



ESTRATEGIAS PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN POR NUTRIENTES EN AGUAS SUPERFICIALES Y SEDIMENTOS¹

Erika Michell CAZARÍN-LUNA

Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Boca del Río (México)
d23990014@bdelrio.tecnm.mx

Itzel GALAVIZ-VILLA

Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Boca del Río (México)
itzelgalaviz@bdelrio.tecnm.mx

Arturo GARCÍA-SALDAÑA

Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Boca del Río (México)
asaldana@bdelrio.tecnm.mx

Irving David PÉREZ LANDA

Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Boca del Río (México)
irvingperez@bdelrio.tecnm.mx

Isabel Araceli AMARO ESPEJO

Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Boca del Río (México)
isabelamaro@bdelrio.tecnm.mx

Virginia ALCÁNTARA-MÉNDEZ

Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Boca del Río (México)
virginiaalcantara@bdelrio.tecnm.mx

Recibido: 26 de enero del 2024

Enviado a evaluar: 30 de enero del 2024

Aceptado: 26 de junio del 2024

RESUMEN

El objetivo de esta revisión fue identificar las principales aportaciones científicas relacionadas con las estrategias empleadas para reducir el efecto de las fuentes puntuales de contaminación en aguas superficiales y sedimentos. Para esto se realizó una revisión sistemática en la base de datos Dimensions, se limitó a artículos científicos y se utilizaron las palabras clave: contaminación de agua;

¹ La investigación se desarrolló en el proyecto 17320.23-P, dentro de la Convocatoria Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación 2023, del TecNM.

sedimentos; estrategias; fósforo; nitrógeno. Se identificaron 388 documentos. Esta metodología se realizó mediante la herramienta PRISMA. Se procedió a realizar un análisis del título y resumen de cada artículo y fueron seleccionados los relacionados con esta revisión. Finalmente, se analizó la aportación al conocimiento de cada publicación y se seleccionaron los de mayor relevancia. Con base en la literatura y el mapa de coocurrencia, los elementos relacionados con estrategias para reducir la contaminación son: calidad del agua, contaminación, agua superficial, eutrofización, humedales.

Palabras clave: Contaminación del agua, sedimentos, estrategias, fósforo, nitrógeno.

STRATEGIES TO REDUCE NUTRIENT POLLUTION IN SURFACE WATERS AND SEDIMENTS

ABSTRACT

The objective of this review was to identify the main scientific contributions related to the strategies used to reduce the effect of point sources of pollution in surface waters and sediments. For this, a systematic review was carried out in the Dimensions database, it was limited to scientific articles and the key words were used: water contamination; sediments; strategies; match; nitrogen. 388 documents were identified. This methodology was carried out using the PRISMA tool. An analysis of the title and abstract of each article was carried out and those related to this review were selected. Finally, the contribution to knowledge of each publication was analyzed and the most relevant ones were selected. Based on the literature and the co-occurrence map, the elements related to strategies to reduce pollution are: water quality, pollution, surface water, eutrophication, wetlands.

Keywords: Water contamination, sediments, strategies, match, nitrogen.

STRATÉGIES POUR RÉDUIRE LA POLLUTION PAR NUTRIMENTS DANS LES EAUX DE SURFACE ET LES SÉDIMENTS

RÉSUMÉ

L'objectif de cette revue était d'identifier les principales contributions scientifiques liées aux stratégies utilisées pour réduire l'effet des sources ponctuelles de pollution dans les eaux de surface et les sédiments. Pour cela, une revue systématique a été réalisée dans la base de données Dimensions, elle s'est limitée aux articles scientifiques et les mots clés ont été utilisés : contamination de l'eau ; sédiments; stratégies; correspondre; azote. 388 documents ont été identifiés. Cette méthodologie a été réalisée à l'aide de l'outil PRISMA. Une analyse du titre et du résumé de chaque article a été réalisée et ceux liés à cette revue ont été sélectionnés. Enfin, l'apport à la connaissance de chaque publication a été analysé et les plus pertinentes ont été sélectionnées. Sur la base de la littérature et de la carte de coocurrence, les éléments liés aux stratégies de réduction de la pollution sont : la qualité de l'eau, la pollution, les eaux de surface, l'eutrophisation, les zones humides.

Mots-clés: Contamination de l'eau, sédiments, stratégies, correspondre, azote.

1. INTRODUCCIÓN

El uso excesivo de los recursos naturales, modificaciones físicas en hábitats, contaminación de aguas superficiales, el cambio climático, crecimiento de la población, incremento de actividades agrícolas e industriales son las principales causas de pérdida de biodiversidad marina en el mundo (Vivas et al., 2013; Alvarado et al., 2011; Álvarez et al., 2008).

La contaminación antropogénica de aguas superficiales está relacionada con las descargas de efluentes domésticos, industriales y agropecuarios, lo que influye en la calidad del agua y la salud humana (Ortiz et al., 2018; Álvarez et al., 2008; Pineda et al., 2013). Cuando el ecosistema se contamina aparecen microorganismos como parásitos, bacterias y virus, así como elementos químicos inorgánicos como fósforo, nitritos y nitratos en concentraciones elevadas. La presencia de estos compuestos inorgánicos produce eutrofización, lo que genera aparición de algas (Pavan et al., 2022; Moreno 2018).

La contaminación de un cuerpo de agua altera los factores bióticos (organismos) y abióticos (agua y sedimentos) del ecosistema, dejando como consecuencia un impacto en su funcionalidad y en el ciclo de vida de los productores y consumidores que integran la cadena trófica (Camacho y Gallo, 2019).

