

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE MODELACIÓN AMBIENTAL DEL VERTIMIENTO EN CUERPOS DE AGUA MARINOS

Martha Jayline Hudgson Arboleda¹
Marthahudgson@usantotomas.edu.co

Paulo German García Murillo²
paulogarcia@usta.edu.co

Johan Alexander Álvarez Berrio³
Johanalvarez@usta.edu.co

Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia

RESUMEN

El artículo analiza los enfoques y modelos usados para simular los vertimientos en cuerpos de agua marinos, esto con el objetivo de entender sus impactos ambientales. Mediante una revisión bibliográfica sistemática en bases científicas, se recopilaron estudios que utilizan modelos numéricos, hidrodinámicos y de calidad en los contextos urbanos, insulares e industriales. También se identificaron las variables y modelos más comunes en estos escenarios.

Los resultados resaltan la importancia de la modelación como herramienta predictiva en la dispersión de contaminantes, evaluación de riesgos y diseño de infraestructura. Modelos utilizados como ROMS, MIKE3 Y visual plumes permiten simular las condiciones estacionales, mareas y componentes químicos. Además, destaca la importancia de integrar datos de campo para validar simulaciones.

Finalmente, la revisión evidencia que la modelación no solo predice la dispersión de contaminantes, sino que también identifica zonas vulnerables y riesgos para la salud pública, especialmente en ecosistemas sensibles como arrecifes, manglares y pastos marinos. Aunque existen limitaciones asociadas a la disponibilidad de datos y a la complejidad de los modelos, se

resalta la necesidad de fortalecer la recolección de información ambiental y establecer lineamientos técnicos estandarizados.

Palabras clave: Aguas Residuales, Vertimiento, Costas, Emisario, Simulación.

ABSTRACT

This article analyzes the approaches and models used to simulate discharges into marine water bodies, with the goal of understanding their environmental impacts. Through a systematic literature review based on scientific evidence, studies were compiled that use numerical, hydrodynamic, and quality models in urban, island, and industrial contexts. The most common variables and models in these scenarios were also identified.

The results highlight the importance of modeling as a predictive tool in pollutant dispersion, risk assessment, and infrastructure design. Models such as ROMS, MIKE3, and visual plumes allow for the simulation of seasonal conditions, tides, and chemical components. Furthermore, it highlights the importance of integrating field data to validate simulations.

Finally, the review shows that modeling not only predicts pollutant dispersion but also identifies vulnerable areas and public health risks, especially in sensitive ecosystems such as reefs, mangroves, and seagrass beds. Although there are limitations associated with data availability and model complexity, the need to strengthen environmental data collection and establish standardized technical guidelines is highlighted.

Keywords: Wastewater, Discharge, Coasts, Outfall, Simulation

INTRODUCCIÓN

El vertimiento en cuerpos de aguas marinas constituye una fuente significativa de presión ambiental sobre los ecosistemas. Estas descargas, provenientes tanto de aguas residuales domésticas como no domésticas, interactúan con un entorno caracterizado por complejos procesos biológicos, físicos y químicos. En este contexto, las aguas residuales domésticas emergen como una fuente principal de contaminación; se estima que hasta el 80% de las aguas residuales generadas en países en desarrollo se vierten sin tratamiento en cuerpos de agua, lo que agrava la contaminación y afecta la salud pública (Organización Mundial de la Salud, 2017). La

contaminación por nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo provenientes de estas aguas residuales, ha llevado a la eutrofización de muchos ecosistemas acuáticos, resultando en la proliferación de algas nocivas y la muerte de especies marinas (Carpenter et al., 1998; UNESCO, 2018). A nivel global, las descargas no tratadas son una de las principales causas de la degradación de la calidad del agua. En el ámbito nacional, por ejemplo, en Colombia, el 60% de las aguas residuales no recibe tratamiento adecuado, lo que representa un riesgo significativo para los ecosistemas costeros, especialmente en áreas como el Caribe colombiano, donde la contaminación amenaza la economía local basada en el turismo y la pesca (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019; García, 2013). Esta complejidad exige una evaluación rigurosa de los impactos potenciales de los vertimientos, mediante el uso de herramientas especiales, entre las cuales se destacan la modelación y simulación ambiental.

