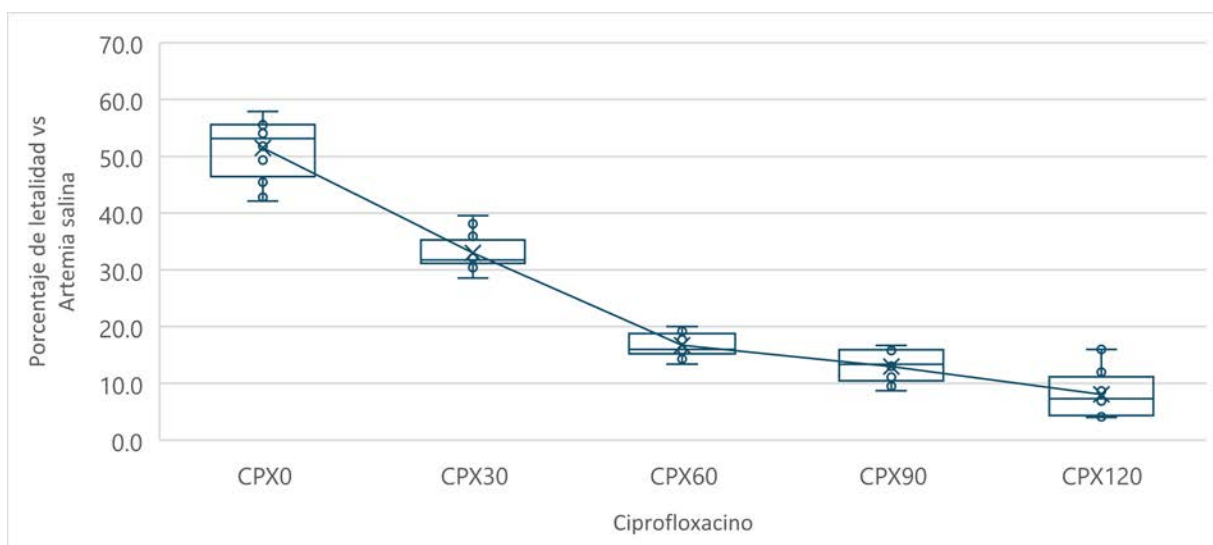
Leyenda: 1 y 2 = control de crecimiento bacteriano, 3 y 4 = testigo, 5 y 6 = CPX irradiado con UVC por 105 minutos, 7 y 8 = CPX irradiado con UVC por 120 minutos.

Fig. 4 - Determinación de la concentración mínima inhibitoria de ciprofloxacino con *Escherichia coli*.

Letalidad en *Artemia salina*

No se observó letalidad de *Artemia salina* (supervivencia del 100 %) cuando se expuso a los ciprofloxacinos de más de 120 minutos de irradiación con luz ultravioleta de 254 nm (fig. 5). Estos resultados se corresponden a la pérdida del principio activo determinado

en los diferentes tiempos de irradiación y permiten afirmar que no se producen compuestos tóxicos por la fotodescomposición.



Leyenda: CPX0 antibiótico no irradiado; en las claves, los números posterior a CPX indica el tiempo de irradiación de 30, 60, 90 y 120 minutos respectivamente (n=12).

Fig. 5 - Porcentaje de letalidad de *Artemia salina* expuesta a diferentes muestras de CPX.

Discusión

La disminución de la concentración de ciprofloxacino irradiado se debe principalmente a la degradación química inducida por la luz UV; al provocar la radiación la ruptura de sus enlaces y la transformación del ciprofloxacino en otros compuestos lo que disminuye su concentración original en la solución.^(8,9) Este proceso no solo reduce la cantidad de ciprofloxacino disponible, sino que también puede disminuir su actividad antibacteriana, ya que los productos de su degradación generalmente no poseen las mismas propiedades farmacológicas.^(10,11)