La gestión ambiental es una herramienta fundamental para la protección y conservación del medio ambiente. Esta involucra procesos enfocados en resolver la problemática de contaminación a través de la implementación de estrategias y sistemas de gestión, y del cumplimiento de auditorías ecológicas. Esta herramienta incluye un conjunto de factores multidisciplinarios por lo cual es importante la integración de diferentes áreas de conocimiento, tales como; hidrología, química, economía, sociología, entre otras (Herrera et al., 2014).

La presente investigación tiene como objetivo identificar los aportes al conocimiento relacionados con las estrategias implementadas para reducir el efecto de la contaminación por nutrientes (nitrógeno y fósforo) en aguas superficiales y sedimentos, principalmente en zonas rodeadas por bosque manglar, reservas naturales y áreas protegidas.

Disponer de conocimiento científico actualizado permite desarrollar planes de conservación en áreas naturales, uso sostenible de recursos hídricos y reducir la contaminación hídrica. Esta información permitirá coadyuvar en el diseño de estrategias enfocadas a controlar o reducir los impactos de la contaminación en la biodiversidad y los mantener los servicios ecosistémicos de los recursos naturales (Alvarado et al., 2011).

1.1. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL EN ZONAS COSTERAS

La explotación incontrolada de recursos naturales, la modificación de hábitats naturales, la contaminación y el cambio climático son las principales causas de pérdida de biodiversidad en el mundo (Alvarado et al., 2011). En la actualidad, existen instrumentos legales para llevar a cabo el cuidado de estas áreas naturales como áreas de conservación.

Los manglares son bosques tropicales que se encuentran entre la plataforma continental y el mar, este ecosistema se caracteriza por su alta

productividad ya que aporta altas concentraciones de materia orgánica, además de alta sensibilidad a los cambios de calidad del agua (Silva et al., 2002; López et al., 2019).

En la actualidad, a nivel global, los manglares se encuentran bajo una fuerte presión antrópica. México es uno de los cuatro países, a nivel mundial, con mayor extensión de bosque de manglar (García, 2018), algunas especies se encuentran protegidas bajo la legislación mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2010, 2010), lo que ha permitido la protección y conservación más estricta; además de lograr la clasificación de zonas denominadas humedales de importancia internacional o sitios Ramsar (García, 2018).

Los manglares ribereños tienen una mayor concentración de agua dulce que salada, esto reduce el estrés salino y permite una mayor productividad y diversidad. Están asociados a canales de agua dulce, esto los convierte en un sumidero de sedimentos, nutrientes y materia orgánica (López et al., 2023); que les permite albergar organismos de agua dulce y salada (Ortiz et al., 2018).

1.2. SERVICIOS AMBIENTALES DE LOS HUMEDALES O BOSQUES DE MANGLAR

Los humedales o bosques de manglar cercanos a la costa proveen de beneficios o servicios ambientales, tales como: control de inundaciones y estabilización costera; descarga y recarga de acuíferos; regulación climática; suministro de alimento y espacios de recreación (González et al., 2017; García, 2018; Speake et al., 2020). Por otro lado, los humedales naturales y construidos tienen la capacidad de remover nutrientes y contaminantes del agua, por lo que son considerados para el tratamiento de aguas residuales (Zaldívar et al., 2012).

Los humedales o manglares son considerados ecosistemas productivos, la biomasa generada en estos ecosistemas es utilizada para conservar la flora y fauna (Pérez y Rodríguez, 2008). Los humedales, son valorados como ecosistemas naturales que se caracterizan por conservar la calidad del agua en ecosistemas acuáticos (Zaldívar et al., 2012). Como los manglares tienen la capacidad de remover nutrientes estos funcionan como sumidero de nitrógeno (Zaldívar et al., 2012). Por otro lado, los bosques de manglar generan barreras que ayudan a disminuir el golpe del oleaje durante tormentas y huracanes (Silva et al., 2022; Ortiz et al., 2018); y generan servicios económicos, por ejemplo; pesca, pastoreo, recreación y turismo (Pérez y Rodríguez, 2008).

1.3. EFECTO DE LAS ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS EN ZONAS COSTERAS

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el 2020 el 44% de las aguas residuales domésticas generadas en el mundo se vertieron sin un tratamiento previo adecuado, aún cuando requieren de éste y de permisos ambientales antes de incorporarse a los cuerpos de agua (Camacho y Gallo, 2019). Las aguas residuales presentan altas concentraciones de materia orgánica, sólidos suspendidos, nutrientes, patógenos, metales pesados, entre otros. De acuerdo con cifras oficiales, en México, se trata solo el 20% de las aguas residuales urbanas e industriales, esto indica que existe un alto vertimiento de aguas residuales sin

tratamiento previo que genera contaminación y la reducción de la disponibilidad de agua de buena calidad (Ibarrarán et al., 2017).

En la zona costera, los contaminantes son arrastrados por la escorrentía y los flujos superficiales durante la temporada de lluvias, esto ha generado una fuerte contaminación en ríos y lagunas. Los principales contaminantes que se encuentran son los plaguicidas, herbicidas, pesticidas, aguas residuales industriales y domésticas (Moreno, 2008).

