

Eje 2

Riesgo ambiental y biomarcadores

Capítulo 2.1

Riesgo ambiental: Eficiencia de *Vibrio fischeri* como bioensayo toxicológico en cuerpos de agua

Villaseñor Vargas Tania¹

Guerrero de León Aída Alejandra²

Gómez González, Yesenia Guadalupe³

DOI: <https://doi.org/10.61728/AE20259440>



¹ Estudiante del Doctorado en Agua y Energía, adscrito al Departamento de Estudios del Agua y la Energía del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. e-mail: tania.villasenor3610@alumnos.udg.mx

² Profesora investigadora Departamento de Estudios del Agua y la Energía del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. e-mail: aida.guerrero@academicos.udg.mx

³ Profesora investigadora en el Instituto Transdisciplinar de Investigación y Servicios de la Universidad de Guadalajara. e-mail: tecmicrobiologicos.itrans@cupei.udg.mx

1. Introducción

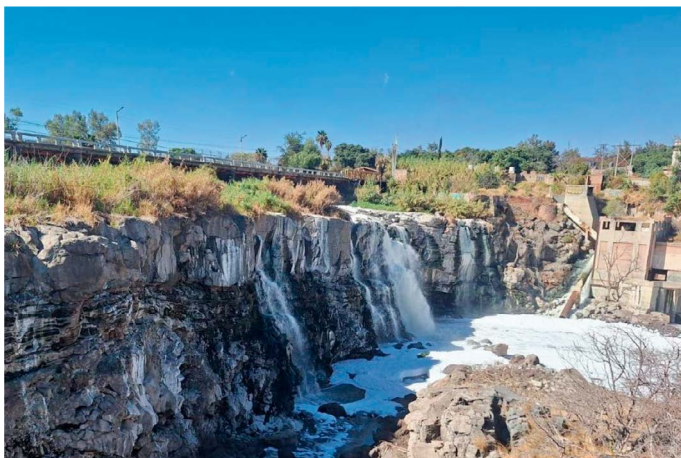
El acceso al agua es uno de los principales desafíos globales del siglo XXI, con graves implicaciones para la salud pública y el medio ambiente. De acuerdo con la literatura consultada, se estima que más del 40% de la población mundial podría enfrentar escasez de agua en los próximos años, afectando especialmente a países en desarrollo. La falta de saneamiento adecuado agrava esta situación, favoreciendo la propagación de enfermedades prevenibles. Además, esta crisis se intensifica por una gestión ineficiente de los recursos hídricos y el deterioro de su calidad, lo que exige soluciones urgentes que equilibren la creciente demanda con la conservación de este recurso vital (Davis, 2023).

La toxicología ambiental acuática se describe en la literatura como la disciplina que estudia los compuestos químicos sobre los organismos acuáticos, desde el nivel subcelular hasta los ecosistemas completos, considerando impactos agudos y crónicos como la mortalidad, las alteraciones en el crecimiento y la reproducción, así como los procesos de recuperación tras la exposición. En los últimos años, ha surgido una subdisciplina que relaciona la estructura molecular de los compuestos con sus efectos tóxicos, con el objetivo de desarrollar modelos predictivos basados en sus propiedades estructurales.

Por otro lado, sin cambios significativos, se ha documentado que la crisis global del agua no se debe únicamente a la escasez del recurso, sino principalmente a la calidad del agua disponible. La bibliografía consultada documenta que la contaminación masiva de ríos, lagos y acuíferos representa una amenaza crítica para la salud pública y los ecosistemas. Además, el vertido directo de aguas residuales domésticas y la filtración de efluentes de fosas sépticas hacia los acuíferos agravan la insalubridad del agua, comprometiendo la sostenibilidad ambiental (Rand, 1995; Arrojo, 2010).

Figura 1

Descargas residuales en el trayecto del río Santiago.



Fuente: Aida Alejandra Guerrero de León, 2025.

El aumento en la producción y uso de sustancias tóxicas ha sido reportado en la literatura, así como el papel del medio acuático como receptor frecuente de estos compuestos, lo que ha generado una necesidad urgente de evaluar sus efectos, no solo en los seres humanos, sino también en los organismos y ecosistemas. Diversos estudios han demostrado que prevenir la contaminación resulta significativamente más rentable, tanto económica como ambientalmente, que intentar restaurar un ecosistema ya deteriorado. La presencia de compuestos xenobióticos en el entorno natural impacta negativamente en sustancias esenciales y elementos físicos y biológicos que sustentan los ecosistemas, además de alterar procesos fundamentales para su funcionamiento. La magnitud de estos efectos varía según las propiedades fisicoquímicas de los contaminantes y sus metabolitos, su concentración y frecuencia de liberación, así como las características del ecosistema receptor (Van Leewen, 1990; Ramamoorthy y Baddaloo, 1995).

Cada ecosistema es único y no puede ser representado por otro, ya que su respuesta a contaminantes varía según sus características específicas. Por eso, para evaluar el impacto de sustancias tóxicas en el medio natural, es esencial considerar todas las condiciones particulares del ecosistema

afectado (Koyman, 1987; Van Leewen, 1990; Sibila, 2008). El crecimiento poblacional, tecnológico e industrial ha incrementado la presencia de sustancias químicas en el ambiente, cuyos efectos en los seres vivos aún no se comprenden totalmente. Según Lavoisier, la materia y la energía se transforman, pero no se destruyen, por lo que estas sustancias deben acumularse, transformarse o eliminarse. Un sistema es estable cuando los organismos o el ambiente pueden asimilar o eliminar fácilmente esas sustancias (Albert, 1985). La clasificación de la contaminación del agua se basa en varios parámetros, que incluyen el tipo de escurrimiento, la naturaleza del contaminante, su composición química y si es tóxico o no. Según Díaz (2004), existen dos tipos principales de contaminación:

- a) Contaminación localizada: Se origina en un punto específico, generalmente debido a actividades industriales o descargas domésticas.
- b) Contaminación no localizada: Ocurre cuando los contaminantes se liberan en áreas determinadas y luego son arrastrados hacia los cuerpos de agua por la lluvia o la erosión. Es importante identificar los distintos contaminantes, ya que sus impactos en el agua varían y afectan las regulaciones industriales y las medidas necesarias para restaurar los recursos.