La cuantificación espectrofotométrica del ciprofloxacino se basa en su capacidad para absorber luz en la región UV del espectro electromagnético, específicamente alrededor de los 278 nm, en los que el ciprofloxacino tiene un máximo de absorción debido a su estructura cromófora; pues su anillo de quinolona y su grupo de cetona son las partes de

su molécula que principalmente absorben luz, al actuar como cromóforos, los que incluyen un sistema de doble enlace conjugado que absorben la radiación UV con la conducción de excitaciones electrónicas que pueden llevar a la ruptura de enlaces químicos y a la formación de radicales libres;^(12,13,14) es por ello que, mediante el uso de un espectrofotómetro, se puede medir la absorbancia de una solución de ciprofloxacino a esta longitud de onda. Según la Ley de Beer-Lambert, la absorbancia es directamente proporcional a la concentración del compuesto en la solución, lo que permite determinar cuantitativamente su concentración.⁽¹⁵⁾

El ciprofloxacino contiene grupos funcionales susceptibles a la radiación UV, ya que sus anillos de quinolona y de piperazina son particularmente reactivos. La conjugación de dobles enlaces en el anillo de quinolona permite la absorción de fotones UV, causando la transición de electrones π a niveles de energía más altos; esto puede llevar a la ruptura de enlaces y reacciones fotoquímicas.⁽¹⁶⁾ Los átomos de nitrógeno en el anillo de piperazina tienen pares de electrones solitarios que pueden interactuar con la radiación UV. Además, la presencia de estos átomos puede inducir la transferencia de electrones y facilitar reacciones fotoquímicas.⁽¹⁷⁾

La investigación mostró la disminución en la concentración de ciprofloxacino al ser irradiado con luz UV-C durante un período de 120 minutos. Inicialmente, la concentración estimada de ciprofloxacino fue 200 ppm, y a medida que aumentó el tiempo de irradiación, pudo ser observada una disminución constante en su concentración; y a los 15 minutos de irradiación, la concentración se redujo a 178 ppm, mientras que después de 120 minutos, la concentración final fue de 37 ppm; este descenso gradual indica que la exposición a la luz UV-C provoca la degradación del ciprofloxacino, reduciendo su presencia en la solución, aunque es necesario verificar que los productos de descomposición fotoquímica carezcan tanto de su actividad antibiótica como de la ecotoxicidad para descartar un efecto perjudicial al medio ambiente y a la salud de los organismos expuestos a ellos.⁽¹⁸⁾ Esta técnica podría ser eficaz para tratar contaminantes farmacéuticos de tipo quinolónicos en el agua, dado que la irradiación con UV-C demuestra un impacto significativo en la disminución de la concentración de CPX

a lo largo del tiempo.

La exposición del ciprofloxacino a la radiación UV resulta en la fotólisis del anillo de piperazina y la formación de varios productos de degradación. Entre los productos de degradación identificados se encuentran el ácido 1-ciclopropil-6-fluoro-4-oxo-7-piperazin-1-il-1,4-dihidroquinolin-3-carboxílico, el cual se forma debido a la ruptura del anillo de piperazina y la pérdida del grupo carboxilo.⁽¹⁵⁾ Además, se pueden formar especies reactivas de oxígeno (ROS) que contribuyen a la oxidación de otras partes de la molécula.⁽¹³⁾

Los resultados del estudio sugieren un importante efecto de la radiación ultravioleta en la disminución y eliminación de la actividad antibacteriana del ciprofloxacino contra una variedad de microorganismos, como *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Bacillus clausii*. La reducción progresiva en el tamaño de los halos de inhibición con una exposición prolongada a la radiación UV-C indica una disminución en la efectividad del ciprofloxacino como agente antibacteriano. Estos hallazgos concuerdan con investigaciones previas^(13,15) que han demostrado que la irradiación UVC puede afectar negativamente la estabilidad y la actividad de ciertos compuestos químicos, incluidos los antibióticos.^(19,20)

La completa abolición de la actividad antibacteriana del ciprofloxacino a los 120 minutos de exposición a la radiación UVC resalta la importancia de considerar el tiempo de exposición en la eficacia del tratamiento antimicrobiano y en el caso de la eliminación de antibiótico en aguas residuales. En un estudio realizado de manera similar, la acción de la UV-C sobre la dicloxacilina (un β -lactámico representativo) condujo a la eliminación de la actividad antimicrobiana, lo que indica un efecto positivo de este tratamiento hacia la mitigación de la resistencia a los antibióticos⁽²¹⁾ Así, los procesos fotoquímicos, basados en el uso de luz UV-C, representan una buena alternativa para la degradación de fluoroquinolonas.