En México, los estados cercanos a la costa del Golfo de México han crecido significativamente, tal como sucedió en el corredor turístico de Veracruz- Boca del Río (Botello et al., 2020). Se espera que para el 2025 el 40% de la población viva a menos de 100 km de la costa, esto conlleva a una mayor generación de residuos sólidos urbanos (RSU) y aumento de las descargas de AR (Botello et al., 2020).

1.4. IMPORTANCIA DEL NITRÓGENO Y FÓSFORO EN LA QUÍMICA DEL AGUA

El fósforo es un elemento indispensable del ciclo biológico en sistemas acuáticos, funciona como limitante en el crecimiento de algas y plantas acuáticas en humedales de agua dulce, por lo cual, la variación de la concentración de este parámetro es una referencia para determinar problemas de eutrofización en lagos, lagunas o ríos (Pérez y Rodríguez, 2008; Alfaro, 2023). El fósforo se integra al cauce de agua mediante procesos de agricultura, descargas de aguas residuales domésticas e industriales y liberación y degradación de materia orgánica (Lozano et al., 2018). Por otro lado, el nitrógeno se integra al cauce del agua mediante efluentes, arrastre por escorrentía, y descomposición de materia orgánica (Lozano, et al., 2018)

Las descargas de aguas residuales domésticas, municipales e industriales, que no son tratadas adecuadamente, así como la incorporación de sedimentos a través de escorrentías provenientes de zonas agrícolas generan una alta concentración de nutrientes como el nitrógeno y fósforo (Madera et al., 2016; Ortez et al., 2022); que ocasionan la eutrofización del ecosistema y generan cambios en su funcionamiento natural; como el aumento de cianobacterias, biomasa y disminución de la biodiversidad (Ortez et al., 2022; Guerra et al., 2023).

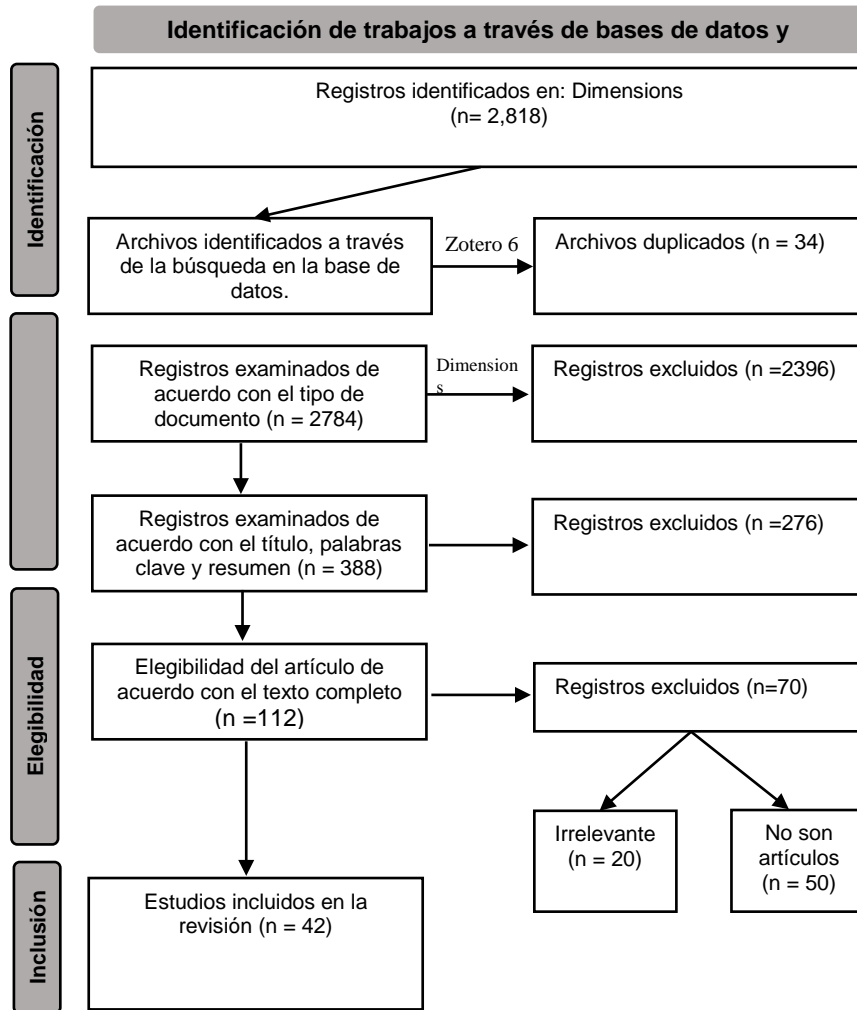
2. METODOLOGÍA

Se realizó una búsqueda sistemática de artículos publicados entre 1994 a 2023 en revistas científicas recopilados desde la base de datos Dimensions, bajo el criterio de estrategias para reducir el efecto de fuentes puntuales de contaminación.

Se formuló una pregunta de investigación ¿Qué estrategias permiten reducir el efecto de las fuentes puntuales de contaminación en aguas superficiales y sedimentos? Las palabras clave utilizadas fueron: *contaminación agua, sedimentos, estrategias, fósforo y nitrógeno*. Se definieron los siguientes criterios de selección: Artículos científicos publicados entre 1994 y 2023, análisis de título, palabras clave y resumen.