El objetivo de esta revisión bibliográfica es sintetizar y analizar la literatura científica existente sobre el uso de *Vibrio fischeri* como bioensayo para la evaluación del riesgo toxicológico ambiental, especialmente en el monitoreo de cuerpos de agua contaminados. Se abordan tres aspectos clave reportados en estudios previos:

1. Características biológicas de *Vibrio fischeri*: Se exploran sus propiedades biológicas, destacando su capacidad de bioluminiscencia y su sensibilidad a los contaminantes.
2. Mecanismos de detección de toxicidad: Se analizan los procesos bioquímicos que permiten a *Vibrio fischeri* detectar sustancias tóxicas y cómo esto afecta su luminosidad.
3. Revisión de estudios previos: Se comparan investigaciones anteriores que han utilizado esta bacteria para identificar patrones y evaluar su efectividad como herramienta de monitoreo ambiental.

El artículo busca proporcionar una visión integral sobre la utilidad de *Vibrio fischeri* para la evaluación de riesgos toxicológicos, resaltando su potencial para complementar metodologías existentes en la gestión de recursos hídricos y la investigación ambiental.

1.1. Antecedentes

La enfermedad de Minamata, causada por contaminación por mercurio, evidenció que los impactos en la cadena alimentaria marina pueden detectarse antes de afectar a la población humana. Este caso resalta la importancia de monitorear cambios iniciales en los ecosistemas como señales tempranas de daños mayores, un enfoque clave en investigaciones recientes sobre biomagnificación y alteración de la biota y funciones de ecosistemas acuáticos (Yorifuji et al., 2013). El DDT es un contaminante persistente conocido por su capacidad de bioacumularse y biomagnificarse. Estudios desde los años cincuenta y sesenta evidenciaron su impacto negativo en aves silvestres, hallazgos que recientes investigaciones sobre plaguicidas clorados han confirmado. Estos casos subrayan la necesidad de un enfoque integral que considere tanto la teoría como la dinámica de comunidades y ecosistemas para evaluar contaminantes específicos (Planes y Fuchs, 2015).

Investigaciones coinciden en la necesidad de una teorización integral en ecotoxicología. No basta con documentar casos emblemáticos; es esencial vincularlos con el contexto ecológico y adaptar soluciones científicas a escenarios reales. En este contexto, el uso de bioensayos sensibles como el de *Vibrio fischeri* se vuelve crucial para detectar la toxicidad en etapas tempranas del daño ambiental. Casos como Minamata y el DDT fundamentaron el desarrollo de modelos predictivos en ecotoxicología, disciplina que surgió para enfrentar crisis ambientales integrando conceptos como biomagnificación y estructura molecular para prever efectos tóxicos (Newman, 2001). La literatura revisada reporta que, en áreas altamente contaminadas, como el Río Santiago, se han empleado bioensayos con *Vibrio fischeri* para evaluar y mitigar impactos. La toxicología ambiental se formalizó en los años 30 al establecer relaciones causa-efecto entre contaminantes y daños biológicos en peces,

utilizando pruebas de mortalidad como herramienta principal (Ramírez y Mendoza, 2008).

Entre 1940 y 1960, la toxicología ambiental avanzó gracias a investigaciones que incorporaron indicadores ecológicos como el crecimiento y la reproducción en organismos acuáticos y terrestres. Este período destacó la importancia de un enfoque interdisciplinario que integrara química, biología, ecología y toxicología. Estudios sobre plaguicidas clorados, como el DDT, evidenciaron su persistencia y efectos disruptivos en las cadenas tróficas de diversos ecosistemas (Moriarty, 1988).

En 1977, un encuentro histórico reunió a científicos, representantes gubernamentales e industriales con el fin de formalizar los criterios para las pruebas de toxicidad usando organismos vivos. Este evento marcó un hito al establecer los criterios esenciales que debían cumplir estas pruebas, como la relevancia ecológica de los resultados, la validez científica y legal de la información generada, su capacidad para predecir efectos ecológicos, su aplicabilidad a una variedad de compuestos químicos y su simplicidad y rentabilidad económica (Henry, 2006).

Las evaluaciones de toxicidad aguda, que cumplen con la mayoría de estos criterios, se consolidaron como herramientas centrales en los estudios toxicológicos. Los primeros organismos acuáticos utilizados en estas pruebas incluyeron a la carpa dorada, debido a su facilidad de manejo y resistencia en condiciones de laboratorio, en comparación con especies más relevantes ecológica y económicamente, como las truchas. Estos estudios resaltaron la variabilidad en la sensibilidad a los contaminantes entre especies, con diferencias que podían variar en órdenes de magnitud (Macek, 1980). Las pruebas de toxicidad aguda, aunque valiosas, tienen limitaciones, ya que demostrar mortalidad del 50 % en una especie no garantiza daño ecológico a nivel comunitario o ecosistémico. Estudios recientes indican que estas pruebas pueden subestimar efectos subletales, como cambios en comportamiento, reproducción y crecimiento, que impactan significativamente la dinámica ecológica (Ramírez y Mendoza, 2008; Newman, 2001). Estas limitaciones refuerzan la necesidad de integrar herramientas más amplias, como los bioensayos basados en *Vibrio fischeri*, que permiten evaluar impactos no solo a nivel de organismos individuales, sino también en comunidades y ecosistemas, superando las deficiencias de las pruebas tradicionales de toxicidad.

A pesar de sus limitaciones, las pruebas de toxicidad aguda son fundamentales para crear bases de datos que permitan comparar la sensibilidad de diferentes especies frente a contaminantes específicos. En contextos de alta contaminación, estas pruebas son especialmente relevantes, ya que ofrecen una caracterización rápida y económica para identificar los contaminantes más problemáticos. La información generada es crucial para el desarrollo de estrategias de mitigación y se utiliza frecuentemente en programas de monitoreo ambiental (Ramírez y Mendoza, 2008).

Diversos autores señalan que los resultados de laboratorio deben interpretarse como estimaciones de los efectos ambientales, siendo herramientas económicas y accesibles para evaluar riesgos por contaminantes agrícolas, acuícolas, industriales y urbanos. Combinar estas pruebas con bioensayos como los de *Vibrio fischeri* ofrece una visión más integral de la toxicidad, considerando efectos agudos y subletales, lo cual es clave para enfrentar la contaminación en ecosistemas complejos (Henry, 2006).