Futuras investigaciones podrían explorar en mayor profundidad los mecanismos subyacentes detrás de la reducción en la actividad antibacteriana del ciprofloxacino después de la irradiación UV-C, así como evaluar la eficacia de otros agentes

antimicrobianos frente a la misma exposición. Estos estudios podrían contribuir a mejorar la comprensión de cómo optimizar el uso de antibióticos en entornos donde la irradiación UVC es una consideración relevante para la gestión de infecciones.

El estudio y comprensión de las bacterias, como *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* y *Bacillus clausii*, son fundamentales dada su relevancia en la salud humana y su capacidad para desempeñar roles tanto beneficiosos como perjudiciales en los ecosistemas. Estas bacterias son comúnmente encontradas en diferentes entornos, desde el suelo y el agua hasta el cuerpo humano, y su comportamiento y respuesta a diversos factores ambientales y químicos son objeto de intensa investigación.^(19,22) *Escherichia coli*, por ejemplo, es una bacteria ampliamente estudiada y utilizada como indicador de contaminación fecal en el agua y los alimentos, lo que la convierte en un microorganismo de importancia para la salud pública.

Por otro lado, la *Pseudomonas aeruginosa* es conocida por su versatilidad metabólica y su capacidad para infectar a pacientes inmunocomprometidos, lo que la convierte en una causa importante de infecciones nosocomiales.⁽²³⁾ *Staphylococcus aureus*, por su parte, es responsable de una amplia gama de infecciones, desde infecciones de la piel hasta enfermedades más graves como la septicemia y la neumonía; y su resistencia a los antibióticos representa un desafío significativo en el tratamiento clínico. En contraste, *Bacillus clausii* es una bacteria probiótica utilizada en la medicina para el tratamiento de trastornos gastrointestinales y la prevención de infecciones bacterianas, debido a su capacidad para competir con patógenos y modular la respuesta inmune del huésped.⁽²⁴⁾ Por lo que desarrollar bioensayos de toxicidad permite tener una idea más real acerca del comportamiento de fármacos como el ciprofloxacino sobre organismos acuáticos, en los que la *Artemia salina* es sensible a la exposición de ciprofloxacino⁽²⁵⁾ y a una notoria disminución de la letalidad del ciprofloxacino irradiado.

La letalidad presentó un comportamiento inversamente proporcional al tiempo de irradiación con luz UV-C, es decir, a mayor tiempo de irradiación menor letalidad.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales no pueden eliminar con eficiencia los residuos de fármacos como los antibióticos⁽²³⁾ por lo que el tratamiento de

ciprofloxacino con luz de tipo UV-C representa una opción viable y beneficiosa para disminuir el impacto negativo de la contaminación por fluoroquinolonas en los cuerpos de agua.

Lo aquí expuesto permite concluir que la exposición a radiación ultravioleta (UV-C) provoca una disminución significativa en la bioactividad del ciprofloxacino debido a la degradación del antibiótico. No se observó un efecto bactericida del ciprofloxacino irradiado por 120 minutos en ninguna de las cepas evaluadas (*Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, y *Bacillus clausii*). Además, los ensayos con *Artemia salina* demostraron una menor toxicidad del ciprofloxacino irradiado suponiendo que no se forman derivados más tóxicos, por lo que la radiación UV-C puede ser utilizada como una herramienta eficaz para reducir la concentración de ciprofloxacino en entornos acuáticos contaminados, contribuyendo potencialmente a la mitigación de la resistencia bacteriana.

Referencias bibliográficas

1. Browne AJ, Chipeta MG, Haines-Woodhouse G, Kumaran EPA, Hamadani BHK, Zaraa S, et al. Global antibiotic consumption and usage in humans, 2000-18: a spatial modelling study. The Lancet Planetary Health. 2021;5(12):e893-904. DOI: [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(21\)00280-1](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(21)00280-1)
2. Klein EY, Milkowska-Shibata M, Tseng KK, Sharland M, Gandra S, Pulcini C, et al. Assessment of WHO antibiotic consumption and access targets in 76 countries, 2000–15: an analysis of pharmaceutical sales data. The Lancet Infectious Diseases. 2020;21(1):107-15. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1473-3099\(20\)30332-7](https://doi.org/10.1016/s1473-3099(20)30332-7)
3. Meléndez J, García Y, Galván V, Díaz de León L, Vargas K, Mejía J, et al. Contaminantes emergentes. Problemática ambiental asociada al uso de antibióticos. Rev Salud Ambient. 2020 [acceso 20/08/2026];20(1):53-61. Disponible en: <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/1033>
4. Martínez I, Soto J, Lahora A. Antibiotics as emerging pollutants. Ecotoxicological risk