Se utilizó la herramienta PRISMA por sus siglas Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses, para evaluar la metodología de la revisión de literatura. Dicha búsqueda arrojó 2,817 resultados, de los cuales 388 fueron artículos científicos. Se procedió a realizar un análisis del título y resumen de cada documento y fueron seleccionados los relacionados con esta investigación. Finalmente, se procedió a analizar el contenido de cada publicación y fueron seleccionados los de mayor relevancia (Figura 1). Se utilizó el gestor de referencias bibliográficas Zotero 6, y se llevó a cabo un análisis bibliométrico, el cual arrojó la producción científica por año, y los principales países con mayor número de artículos publicados.

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA de cribado y selección de estudios.



Fuente: Modificado de Tawfik et al. (2019).

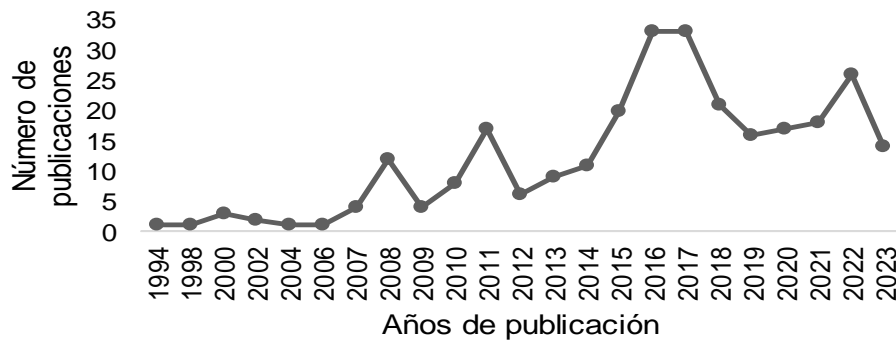
Con la base de datos y las palabras clave de cada artículo se realizó un mapa de coocurrencia con el software VOSviewer versión 1.6.20.

3. RESULTADOS

3.1. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

Se observó un aumento en la producción científica entre 2016 y 2017 en temas relacionados con las estrategias para reducir la contaminación por nutrientes en agua y sedimentos durante el periodo de 1994 a 2023 (Figura 2). Esto puede estar relacionado con la creación de los Objetivos de Desarrollo sostenible (ODS) por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en el año 2015.

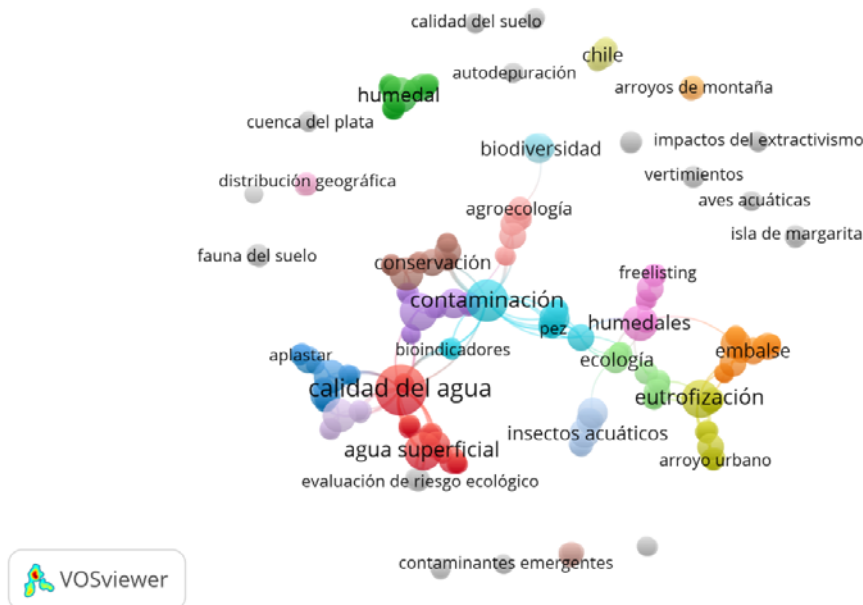
Figura 2. Número de publicaciones científicas por año sobre temas relacionados con las estrategias para reducir la contaminación por nutrientes en aguas superficiales y sedimentos, en el periodo comprendido entre 1994 y 2023.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la base de datos Dimensions, fue posible observar que tres países destacan con el mayor número de productos científicos relacionados principalmente con la calidad de las aguas superficiales, los cuales son: Colombia, México y España, cada uno con 58.4%, 11.6% y 7.14%, respectivamente; de artículos publicados entre 1994 y 2023.

Figura 3. Red de coocurrencias de palabras clave en relación con la contaminación.



Fuente: Elaboración propia.

En la red de coocurrencia de palabras clave se observa la palabra central con más menciones, la cual fue "contaminación", y alrededor de esta se vinculan términos secundarios como calidad del agua, agua superficial, agroecología, bioindicadores, entre otras (Figura 3).

3.2. PROBLEMÁTICAS AMBIENTALES IDENTIFICADAS

El impacto de la contaminación en los cuerpos de agua es evidente de manera global; en los últimos años los ríos han experimentado modificaciones como consecuencia de las actividades humanas, afectando la calidad del agua y estructura de los cauces (Meza et al., 2017). Los análisis de calidad de agua nos permiten generar una pauta para proponer soluciones para el desarrollo del manejo de los recursos hídricos (Álvarez et al., 2008), además de ser indicador de gestión ambiental y de contaminación (Musálem et al., 2017).