1.2. Toxicidad: Impacto de los compuestos químicos en diversos organismos

La mayoría de las pruebas de toxicidad se han desarrollado históricamente utilizando especies de ambientes templados, principalmente en Norteamérica. No obstante, esta tendencia ha evolucionado rápidamente. En México, estas pruebas inicialmente se adaptaron a partir de metodologías extranjeras, pero con el tiempo se han ajustado para responder a las condiciones locales específicas. Actualmente, se están diseñando metodologías que reflejan mejor las necesidades y características de cada país, dado que las diferencias geográficas en la sensibilidad de las especies frente a los contaminantes son significativas (Chapman et al., 2006). Estas pruebas son esenciales, ya que vinculan la química ambiental, que estudia la presencia de sustancias en lugares inapropiados o en concentraciones superiores a los niveles normales (Ramírez y Mendoza, 2008). La toxicidad se utiliza como indicador para evaluar el grado tóxico o venenoso de ciertos elementos, considerando sus impactos en organismos completos, bacterias o plantas. Los efectos de toxicidad observados en los ensayos se clasifican en dos categorías principales, según Reinaldo (2011):

- a) Toxicidad aguda: Resultante de exposiciones breves pero intensas a concentraciones tóxicas.
- b) Toxicidad crónica: Producida por exposiciones prolongadas a concentraciones subletales.

Un tóxico se define como cualquier agente químico o físico que provoca efectos adversos en organismos vivos y en el medio ambiente. Estos efectos pueden ser reversibles o irreversibles, dependiendo de factores como la dosis (cantidad absorbida por unidad de peso corporal) y el tiempo de exposición (Sanz y Repetto, 1993; Arango, 2012).

Para evaluar la toxicidad de compuestos, se utilizan bioensayos que miden impactos biológicos a través de biomarcadores. Un ejemplo es *Vibrio fischeri*, una bacteria luminiscente sensible a contaminantes, que permite cuantificar la toxicidad aguda de forma rápida y eficiente (ISO 11348-3, 2018). Este método es fundamental para analizar cuerpos de agua contaminados y evaluar riesgos asociados a metales pesados, apoyando la propuesta de estrategias de mitigación. Además, combinar bioensayos tradicionales con herramientas modernas, como los basados en *Vibrio fischeri*, ofrece una perspectiva más integral sobre la toxicidad ambiental. Esto permite evaluar tanto efectos agudos como subletales, proporcionando información crítica para comprender y gestionar los desafíos ambientales en ecosistemas complejos y diversos.

Los efluentes industriales descargados en cuerpos de agua contienen mezclas complejas de contaminantes orgánicos e inorgánicos, cuyos efectos tóxicos no pueden evaluarse completamente mediante análisis químicos convencionales (García, 2014). Aunque estos análisis proporcionan datos iniciales sobre contaminantes individuales, presentan limitaciones significativas:

1. Altos costos y dificultades técnicas para analizar todas las sustancias presentes.
2. Incapacidad para predecir efectos sinérgicos de mezclas contaminantes.

Por ello, los bioensayos con organismos acuáticos, como *Vibrio fischeri*, son herramientas esenciales para evaluar la toxicidad integrada de los efluentes industriales. Su aplicación en sistemas altamente contaminados permite:

1. Medir impactos reales, más allá de las concentraciones químicas.
2. Identificar zonas críticas mediante respuestas biológicas como la inhibición de luminiscencia.

Además, la combinación de organismos pertenecientes a diferentes niveles tróficos, como algas y crustáceos, mejora la precisión en la evaluación de riesgos eco-toxicológicos (ISO 2018). Los bioensayos toxicológicos constituyen una herramienta fundamental para evaluar efectos tanto agudos como crónicos de los contaminantes en sistemas acuáticos. Organismos como *Vibrio fischeri*, *Daphnia magna* y *Raphidocelis subcapitata* son ampliamente utilizados debido a su sensibilidad estandarizada (ISO 11348-3, 2018), además de sus respuestas rápidas, que permiten determinar parámetros clave como:

CE50: La concentración efectiva que produce el 50% del efecto máximo esperado.

CL50: La concentración letal que ocasiona la muerte del 50% de los organismos en una población (Solís, 2022).

En México, el estudio de Carreño et al. (2018) en el Río Lerma representa un referente significativo. Sin embargo, este trabajo se ha centrado exclusivamente en la evaluación de sedimentos utilizando el protocolo Microtox® en fase sólida, identificando niveles extremos de toxicidad (CE50: 108-16,436 mg/L) en tributarios afectados por descargas urbanas e industriales. Según la literatura revisada, aún existen vacíos de conocimiento en cuanto a estudios de toxicidad en la columna de agua para sistemas fluviales mexicanos. Hasta ahora, los sedimentos han sido la matriz ambiental más analizada, dejando de lado la evaluación integral de la calidad del agua.

Esta limitante refuerza la necesidad de investigaciones como la presente, que buscan ampliar el enfoque tradicional mediante la evaluación simultánea de agua y sedimentos. Este enfoque permitiría una caracterización más completa de la contaminación en sistemas fluviales como el Río Santiago, aportando información crítica para diseñar estrategias efectivas de mitigación y gestión ambiental. El estudio de Carreño et al. (2018), aunque centrado en sedimentos del Río Lerma y no en agua, es

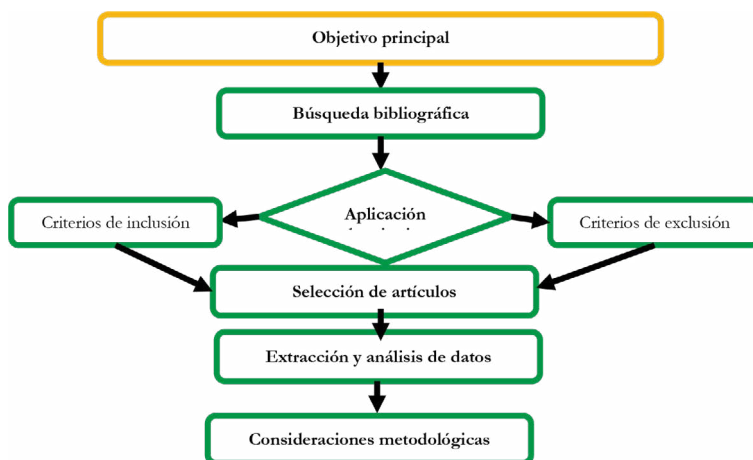
relevante para evaluar la toxicidad en sistemas acuáticos. Los sedimentos actúan como reservorios donde los contaminantes se acumulan y pueden liberarse lentamente, ofreciendo una visión integrada de la contaminación histórica y su impacto, a diferencia de las mediciones puntuales en el agua (Grinberg et al., 2018).