and control in wastewater and reclaimed water. *Ecosistemas*. 2020;29(3). DOI: <https://doi.org/10.7818/ecos.2070>

5. Cerro M., Castro I, Toledo L, Gómez M, Saldívar D. Análisis de fármacos en aguas residuales de tres hospitales de la ciudad de Puebla, México. *Ingeniería del agua*. 2021 [acceso 20/08/2026];25(1):59-73. Disponible en:

<https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/13660>

6. Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI). Performance standards for antimicrobial susceptibility testing; approved standard. Twenty-second informational supplement. CLSI Document M100-S22. Wayne, PA: CLSI; 2012 [acceso 20/08/2026]. Disponible en: <https://clsi.org/about>

7. Maza D, Prieto MJ, Alonso SV, Chiaramoni N. (2024). Artemia salina como organismo bioindicador para metales pesados. *Divulgatio. Perfiles académicos De Posgrado*. 2024;8(23):1-22. DOI: <https://doi.org/10.48160/25913530di23.426>

8. Tozar T, Boni M, Staicu A, Pascu ML. Optical Characterization of Ciprofloxacin Photolytic Degradation by UV-Pulsed Laser Radiation. *Molecules*. 2021;26(8):2324. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26082324>

9. Razuc M, Band BSF, Garrido M. Data fusion applied to the photodegradation study of ciprofloxacin using hyphenated detection systems (UV–Vis and fluorescence) and multivariate curve resolution. *Microchemical Journal*. 2018;138:180-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.01.012>

10. Sharma M, Rajput D, Kumar V, Jatain I, Aminabhavi TM, Mohanakrishna G, *et al*. Photocatalytic degradation of four emerging antibiotic contaminants and toxicity assessment in wastewater: A comprehensive study. *Environmental Research*. 2023;231:116132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116132>

11. Rodríguez L, Cela R, Núñez A, Álvarez E, Fernández D, Arias M. Photodegradation of Ciprofloxacin, Clarithromycin and Trimethoprim: Influence of pH and Humic Acids. *Molecules*. 2021;26(11):3080. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26113080>

12. Mahmoud TY, Hamza IS, Jarallah AL. Spectrophotometric Method for the Determination of Ciprofloxacin in Pure and Pharmaceutical Preparations: Development

and Validation. Engineering Proceedings. 2024;100:164. DOI: <https://doi.org/10.3390/engproc2023059164>

13. Abdulrahman SA, Shnain ZY, Ibrahim SS, Majdi HSh. Photocatalytic Degradation of Ciprofloxacin by UV Light Using N-Doped TiO₂ in Suspension and Coated Forms. Catalysts. 2022;12(12):1663. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal12121663>

14. Hu X, Hu X, Peng Q, Zhou L, Tan X, Jiang L, et al. Mechanisms underlying the photocatalytic degradation pathway of ciprofloxacin with heterogeneous TiO₂. Chemical Engineering Journal. 2019;380:122366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122366>

15. Bai X, Chen W, Wang B, Sun T, Wu B, Wang Y. Photocatalytic Degradation of Some Typical Antibiotics: Recent Advances and Future Outlooks. International Journal Of Molecular Sciences. 2022;23(15):8130. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23158130>

16. Klementová Š, Poncarová M, Langhansová H, Lieskovská J, Kahoun D, Fojtíková P. Photodegradation of fluoroquinolones in aqueous solution under light conditions relevant to surface waters, toxicity assessment of photoproduct mixtures. Environmental Science P. Research. 2021;29(10):13941-62. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16182-6>

17. Patel J, Singh AK, Carabineiro AC. Assessing the Photocatalytic Degradation of Fluoroquinolone Norfloxacin by Mn:ZnS Quantum Dots: Kinetic Study, Degradation Pathway and Influencing Factors. Nanomaterials. 2020;10(5):964. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano10050964>