Como se mencionó anteriormente; Colombia, México y España destacan al generar mayor número de productos científicos relacionados, principalmente, con la evaluación de la calidad del agua superficial y de sedimentos. Esto puede ser debido a que Colombia cuenta con un potencial hídrico mayor al promedio de los países en Sudamérica, sin embargo; cuenta con problemas significativos de disponibilidad y calidad de agua, principalmente en zonas muy pobladas. De acuerdo con Gualdrón (2016), esto es consecuencia de los problemas de contaminación, deforestación y erosión que se viven en ese país. En México, donde la calidad y disponibilidad de los recursos hídricos son fundamentales para el desarrollo, están fuertemente contaminados debido al vertimiento de aguas residuales parcialmente tratadas y sin tratar. Se estima que solo el 20% de las aguas residuales urbanas e industriales recibe tratamiento, lo que provoca contaminación y reducción de la disponibilidad de agua limpia (Ibarrarán et al., 2017). En 2006, el 74% de las aguas superficiales de este país presentaron distintos niveles de contaminación por materia orgánica, nutrientes (fósforo y nitrógeno) y microorganismos (coliformes totales y coliformes fecales), además de metales pesados e hidrocarburos en zonas industriales (Ibarrarán et al., 2017). De acuerdo con la literatura, la actividad agrícola es una de las principales actividades antropogénicas que afectan los cuerpos de agua (Rojas et al., 2020), y en México se utiliza entre el 68 y 70% de este recurso para realizar esta actividad.

En los últimos años, la tendencia creciente del consumo de agua en España se ha visto contrarrestada por una disminución de los recursos hídricos disponibles debido al efecto de las actividades antropogénicas. Este hecho ha puesto de relieve la necesidad de establecer políticas de gestión adecuada que pueda garantizar la disponibilidad de los recursos hídricos y la continuidad del desarrollo (Gracia et al., 2008). Dentro de las principales causas de contaminación de recursos hídricos esta la infiltración y escorrentía de aguas con alta concentración de nitrato, como consecuencia del uso excesivo de fertilizantes nitrogenados y prácticas de riego poco optimizadas en las zonas agrícolas. El resultado del aumento de las concentraciones de nitratos afecta la salud humana en la gran mayoría de los países de la Unión Europea. Por ello se han establecido normas con el propósito de disminuir estas concentraciones y evitar la aparición de nuevos procesos contaminantes (Arauzo et al., 2006).

Actualmente en España, las sequías son un fenómeno común, esto ha traído como consecuencia que la zona sur y este del país presenten los niveles más graves de sobreexplotación en Europa; además de ser el octavo

país a nivel mundial con mayor huella hídrica, y el segundo de acuerdo al ranking europeo (Sotelo et al., 2012).

4. ESTRATEGIAS IMPLEMENTADAS

En México, la aplicación de humedales naturales y construidos para remover nutrientes y contaminantes de los cuerpos de agua, es considerada una alternativa para el tratamiento de aguas residuales y como mitigación de la degradación de ecosistemas de manglar (Zaldívar et al., 2012). De acuerdo con la literatura (Cuadro 1); las principales acciones para el desarrollo de estrategias enfocadas a la conservación y protección de un ecosistema acuático es realizar un diagnóstico sobre la calidad y disponibilidad del agua (Vammen, 2012).

Una de las ventajas en la aplicación de estrategias para la restauración de sistemas acuáticos como los ríos, es la capacidad de autodepuración. Esta se basa en distintas características como: la degradación orgánica por microorganismos, adsorción de contaminantes por medio de los sedimentos y la asimilación de nutrientes por medio de la vegetación (Cochero et al., 2020). Sin embargo, esta depuración se puede ver alterada por componentes naturales o antropogénicos como exceso de nutrientes, carbono orgánico y oxígeno disuelto (Cochero et al., 2020).

Distintos tipos de humedales, incluyendo los manglares, cuentan con características que les permiten ser eficientes en la remoción de nutrientes y contaminantes, tales como; filtración, precipitación química, absorción, adsorción, procesos biológicos, transformación y almacenamiento por vegetación y desnitrificación (Cochero et al., 2020; Zaldívar et al., 2012). En este caso, el uso de manglares como biofiltro se utiliza como estrategia para mitigar la degradación de ecosistemas a través de la restauración ecológica y manejo adecuado del ecosistema (Zaldívar et al., 2012). Como alternativa, se utilizan humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales, ya que estos no requieren energía eléctrica para su funcionamiento, ni tampoco una significativa inversión en equipamiento (Pech et al., 2013). De acuerdo con la literatura, los modelos hidrológicos están siendo utilizados como una herramienta para analizar la dinámica natural que ocurre en una cuenca, como el modelado Soil and Water Assessment Tool (SWAT), utilizada para analizar la dispersión de contaminantes en una cuenca hidrológica. Este software permite reproducir un modelado hidrológico en distintos territorios donde se llevan a cabo diferentes actividades productivas, ya que simula el impacto que generan actividades antropogénicas (Rojas et al., 2020; Rojas et al., 2021; Osorio et al., 2019; Pereira et al., 2022).

Por otro lado, la aplicación de la normativa se considera una opción implícita que debería garantizar la sustentabilidad de los ecosistemas, sin embargo; de acuerdo con Vidal et al. (2015), la aplicación de la normativa mexicana y otras herramientas de manejo para la protección de humedales costeros y aves de humedales es ineficiente; por lo cual es necesario incorporar una visión sistémica para proteger distintos ecosistemas. El uso de algunos sustratos o materiales filtrantes como la zeolita, se ha comprobado que son capaces de remover distintos tipos de contaminantes, pero no exclusivamente los metales pesados. Además, es un material con una buena relación costo-eficiencia, y por sus propiedades tiene la capacidad de remover nutrientes (amonio y fosfato) y aplicarse también al control de escorrentías agrícolas (Gallo y Vázquez, 2021).