La investigación realizada en el Río Lerma, reportada en la literatura, establece un precedente metodológico esencial para estudios en ríos mexicanos, demostrando que los bioensayos con *Vibrio fischeri* son herramientas eficaces para identificar áreas de acumulación crítica de contaminantes. Incluso cuando los análisis de agua no reflejan concentraciones alarmantes, estos bioensayos permiten detectar zonas problemáticas que requieren atención prioritaria. El enfoque en tributarios industriales, donde la toxicidad es frecuentemente más elevada que en el cauce principal, resulta particularmente valioso para el presente estudio en el Río Santiago.

2. Metodología

El presente estudio constituye una investigación cualitativa/cuantitativa de revisión documental enfocada en evaluar la viabilidad del uso de *Vibrio fischeri* como bioindicador en cuerpos de agua. La metodología se basó en la revisión sistemática de literatura científica, análisis crítico de estudios empíricos previos y síntesis de evidencia para determinar la aplicabilidad y eficiencia de esta herramienta biotecnológica. No se realizaron ensayos experimentales directos, sino que se analizó y sintetizó información proveniente de 38 artículos científicos que reportaron trabajo de campo y laboratorio.

Figura 2
Diagrama de flujo metodológico



Fuente: Elaboración propia

Esta revisión bibliográfica aborda la toxicidad en el agua, utilizando *Vibrio fischeri* como indicador de riesgo ambiental. Su objetivo principal es sintetizar la literatura existente sobre la efectividad de *Vibrio fischeri* en la evaluación de cuerpos de agua, identificando tendencias y metodologías en la investigación, así como los riesgos ambientales. En la tabla 1 se presentan los criterios utilizados para seleccionar estudios incluidos en esta revisión bibliográfica.

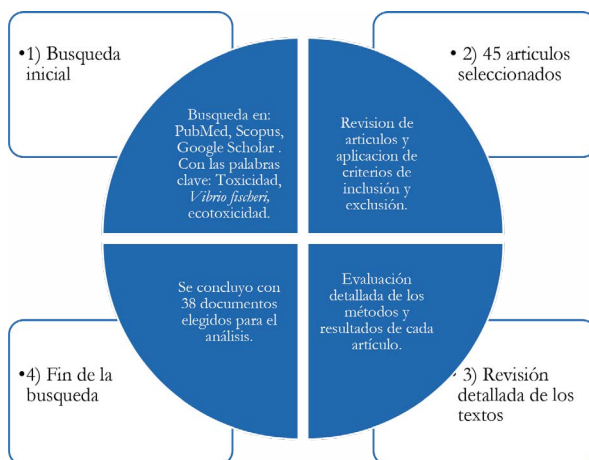
Tabla 1
Criterios de inclusión y exclusión para la selección de estudios.

Inclusión	Exclusión
1. Relevancia temática: Artículos que abordaran el uso de <i>Vibrio fischeri</i> en bioensayos para la detección de toxicidad ambiental.	1. Irrelevancia temática: Artículos que no se centraran en el uso de bioensayos o que abordaran únicamente aspectos no relacionados con la toxicología ambiental.
2. Tipo de estudio: Se incluyeron estudios experimentales, revisiones y artículos de investigación que presentaran datos sobre la eficacia de <i>Vibrio fischeri</i> y que utilicen organismos indicadores diferentes.	2. Tipo de publicación: Se excluyeron comentarios, opiniones y estudios que no presentaran datos experimentales o revisiones sistemáticas.
3. Idioma: Se consideraron publicaciones en inglés y español para garantizar un amplio acceso a la literatura relevante.	3. Fuentes no científicas: Se descartaron documentos como informes técnicos no revisados por pares, tesis no publicadas y literatura gris.
4. Tiempo. Artículos de investigación y revisiones sistemáticas publicados entre 1990 y 2024.	

Fuente: Elaboración propia.

Los datos reportados en los estudios incluidos fueron organizados y analizados para identificar patrones, tendencias y lagunas en la literatura sobre el uso de *Vibrio fischeri* en el contexto de la toxicología ambiental. Esta metodología proporciona una base sólida para comprender la eficacia y aplicabilidad de este bioensayo en la evaluación de riesgos ambientales. La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo en bases de datos académicas, entre ellas PubMed, Scopus y Google Scholar, además de literatura gris, como tesis e informes técnicos relevantes. Se utilizaron términos de búsqueda combinados, como ecotoxicidad, *Vibrio fischeri*, contaminación del agua, toxicidad, riesgo ambiental y calidad del agua. El proceso de selección de documentos para la elaboración de este artículo consistió en las siguientes fases (Figura 3):

Figura 3
Proceso de selección de documentos:



Fuente: elaboración propia.

2.1 Extracción y análisis de datos

De los 38 estudios seleccionados en la revisión, se identificó la siguiente información relevante reportada en los mismos:

- Referencias bibliográficas: Autor, año y título del estudio.
- Resultados principales: Hallazgos relevantes sobre ecotoxicidad y la eficacia de *Vibrio fischeri*.
- Metodologías utilizadas: Protocolos de prueba, condiciones experimentales y tipo de análisis realizados.
- Contexto del estudio: Contaminantes evaluados y su relación con riesgos ambientales.

La información reportada fue organizada a partir de las publicaciones para permitir el análisis de tendencias y patrones. Además, se integraron resultados cuantitativos y cualitativos para garantizar una comprensión más amplia de los datos.

2.2 Consideraciones metodológicas

Como parte de la evaluación metodológica, se identificaron algunas limitaciones (Tabla 2):

Tabla 2
Limitaciones metodológicas

Aspecto	Descripción	Impacto en el estudio
Sesgos en la selección	El proceso dependió de las fuentes disponibles en las bases específicas	Limitación en la representatividad de los estudios revisados
Variabilidad en la calidad	Diferencias en el diseño experimental, metodología y profundidad de análisis en los artículos revisados.	Dificultad para obtener resultados comparables
Limitaciones de accesibilidad	Restricciones para acceder a estudios relevantes debido a barreras económicas o de idioma	Menor diversidad de perspectiva en los datos recopilados
Deficiencias en datos históricos	Falta de información actualizada en algunos estudios que dificultó el análisis longitudinal	Impacto en la validez temporal de los resultados obtenidos

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la tabla anterior, los aspectos metodológicos presentan desafíos importantes que impactan tanto la representatividad como la calidad de los datos recopilados. Estas limitaciones no solo dificultan la comparación entre estudios, sino que también subrayan la necesidad de un enfoque más riguroso y uniforme en el diseño y la selección de investigaciones futuras. A pesar de estas restricciones, la integración de datos cualitativos y cuantitativos permitió una interpretación más amplia y enriquecedora, contribuyendo a una comprensión más integral del problema estudiado.