18. Guo Y, Peng B, Liao J, Cao W, Liu Y, Nie X, et al. Recent advances in the role of dissolved organic matter during antibiotics photodegradation in the aquatic environment. The Science Of The Total Environment. 2024;916:170101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170101>

19. Hayri-Senel T, Kahraman E, Sezer S, Erdol-Aydin N, Nasun-Saygili G. Photocatalytic degradation of ciprofloxacin from water with waste polystyrene and TiO₂ composites. Heliyon. 2024;10(3):e25433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25433>

20. Lu Z, Ling Y, Sun W, Liu C, Mao T, Ao X, et al. Antibiotics degradation by UV/chlor(am)ine advanced oxidation processes: A comprehensive review. Environmental Pollution. 2022;308:119673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119673>

21. Costa LN, Nobre FX, Lobo AO, De Matos JME. Photodegradation of ciprofloxacin using Z-scheme TiO₂/SnO₂ nanostructures as photocatalyst. *Environmental Nanotechnology Monitoring & Management*. 2021;16:100466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100466>
22. Guo HG, Gao NY, Chu WH, Li L, Zhang YJ, Gu JS, et al. Photochemical degradation of ciprofloxacin in UV and UV/H₂O₂ process: kinetics, parameters, and products. *Environmental Science And Pollution Research*. 2012;20(5):3202-13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1229-x>
23. Yang X, Chen Z, Zhao W, Liu C, Qian X, Zhang M, et al. Recent advances in photodegradation of antibiotic residues in water. *Chemical Engineering Journal*. 2020;405:126806. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126806>
24. Tofanello A, Belletti E, Brito AMM, Nantes IL. Photodegradation of Ciprofloxacin-Zinc Complexes Produced at the Interface of ZnO and Cu-Doped ZnO Crystals. *Materials Research*. 2021;24(6). DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2021-0198>
25. Andrango JA, Daquilema A. Evaluación ecotoxicológica de los contaminantes emergentes, diclofenaco y ciprofloxacin, de forma simultánea e independiente, sobre bioindicadores acuáticos [tesis de Ingeniería Civil y Ambiental]. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Repositorio Digital; 2020. DOI: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21139>

Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Conceptualización: María Magali Guillen-Morales y Rafael Manuel de Jesús Mex-Álvarez.

Curación de datos: María Magali Guillen-Morales, Rafael Manuel de Jesús Mex-Álvarez y María Isabel Novelo-Pérez.

Análisis formal: Rafael Manuel de Jesús Mex-Álvarez y Roger Enrique Chan-Martínez.

Adquisición de fondos: María Magali Guillen-Morales y Rafael Manuel de Jesús Mex-Álvarez.

Investigación: María Magali Guillen-Morales, Rafael Manuel de Jesús Mex-Álvarez, María Isabel Novelo-Pérez y Dylan Manuel Ferrer-Dzul.

Metodología: María Magali Guillen-Morales, Rafael Manuel de Jesús Mex-Álvarez y Patricia Garma Quen.

Administración del proyecto: María Magali Guillen-Morales y Rafael Manuel de Jesús Mex-Álvarez.

Recursos: María Magali Guillen-Morales, Rafael Manuel de Jesús Mex-Álvarez y Roger Chan Martínez.

Software: Rafael Manuel de Jesús Mex-Álvarez y Roger Enrique Chan-Martínez.

Supervisión: María Magali Guillen-Morales y Patricia Garma-Quen.

Validación – Verificación: María Magali Guillen-Morales y Rafael Manuel de Jesús Mex-Álvarez.

Visualización: Rafael Manuel de Jesús Mex-Álvarez, Roger Enrique Chan-Martínez y Dylan Manuel Ferrer-Dzul.

Redacción - borrador original: María Magali Guillen-Morales, Rafael Manuel de Jesús Mex-Álvarez, María Isabel Novelo-Pérez y Patricia Garma Quen.

Redacción - revisión y edición: Rafael Manuel de Jesús Mex-Álvarez, Roger Enrique Chan-Martínez y Dylan Manuel Ferrer-Dzul.