Cuadro 1. Clasificación de estrategias de recuperación de agua superficial y sedimentos de acuerdo a la tipo de fuente contaminante.

Fuente	Contaminante	Estrategia	Aplicación/Referencia
Difusa	Metales en sedimentos	Implementación de vegetación ribereña para el control de las fuentes no puntuales y la mejora de la calidad del agua (De Cabo et al., 2019).	De acuerdo con McKergow et al. (2003) la vegetación riparia reduce 10 veces la exportación de sedimentos por erosión. Yeakley et al. (2003) menciona un aumento de cuatro veces en la concentración de nitratos en un área con remoción de vegetación riparia. De acuerdo con De Cabo et al. (2019), las especies <i>Sagittaria Montevidensis</i> y <i>Tradescantia fluminensis</i> pueden ser utilizadas para rehabilitar zonas de contaminación. Posteriormente se demostró que los árboles y arbustos plantados logran tolerar los niveles de contaminación como el periodo de inundación.
Difusa	Metales y nutrientes en agua	Las zeolitas se utilizan para eliminar nitrógeno amoniacal de aguas residuales; de las más eficientes se encuentran las zeolitas sódicas, las cálcicas y las ácidas (Gallo y Vázquez, 2021).	A partir de ensayos en tubos agitados, se determinó que la zeolita removía NT, Ni y Zn apreciablemente (40-60%), mientras que las eliminaciones fueron superiores al 90% para Cr, Fe y Pb (Gallo y Vázquez, 2021).
Puntual y difusa	Nutrientes en agua	Biorremediación	La cepa <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Spirulina máxima</i> (Sm) y <i>Spirulina platensis</i> (Sp) obtuvieron los siguientes porcentajes de remoción de nitritos: 88.24, 85.9 y 64% respectivamente, para nitratos los valores son; 87.2 para CV y las cepas de <i>Spirulina</i> no lograron llegar al 82%, para fosfatos las cepas CV y Sm superan el 90% y la cepa Sp. 84% (Ortiz et al., 2018).
Puntual	DBO, DQO, SST, coliformes totales, fecales, nutrientes en aguas.	Humedales artificiales	Los humedales artificiales son una alternativa para disminuir la contaminación por aguas residuales. Se puede obtener buenos rendimientos en la depuración de aguas residuales domésticas, siempre y cuando el diseño y la operación del se ajusten a las características del agua residual y a las condiciones climáticas (Peach y Ocaña, 2013). Solano (2004) construyó un prototipo experimental de humedal artificial de flujo subsuperficial con vegetación macrófita, la enea (<i>Typha sp.</i>) y caña (<i>Phragmites sp</i>) para tratar aguas residuales, se evaluó la eficiencia de remoción de parámetros como la DBO, DQO, SST, coliformes totales y fecales, y estreptococo.

Fuente: Elaboración propia.

El uso o implementación de la vegetación ribereña contribuye en el control de las fuentes de contaminación disminuyendo la misma y mejorando la calidad del agua en ríos y arroyos. Es una estrategia de bajo costo que contribuye a la disminución de las concentraciones de nutrientes en ecosistemas acuáticos contaminados, en comparación con otros tratamientos de aguas residuales (Ortiz et al., 2018). Los microorganismos que participan en la biorremediación son las microalgas, estas son capaces de remover nutrientes y sustancias tóxicas como pesticidas, herbicidas y metales pesados (Ortiz et al., 2018).

5. COMENTARIOS FINALES

Aplicar estrategias para reducir la contaminación del agua y los sedimentos permite coadyuvar en el logro del objetivo 6 de Desarrollo Sostenible, que establece mejorar la calidad del agua a nivel global para lograr el acceso universal y equitativo al agua limpia.

En los últimos 29 años, se ha incrementado la necesidad de conocimiento acerca de cómo preservar y mantener los cuerpos de agua superficial en el mundo con una adecuada calidad, debido a que actualmente enfrentamos una crisis que afecta al bienestar humano y ambiental.

De acuerdo con la plataforma Dimensions, Colombia, México y España, son los países con mayor número de productos científicos relacionados con la evaluación de la calidad del agua superficial y los sedimentos. Es importante seguir generando conocimiento para mitigar los problemas ambientales a los que nos enfrentamos en la actualidad.

De las principales estrategias implementadas destacan los humedales artificiales, los cuales pueden ser una solución eficiente para el tratamiento de aguas residuales, siempre y cuando este ajustado a las condiciones climáticas y se utilice material vegetal nativo (Peach y Ocaña, 2013). Es importante señalar, que las estrategias están principalmente enfocadas a fuentes de contaminación difusa.