3. Resultados

La evaluación de la toxicidad ambiental en sistemas acuáticos y agrícolas constituye un reto significativo en la gestión de recursos naturales debido a los múltiples impactos que genera en la biodiversidad, la salud pública y los ecosistemas. Esta investigación de revisión documental cualitativa/cuantitativa evaluó la viabilidad de herramientas bioindicadoras mediante el análisis crítico de normativas específicas y metodologías reportadas en la literatura, proporcionando una perspectiva integral sobre la aplicabilidad de *Vibrio fischeri* en la evaluación de riesgos asociados a la contaminación. Para desarrollar este artículo, se revisaron un total de 38 artículos científicos, de los cuales se seleccionaron para la sección de resultados únicamente aquellos que presentaban estudios basados en trabajo de campo y laboratorio, asegurando así un enfoque aplicado y basado en evidencia empírica. A continuación, se presentan los principales resultados organizados en temas clave:

3.1. Eficiencia de *vibrio fischeri* como herramienta bioindicadora

Diversos estudios reportan que la bacteria *Vibrio fischeri* se ha consolidado como un bioindicador eficiente en la evaluación de la toxicidad aguda en diferentes matrices ambientales debido a su sensibilidad y rapidez para detectar la presencia de contaminantes. La propiedad bioluminiscente de esta bacteria, que se ve afectada en presencia de sustancias tóxicas, la convierte en una herramienta indispensable en estudios que requieren precisión y resultados inmediatos. En sistemas industriales, estudios reportan que el uso de *Vibrio fischeri* ha sido fundamental para evaluar el impacto de aguas residuales antes y después del tratamiento biológico. Por ejemplo, en estudios que emplearon reactores secuenciales por lotes (SBR), los estudios revisados reportan una disminución significativa en los valores de EC50 de los efluentes, indicando una reducción eficaz de la toxicidad tras el tratamiento. Asimismo, se reportaron correlaciones altas entre los niveles de nitrógeno amoniacal y los grados de toxicidad, lo que posiciona a este parámetro como un indicador clave en el monitoreo (Rodríguez et al., 2016).

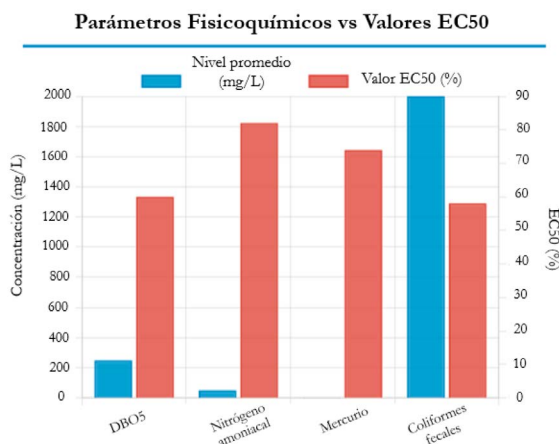
En contextos urbanos, la literatura señala que *Vibrio fischeri* ha evidenciado fallas en plantas de tratamiento municipales. En casos reportados donde los efluentes presentaron altos niveles de DBO5 y tensioactivos, la bacteria permitió identificar una disminución insuficiente en la toxicidad, reforzando la necesidad de optimizar los procesos (Vergel, 2023). Además, su capacidad para generar datos consistentes y fiables, siguiendo normativas como la NMX-AA-112-SCFI-2017, asegura que *Vibrio fischeri* sea una herramienta de alta confianza en la evaluación de toxicidad ambiental. Esta eficiencia ha sido probada tanto en estudios de agua residual como en análisis de sedimentos y suelos agrícolas, consolidando su relevancia en investigaciones de campo y laboratorio.

3.2. Relación entre parámetros fisicoquímicos y toxicidad observada en sistemas evaluados

La revisión documental permitió identificar varios parámetros reportados en la literatura analizada que están directamente relacionados con los niveles de toxicidad en sistemas acuáticos y suelos agrícolas contaminados. La interacción entre variables como la DBO5, DQO, nitrógeno amoniacal y metales pesados demuestra cómo estas características afectan los resultados de bioensayos realizados con *Vibrio fischeri*. La Figura 3, que se muestra a continuación, ilustra la respuesta de *Vibrio fischeri* ante diferentes parámetros fisicoquímicos, expresada como valores de EC50. El nitrógeno amoniacal exhibió la mayor sensibilidad (EC50: 82 %), seguido por mercurio (74 %), DBO5 (60 %) y coliformes fecales (58 %). Esta variabilidad en la respuesta confirma la capacidad del bioindicador para detectar múltiples tipos de contaminación, desde química hasta microbiológica, consolidando su utilidad en evaluaciones integrales de toxicidad ambiental.

Figura 4

Niveles promedio para cada parámetro y los valores de EC50 registrado.

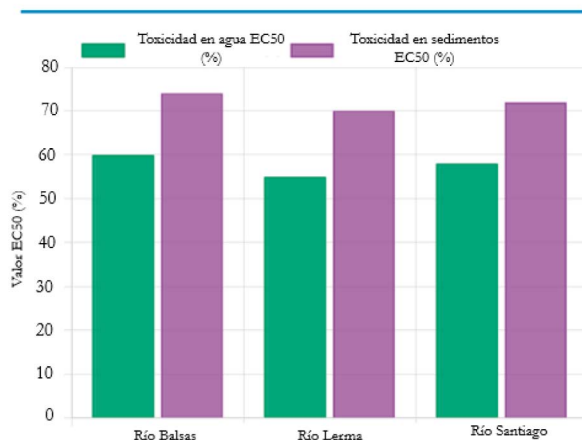


Fuente. Elaboración propia en base a la literatura consultada.

3.3. Comparación de toxicidad en cuerpos de agua contaminados

Los sistemas acuáticos evaluados presentan niveles significativos de toxicidad tanto en agua como en sedimentos, siendo esencial realizar comparaciones para identificar las diferencias entre los casos analizados. La evaluación comparativa de toxicidad mediante *Vibrio fischeri* en los sistemas fluviales Balsas, Lerma y Santiago (Figura 5) demuestra una distribución diferencial de la carga tóxica entre compartimentos. Los valores de EC50 en sedimentos superaron consistentemente a los registrados en agua superficial, con incrementos del 23 % (Balsas), 27 % (Lerma) y 24 % (Santiago). El río Lerma exhibió la mayor toxicidad tanto en agua (EC50: 55 %) como en sedimentos (EC50: 70 %), seguido por Santiago y Balsas. Esta gradación refleja la intensidad y cronicidad de los aportes contaminantes en cada cuenca, correlacionándose con el grado de industrialización y densidad poblacional de las respectivas áreas de influencia. Los hallazgos subrayan la importancia de incluir matrices sedimentarias en protocolos de monitoreo ambiental, dado su potencial para mantener y remover contaminantes hacia la columna de agua, perpetuando efectos eco-toxicológicos a largo plazo.