6. REFERENCIAS

- Alfaro, J. D. B. (2023). Calidad del agua superficial y sus implicaciones con el agua potable en Las Brisas de Zarco. *InterSedes*, 24(49), 196-215.
- Alvarado, J. J., Herrera, B., Corrales, L., Asch, J., y Paaby, P. (2011). Identificación de las prioridades de conservación de la biodiversidad marina y costera en Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 59(2), 829-842.
- Álvarez, J., Panta, J. E., Ayala, C. R., y Acosta, E. H. (2008). Calidad integral del agua superficial en la cuenca hidrológica del Río Amajac. *Información tecnológica*, 19(6), 21-32.
- Arauzo, M., Valladolid, M., Martínez-Bastida, J. J., y Gutiérrez, C. (2006). Dinámica espacio-temporal del contenido en nitrato de las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del río Oja (La Rioja, España): Vulnerabilidad del acuífero aluvial. *Limnetica*, 25(1-2), 753-762.
- Botello AV, Villanueva SF, Leon D, de la Lanza G, Ponce G (2020) Microplastics and Bisphenol A (BPA) in Sediments of Coastal Lagoons of Veracruz, Mexico. *J Toxicol Cur Res* 4: 015.

- Camacho-Zorogastúa, K., y Gallo-Ramos, V. (2019). Parámetros de mayor riesgo ambiental provenientes de efluentes líquidos en el Subsector Hidrocarburos. *Revista Campus*, 24(28).
- Cochero, J., Di Giorgi, H., Donadelli, J., Suárez, J., Simonetti, R., Finkler, N. R., y Cunha, D. G. F. (2020). El rol de los bañados de desborde fluvial en la retención de nutrientes y su actividad metabólica. *Biología Acuática*, (35), 013-013.
- De Cabo, Laura Isabel; Faggi, Ana Maria; Miguel, Sebastián; Basílico, Gabriel Omar. (2019). Rehabilitación de las riberas de un sitio de la cuenca baja del río Matanza-Riachuelo; Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Naturales y Museo; *Biología Acuática*; 33; 11-2019; 1-13
- Gallo-González, Ana Karen; Vázquez-Rodríguez, Gabriela Alejandra. (2021). Use of zeolites to controlling nonpoint sources of water pollution: a review. *Ingeniería del agua*, 25(4), 241-255. <https://doi.org/10.4995/Ia.2021.15897>
- García, A., Sainz, A., Revilla, JA, Álvarez, C., Juanes, JA, y Puente, A. (2008). Evaluación de recursos hídricos superficiales en cuencas escasamente aforadas del norte de España. *Revista de Hidrología*, 356 (3-4), 312-326.
- García López, T. (2018). Hacia una metodología para el diseño de programas de pago por servicios ambientales en manglares en México.
- González-Marín, R. M., Moreno-Casasola, P., Castro-Luna, A. A., y Castillo, A. (2017). Regaining the traditional use of wildlife in wetlands on the coastal plain of Veracruz, Mexico: ensuring food security in the face of global climate change. *Regional Environmental Change*, 17, 1343-1354.
- Gualdrón Durán, L. E. (2016). Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros fisicoquímicos y biológicos.
- Guerra, M., Kannan, M. S., y Vilarrubia, T. V. (2023). Floración de *Planktothrix agardhii* en Yahuarcocha, una laguna altoandina hipereutrófica. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas: REMCB*, 44(1), 1-14.
- Herrera, N. E., Astocondor, M. M., Loarte, J. P., y Baylón, A. R. (2014). Estrategias regionales de gestión ambiental. el caso del proyecto minero las bambas de apurímac. *Gestión en el Tercer Milenio*, 9(18), 33-39.
- Ibarrarán, M. E., Mendoza, A., Pastrana, C., y Manzanilla, E. J. (2017). Determinantes socioeconómicos de la calidad del agua superficial en México. *Región y sociedad*, 29(69), 89-125.
- López Rosas, H., Espejel González, V. E., y Moreno-Casasola, P. (2023). Decreases in mangrove productivity and marsh die-off due to temporary increase in salinity, a case in Mexico. *Hydrobiologia*, 1-18.
- López-Jiménez, J. G., Rivera-Cruz, M. D. C., Trujillo-Narcía, A., Aceves-Navarro, L. A., Sol-Sánchez, Á., y Sarracino-Martínez, O. (2019). *Laguncularia racemosa* (Combretaceae) y bacterias terrestres asociadas medio siglo después de la contaminación crónica por hidrocarburos. *Revista de Biología Tropical*, 67(6), 1194-1209.
- Lozano, F., Dávalos, A., Delgado, M., y Masulli, J. F. F. (2018). Nitrógeno, fósforo y sedimentos en el Arroyo Itay-I. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 23(1), 67-82.
- Meza-Rodríguez, D., Martínez-Rivera, L. M., Mercado-Silva, N., Jalón-Lastra, D. G. D., Rio, T. D., Marchamalo-Sacristán, M., y Mora-Orozco, C. D. L. (2017). Propuesta de caudal ecológico en la cuenca del Río Ayuquila-Armería en el Occidente de México. *Latin american journal of aquatic research*, 45(5), 1017-1030.
- Madera, L. C., Angulo, L. C., Díaz, L. C., y Rojano, R. (2016). Evaluación de la calidad del agua en algunos puntos afluentes del río Cesar (Colombia)

- utilizando macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de contaminación. *Información tecnológica*, 27(4), 103-110.
- McKergow, L. A., Weaver, D. M., Prosser, I. P., Grayson, R. B. y Reed, A. E. G. (2003). Before and after riparian management: sediment and nutrient exports from a small agricultural catchment, Western Australia. *Journal of Hydrology*, 270: 253-272.
- Moreno, A. R. (2018). Evaluación del riesgo de eutrofización del embalse El Quimbo, Huila (Colombia). *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 10(2), 172-192.
- Moreno Casasola, P. (2008). Los humedales en México: tendencias y oportunidades.
- Musálem-Castillejos, K., Laino-Guanes, R., Bello-Mendoza, R., González-Espinosa, M., y Ramírez-Marcial, N. (2018). Calidad de agua del río Grijalva en la frontera de Chiapas y Tabasco. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 5(13), 55-64.
- Ortez, L., Rovira, M. D., y Moran, L. (2022). Distribución espaciotemporal de cianobacterias planctónicas y factores ambientales asociados a sus proliferaciones en el embalse Cerrón Grande, El Salvador. *Revista de Biología Tropical*, 70(1), 250-262.
- Ortiz Reyes, A., Robles López, K., Urrego Giraldo, L. E., y Romero Tabarez, M. (2018). Diversidad e interacciones biológicas en el ecosistema de manglar. *Revista de Ciencias*, 22(2), 111-127.
- Ortiz-Villota, M. T., Romero-Morales, M. A., y Meza-Rodríguez, L. D. (2018). La biorremediación con microalgas (*Spirulina máxima*, *Spirulina platensis* y *Chlorella vulgaris*) como alternativa para tratar la eutrofización de la laguna de Ubaque, Colombia. *Revista de investigación, desarrollo e innovación*, 9(1), 163-176.
- Osorio Múnera, J. D., Uribe Rivera, N., García-Tavera, L. M., y Bustamante Ochoa, E. A. (2019). Optimización de uso del suelo acorde con restricciones ambientales y sociales: caso cuenca de Riogrande II. *Semestre Económico*, 22(52), 19-48.
- Pech, O. M. S., y Ocaña, G. L. (2013). Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales. *Kuxulkab'*, 19(36).
- Pereira, A. F. O., Martínez, J. M. T., y Rivas, R. A. M. (2022). Una revisión del modelo WEAP 21 y SWAT para la planificación de los recursos hídricos. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, 12(2), 29-44.
- Pérez-Castillo, A. G., y Rodríguez, A. (2008). Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación. *Revista de Biología tropical*, 56(4), 1905-1918.
- Pineda, J. E. M., Pinto, G., y Vilarity, S. (2013). Patrones de distribución estacional de masas de agua en la bahía de Santa Marta, Caribe colombiano: importancia relativa del upwelling y outwelling. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 42(2).
- Rojas-Rodríguez, I. S., Coronado-García, M. A., Rossetti-López, S. R., y Beltrán-Morales, F. A. (2020). Contaminación por nitratos y fosfatos provenientes de la actividad agrícola en la cuenca baja del río Mayo en el estado de Sonora, México. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 247-256.
- Rojas-Rodríguez, I. S., Salazar-Solano, V., y Moreno-Dena, J. M. (2021). Simulación de la contaminación agrícola difusa en la cuenca baja del Río Mayo. *Agronomía Costarricense*, 45(1), 143-151.
- Silva Beleño, E. L. ., Bolívar, G. M., y Jiménez-Pitre, I. (2022). Riesgos relacionados con el cambio climático de la flora y fauna asociada a bosques de manglar en el Caribe colombiano. *Intropica*, 290–300. <https://doi.org/10.21676/23897864.4568>.
- Solano, M.S. (2004). Constructed wetland as a sustainable solution for wastewater treatment in small villages. *Biosystem Engineerin*: 109-118.

- Sotelo Navalpotro, J. A., Olcina Cantos, J., García Quiroga, F., y Sotelo Pérez, M. (2012). Huella hídrica de España y su diversidad territorial. *Estudios Geográficos*, 73(272), 239–272.
- Speake, M. A., Carbone, M. E., y Spetter, C. V. (2020). Análisis del sistema socio-ecológico del estuario Bahía Blanca (Argentina) y su impacto en los servicios ecosistémicos y el bienestar humano. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (73), 121-145.
- Tawfik, GM, Dila, KAS, Mohamed, MYF, Tam, DNH, Kien, ND, Ahmed, AM y Huy, NT (2019). Una guía paso a paso para realizar una revisión sistemática y un metaanálisis con datos de simulación. *Medicina tropical y salud*, 47 (1), 1-9
- Vammen, K. (2012). Conclusiones del estudio “Calidad y disponibilidad de los recursos hídricos en la subcuenca del río Viejo”; aportes para lograr un estado ambientalmente equilibrado en beneficio a la población. *Universidad y Ciencia*, 6(9), 24-30.
- Vidal, L., Vallarino, A., Benítez, I., y Correa, J. (2015). Implementación del plan estratégico Ramsar en humedales costeros de la Península de Yucatán: normativas y regulación. *Latin american journal of aquatic research*, 43(5), 845-855.
- Vivas-Aguas, L. J., Espinosa, L. F., y Parra Henríquez, L. G. (2013). Identificación de fuentes terrestres de contaminación y cálculo de las cargas de contaminantes en el área de influencia de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, 42(1), 7-30.
- Yeakley, J. A., Coleman, D. C., Haines, B. L., Kloeppel, B. D., Meyer, J. L., Swank, W. T., Argo, B. W., Deal, J. M. y Taylor, S. F. (2003). Hillslope nutrient dynamics following upland riparian vegetation disturbance. *Ecosystems*, 6: 154-167.
- Zaldívar-Jiménez, A., Herrera-Silveira, J., Pérez-Ceballos, R., y Teutli-Hernández, C. (2012). Evaluación del uso de los humedales de manglar como biofiltro de efluentes de camaronerías en Yucatán, México. *Revista de biología marina y oceanografía*, 47(3), 395-405.