Figura 5
Niveles de toxicidad en agua y sedimentos de sistemas acuáticos evaluados



Fuente: Elaboración propia en base a Carreño, et al., 2018; Escobar, et al., 2019 y Rodríguez, et al., 2020.

Estos resultados demuestran que todos los sistemas evaluados presentan niveles significativos de toxicidad tanto en agua como en sedimentos, lo que refleja la necesidad de acciones integrales para reducir las fuentes de contaminación y mitigar sus efectos en los ecosistemas y la salud pública.

3.4. Dinámica de acumulación de contaminantes en sedimentos

Los sedimentos actúan como reservorios críticos de contaminantes acumulativos, afectando la calidad del agua y los ecosistemas circundantes:

- a) En el Río Lerma, se identificaron niveles extremos de toxicidad (CE50: 108-16 436 mg/L), reflejando la persistencia de contaminantes industriales como metales pesados y compuestos orgánicos (Carreño et al., 2018).
- b) En el río Balsas, se documentaron altos niveles de DBO5 y coliformes fecales en los sedimentos, lo que subraya su rol como fuente de contaminación microbiológica y orgánica (Escobar Sarabia et al., 2019).

3.5. Evaluación microbiológica y fisicoquímica de sistemas acuáticos

El análisis integrado de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos resultó fundamental para identificar los riesgos asociados con la contaminación:

- a) En sistemas de agua potable, se observaron biopelículas y trazas de aluminio en redes de distribución, atribuidas al uso de coagulantes en procesos de tratamiento (Silva et al., 2012).
- b) En sistemas fluviales como el río Balsas y el Lerma, parámetros críticos como DBO5, DQO y oxígeno disuelto reflejaron niveles severos de contaminación orgánica y baja capacidad de autorregeneración (Escobar Sarabia et al., 2019; Carreño et al., 2018).

3.6. Impacto ecológico y biotecnológico de los vibrios

Las bacterias vibrios, ampliamente estudiadas en ecosistemas costeros, destacan por su capacidad de interacción ecológica y su potencial como herramientas biotecnológicas:

- a) Los vibrios interactúan con bacterioplancton, fitoplancton y organismos superiores, contribuyendo al equilibrio ecológico y al funcionamiento de los ecosistemas marinos (Leyton y Riquelme, 2020).
- b) Se explora su posible uso en la remediación de sistemas acuáticos contaminados y en la acuicultura, posicionando a los vibrios como actores clave en estrategias de gestión ambiental.

3.7. Riesgos microbiológicos y parámetros fisicoquímicos combinados

La interacción entre parámetros microbiológicos y fisicoquímicos permite caracterizar la contaminación de manera integral:

- a) La correlación entre nitrógeno amoniacal, DBO5 y DQO con los niveles de toxicidad refleja cómo estos parámetros actúan como indicadores críticos en sistemas industriales y agrícolas (Rodríguez et al., 2020; Escobar et al., 2019).

- b) La presencia de coliformes fecales en sistemas de agua potable y fluviales evidencia riesgos microbiológicos considerables para la salud pública (Silva et al., 2012; Escobar et al., 2019).

3.8. Evaluación de suelos agrícolas contaminados con herbicidas

Los estudios en suelos agrícolas afectados por herbicidas como paraquat y glifosato reflejaron una alta toxicidad, tanto en el suelo como en las aguas lixiviadas y de escorrentía. Esto afecta directamente la actividad biológica de microorganismos esenciales para la salud del suelo, incluida la bacteria *Vibrio fischeri*. Los valores de toxicidad registrados en las muestras analizadas subrayaron la necesidad urgente de regular el uso de estos agroquímicos y buscar alternativas sostenibles para la descontaminación de los suelos agrícolas.

4. Discusión

Los hallazgos de esta revisión confirman la eficiencia de *Vibrio fischeri* como herramienta diagnóstica para evaluar la toxicidad ambiental, tanto en sistemas acuáticos como en suelos agrícolas. Su respuesta rápida, sensible y reproducible, basada en la inhibición de su bioluminiscencia, la convierte en un bioensayo confiable, como han destacado Rodríguez et al. (2016) y validado normativamente a través de estándares como la NMX-AA-112-SCFI-2017. La consistencia de sus respuestas frente a contaminantes como el nitrógeno amoniacal, la DBO5 y los metales pesados permite su uso comparativo en distintos ecosistemas, a pesar de sus diferencias físico-químicas y biológicas.

La tabla comparativa de los ríos Balsas, Lerma y Santiago evidencia niveles de toxicidad EC50 relativamente cercanos, lo cual señala una problemática compartida: la carga crónica de contaminantes de origen urbano, agrícola e industrial. Esta observación concuerda con los planteamientos de Koyman (1987) y Van Leewen (1990), quienes sostienen que las diferencias entre ecosistemas hacen indispensable una evaluación contextualizada, dado que la misma concentración de un contaminante

puede producir respuestas biológicas divergentes según las condiciones locales. Además, el análisis de los sedimentos como reservorios contaminantes refuerza lo planteado por Ramamoorthy y Baddaloo (1995), quienes subrayaron que estos componentes no deben ser considerados meros pasivos ambientales, sino elementos activos en la dinámica de toxicidad. El caso del río Lerma (Carreño et al., 2018), con valores de CE50 extremadamente altos (hasta 16,436 mg/L), es un ejemplo de cómo la contaminación histórica acumulada puede representar una amenaza incluso cuando los valores actuales del agua parecen aceptables. En cuanto a los riesgos microbiológicos, los estudios de Silva et al. (2012) sobre la calidad del agua potable revelan una problemática sistémica que va más allá de los parámetros fisicoquímicos tradicionales. La presencia de coliformes, así como de residuos de coagulantes como el aluminio, no solo representa un peligro para la salud humana, sino que también puede alterar la microbiota natural del agua, lo cual afecta los procesos biológicos del ecosistema, incluyendo la actividad de bacterias como *Vibrio fischeri*. La integración de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en la evaluación ambiental ha sido destacada por autores como Escobar Sarabia et al. (2019) y Rodríguez et al. (2020), quienes reconocen que la toxicidad no puede evaluarse de manera aislada.

Esta perspectiva es coherente con enfoques más recientes de toxicología ambiental, donde la interacción sinérgica entre contaminantes puede aumentar significativamente los efectos tóxicos, incluso cuando las concentraciones individuales no superan los límites permisibles. Asimismo, el uso de *Vibrio fischeri* no debe entenderse únicamente como un método de monitoreo, sino como una oportunidad para el desarrollo de tecnologías de remediación ambiental. Leyton y Riquelme (2020) han documentado cómo los vibrios, además de su papel como bioindicadores, pueden participar en procesos de biorremediación, debido a su capacidad metabólica para degradar compuestos orgánicos y su interacción con comunidades microbianas complejas. Esta potencialidad posiciona a *Vibrio fischeri* como una herramienta biotecnológica versátil, alineada con los principios de sostenibilidad y restauración ecológica.

Respecto a la toxicidad en suelos agrícolas, los hallazgos de este estudio advierten que el uso extensivo de herbicidas como paraquat y

glifosato representa un problema ambiental urgente. Estos compuestos no solo afectan la fertilidad y estructura del suelo, sino que también alteran la microbiota, esencial para el funcionamiento ecológico del mismo. La alta sensibilidad de *Vibrio fischeri* ante estos agroquímicos es una señal de alerta que coincide con los planteamientos de Planes y Fuchs (2015) sobre la necesidad de regular el uso de plaguicidas persistentes y promover prácticas agrícolas sostenibles.

En términos metodológicos, las limitaciones encontradas en la literatura revisada (sesgos en la selección de estudios, variabilidad experimental y acceso limitado a ciertos datos) confirman lo señalado por Henry (2006) sobre la importancia de estandarizar las condiciones de los bioensayos para garantizar la comparabilidad entre estudios. Esta necesidad se vuelve aún más crítica cuando se pretende utilizar los resultados para fundamentar políticas públicas o decisiones regulatorias. Finalmente, los casos históricos como la enfermedad de Minamata (Yorifuji et al., 2013) y la contaminación por DDT (Planes y Fuchs, 2015) refuerzan la importancia de la vigilancia ambiental temprana mediante métodos como los bioensayos con *Vibrio fischeri*. Estos eventos muestran cómo la exposición prolongada a contaminantes, incluso a niveles inicialmente considerados “seguros”, puede desencadenar efectos graves sobre la salud humana y los ecosistemas, si no se detectan a tiempo.

5. Conclusiones

El uso de *Vibrio fischeri* como herramienta bioindicadora en la evaluación de riesgo toxicológico ambiental destaca por su aplicabilidad en sistemas acuáticos altamente contaminados, como el Río Santiago, uno de los más afectados en México. Su sensibilidad y rapidez frente a diversas sustancias tóxicas permiten una detección oportuna de contaminantes en distintas matrices, incluyendo agua, sedimentos y suelos agrícolas. Además de su capacidad para detectar toxicidad aguda, los estudios analizados permitieron contrastar su desempeño con otros bioensayos, resaltando la utilidad de *Vibrio fischeri* dentro del marco normativo, como el que establece la NMX-AA-112-SCFI-2017. Esta estandarización facilita su incorporación en procesos de monitoreo ambiental en sectores industriales y agrícolas.

Al comparar diversos cuerpos de agua, como los ríos Balsas, Lerma y Santiago, se identificaron diferencias en los niveles de toxicidad, especialmente en los sedimentos, lo que evidencia la acumulación prolongada de contaminantes en estos compartimentos. Esta información resulta crucial para establecer prioridades de intervención y diseñar estrategias de remediación más efectivas. Sin embargo, también se detectaron vacíos en la investigación, particularmente la escasa integración de estudios que analicen simultáneamente agua, sedimentos y suelos. Este desafío representa una oportunidad para impulsar investigaciones más integrales, que incorporen herramientas rápidas como *Vibrio fischeri* junto con enfoques interdisciplinarios.

En conjunto, los hallazgos aquí expuestos aportan una base sólida para fortalecer la gestión ambiental, promoviendo el desarrollo de metodologías accesibles y técnicamente confiables que contribuyan a la conservación de los recursos naturales y a la protección de la salud pública. Los hallazgos de esta revisión documental confirman la viabilidad técnica y científica del uso de *Vibrio fischeri* como bioindicador en cuerpos de agua, basándose en la síntesis crítica de evidencia empírica disponible. La metodología de revisión cualitativa/cuantitativa permitió identificar patrones consistentes en la literatura analizada, proporcionando fundamentos sólidos para futuras implementaciones experimentales de esta herramienta biotecnológica.

6. Referencias

- Albert, L. A. (1985). *Curso basico de toxicología ambiental*. INIREB. <https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/55908/9275370060.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Arango, S. (2012). Biomarcadores para la evaluación de riesgo en la salud humana. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 30(1), 75-82. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120386X2012000100009
- Arrojo Agudo , P. (2010). *Crisis global del agua: valores y derechos en juego*. Barcelona: Cuadernos por Cristianisme I Justicia. https://www.fnca.eu/guia-nueva-cultura-del-agua/images/documents/Patrimonio/Crisis_global_del_agua.pdf

- Carreño, C., Zarazúa, G., Fall, C., Ávila-Pérez, P., & Tejeda, S. (2018). Evaluación de la toxicidad de los sedimentos del curso alto del río Lerma, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(1). <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.01.10>
- Chapman, P. M., McDonald, B., Kickham, P. E., & McKinnon, S. (2006). Global geographic differences. *Marine Pollution Bulletin*, 1081-1084. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.05.004>
- CONAGUA (2024, octubre 22). *Servicios de agua, fundamentales en el combate a la pobreza*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/servicios-de-agua-fundamentales-en-el-combate-a-la-pobreza>
- Davis, S. (2023). *La crisis global del agua de care para el Mejoramiento al Acceso de Agua Potable en Comunidades Pobres*. Atlanta: CARE USA. https://www.care.org/careswork/whatwedo/health/downloads/water_strategy_spanish.pdf
- Díaz Barriga, M. C. (2004). Problemática actual de la contaminación de las aguas continentales. *CODHEM*, 130-148. <http://ru.juridicas.unam.mx/xmlui/handle/123456789/34489>
- Editorial. (2024, octubre 22). *Intereses poderosos detrás de la privatización del agua en Iberoamérica*. Solidaridad iberoamericana. <https://msiainforma.org/es/intereses-poderosos-detras-de-la-privatizacion-del-agua-en-iberoamerica/>
- Escobar Sarabia, L., Álvarez Díaz, M. G., Pérez de Jesús, D., & Zavala Hernández, F. (2007). Impacto microbiológico y toxicológico del cauce del río Balsas, región tierra caliente de Guerrero. *Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 68-81. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v7i1.162>
- García Brennen, A. J. (2014). *Evaluación del estado actual de la ecotoxicidad agua de las aguas de la parte ala de la cuenca del río Cuilco ubicado en San Miguel Ixtlaquacán, San Marcos*. Universidad de San Carlos de Guatemala. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/2129>

- Grinberg, S., Porzionato, N., Bussi, E., Mantiñan, L., Gutiérrez, R., & Curutchet, G. (2018). *Agua y sedimentos: testigos clave de una contaminación anunciada*. Universidad Nacional de San Martín Fundación Innovación y Tecnología (FUNINTEC). <https://ri.unsam.edu.ar/handle/123456789/908>
- Henry, M. (2006). *A history of aquatic toxicology*. <http://biology.usgs.gov/s+t/NT/noframe/co116.htm>.
- ISO (2018). ISO 11348-3:2007/Enmienda 1:2018. Ginebra, Suiza: Organización Internacional de Normalización (ISO).
- Koyman, S. L. (1987). A safety factor for IC50 values allowing for differences among species. *Water Research* 21, 269-276. doi:10.1016/0043-1354(87)90205-3
- Macek, K. (1980). Aquatic toxicology: fact or fiction? *Environmental Health Perspectives*, 159-163. <https://doi.org/10.1289/ehp.8034159>
- Moriarty, F. (1988). *Ecotoxicology. The study of pollutants in ecosystems*. (2.a ed.). Academic Press. <https://archive.org/details/ecotoxicologys-tu0000mori>
- Música Álvarez, V., & Figueroa Lara, J. (1996). *Contaminación ambiental, causas y control*. Universidad Autónoma Metropolitana. <https://biblitecahub.uady.mx/bib/244648>
- Newman, M. (2001). *Fundamentals of Ecotoxicology*. Boca Raton: Lewis/CRC Publishers. https://www.academia.edu/36872120/Newman_Michael_C_Fundamentals_of_Ecotoxicology_The_Science_of_Pollution_2014_CRC_Press_
- OECD. (2019). *Estrategia de Competencias de la OCDE 2019: Competencias para construir un futuro mejor*. OECD Publishing Fundación Santillana. <https://doi.org/10.1787/e3527cfb-es>.
- Planes, E., & Fuchs, J. (2015). Cuáles son los aportes de la ecotoxicología a las regulaciones ambientales. *Ciencia e investigación*, 45-62. <http://hdl.handle.net/11336/48860>
- Prensa Animal. (22 de octubre de 2024). *Deforestación y contaminación: causas de crisis del agua*. Prensa animal. de: <https://prensaanimal.com/deforestacion-y-contaminacion-causas-de-crisis-del-agua/>

- Ramamoorthy, S., & Baddaloo, E. G. (1995). *Handbook of chemical toxicity profiles of biological species*. Vol. I.:Aquatic species. CRC Press, Inc. <https://www.cerc.usgs.gov/pubs/center/pdfdocs/90301.pdf>
- Ramirez Romero, P., & Mendoza Cantu, A. (2008). *Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo. La experiencia en México*. SEMARNAT. http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/ensayo_toxicologico.pdf
- Rand, G. M. (1995). *Fundamentals of aquatic toxicology. Effects, Environmental Fate and Risk Assessment*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9781003075363>
- Reinaldo Lansac, E. (2011). *Aplicación de la bacteria Vibrio Fischeri en la medida de la toxicidad en agua* (Tesis de licenciatura). Universidad de Zaragoza. <https://zaguan.unizar.es/record/6412/files/TAZ-PFC-2011- 572.pdf>
- Rodriguez-Loaiza, D. C., Ramirez-Henao, O., & Penuela-Mesa, G. A. (2016). Evaluación de la toxicidad en aguas residuales industriales tratadas por procesos biológicos utilizando bacterias luminiscentes. *Actualidades Biológicas*, 211-216. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.v37n105a08>.
- Sanz, P., & Repetto, M. (1993). *Glosario de términos toxicológicos*. <http://busca-tox.com/05pub/glosario%20terminos%20toxicologicos%20toxicologia%20repetto.pdf>
- Sibila Lores, M. A. (2008). *Evaluación de la biodegradabilidad y Ecotoxicidad de Tensioactivos en el Medio Acuático Marino* (Tesis de licenciatura). Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales. <http://hdl.handle.net/10498/15738>
- Silva, E., Villarreal, M. E., Cárdenas, O., Cristancho, C. A., Murillo, C., Salgado, M. A., & Nava, G. (2015). Inspección preliminar de algunas características de toxicidad en el agua potable domiciliaria, Bogotá y Soacha, 2012. *Biomédica*, 35(1),152-166. <https://www.redalyc.org/pdf/843/84340725016.pdf>
- Solis González, G. (2022). *Evaluación tóxica del oxiclورو de cobre sobre los bioindicadores Artemia franciscana, Scenedesmus intermedius y Vibrio fischeri, su comparativa con sulfatos de cobre y el estudio en mezclas binarias con glifosato* (Tesis de maestría). Universidad

- Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMI_CH/6754/FQ-FB-M-2022-0512.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Van Leewen , K. (1990). *Ecotoxicological effects assessment in the Netherland: recent development. Environmental managament*. https://www.researchgate.net/profile/K-Van-Leeuwen-Van-Leeuwen/publication/226819824_Ecotoxicological_Effects/links/55e419ae08ae6abe6e8e8d6d/Ecotoxicological-Effects.pdf?origin=publication_detail&_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY-2F0aW9uIiwicGF
- Vergel Chingaté, P. A. (2023). *Evaluación de la toxicidad de los vertimientos de agua residual de la sede principal y del campus de la universidad santo tomás en bogotá mediante la técnica de bioensayo Vibrio fischer (Tesis de licenciatura)*. Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/items/8c19d275-74d1-4058-b87c-68f439d6261b>
- Yorifuji, T., Tsuda, T., & Harada, M. (2013). Minamata disease: a challenge for democracy and justice. *Late lessons from early warnings: science, precaution, innovation*. (pp. 92-130). European Environmental Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/late-lessons-2/late-lessons-chapters/late-lessons-ii-chapter-5>