La modelación ambiental es una herramienta científica que permite representar, analizar y predecir el comportamiento de los sistemas naturales mediante modelos matemáticos, computacionales o conceptuales. En los últimos años, la modelación se ha consolidado como un recurso fundamental para la gestión ambiental, ya que facilita la simulación de escenarios y la evaluación de cómo factores como los vertimientos, el cambio climático o la actividad antrópica afectan los ecosistemas. Su aplicación resulta especialmente relevante en zonas costeras, donde permite analizar la dispersión de contaminantes, la calidad del agua y la dinámica de los ecosistemas marinos, apoyando la toma de decisiones en la planificación y conservación de estos entornos. En Colombia, esta herramienta ha sido incorporada en procesos de licenciamiento y permisos ambientales, debido a su papel clave en la identificación de impactos potenciales y en el diseño de estrategias de mitigación que favorecen la protección de los recursos hídricos y la biodiversidad (IDEAM, 2023).

Actualmente, se emplean diversos programas de modelación y simulación para estudiar fenómenos en los ecosistemas acuáticos. Uno de estos programas es **Delft3D**, que es un modelo tridimensional de **hidrodinámica** y **calidad del agua**. Este tipo de modelo permite representar fenómenos como el movimiento del agua, la calidad del agua y el transporte de sedimentos, lo que es útil para entender cómo se mueven las aguas y cómo interactúan con los sedimentos y contaminantes. Por su parte, el software **MIKE 21** es un modelo de **simulación de ondas** y **procesos fisicoquímicos y biológicos** en el mar. Este modelo es especialmente valioso para analizar cómo las condiciones del

agua afectan a los organismos marinos y cómo se propagan las olas. Finalmente, el modelo numérico ROMS (Regional Ocean Modeling System) es un modelo de dinámica oceánica que se utiliza para simular corrientes oceánicas y su comportamiento. Este tipo de modelo es fundamental para predecir cómo se mueven las aguas en diferentes regiones del océano, lo que es crucial para la navegación, la pesca y la conservación de los ecosistemas marinos (Lynch et al., 2010).

Estos modelos permiten representar de forma detallada la hidrodinámica y la calidad del agua, considerando así variables clave que son fundamentales para una comprensión precisa de los procesos acuáticos. Entre estas variables se encuentra el caudal, que se refiere al volumen de agua que fluye a través de un punto específico en un tiempo determinado; es crucial para evaluar la capacidad de transporte de sedimentos y la dilución de contaminantes. La pendiente es otra variable importante, ya que influye en la velocidad del flujo del agua y en la erosión de los sedimentos, afectando la morfología del lecho del cuerpo de agua. Además, la carga contaminante es esencial, ya que representa la cantidad de contaminantes presentes en el agua, lo que impacta directamente en la salud de los ecosistemas acuáticos y en la calidad del agua para el uso humano. Considerar estas variables permite a los modelos ofrecer simulaciones más precisas y útiles para la gestión y conservación de los recursos hídricos.

El propósito general de este artículo es analizar, a través de una revisión bibliográfica, las principales herramientas utilizadas en la modelación ambiental de vertimiento en cuerpos de agua marinos. Se busca sistematizar los enfoques de aplicación presentes en artículos científicos, artículos de investigación y otro tipo de documentos académicos, con el fin de identificar la finalidad de dichas modelaciones y aportar una base técnica que respalde la gestión integral de los recursos hídricos en zonas costeras.

PROBLEMÁTICA

El aumento de la presión sobre los ecosistemas marinos, generado por diversas actividades humanas, como el vertimiento de aguas residuales domésticas (ARD) y no domésticas (ARnD), ha ocasionado un progresivo deterioro en la calidad del agua en zonas litorales y estuarinas. Esta problemática es evidente en varios casos, como en la Bahía de San Francisco, donde el vertido de aguas residuales no tratadas ha llevado a la contaminación de las aguas y a la disminución de la

biodiversidad marina (Cloern, 2001). Otro ejemplo es el Mar Menor en España, que ha sufrido un aumento en la eutrofización debido a la entrada de nutrientes y contaminantes provenientes de la agricultura y el turismo, resultando en la proliferación de algas nocivas (Bolaños et al., 2018). Asimismo, en la costa de Brasil, el vertimiento de aguas residuales en áreas urbanas ha contribuido a la degradación de la calidad del agua, afectando la salud de los ecosistemas y la calidad de vida de las comunidades locales (Barbosa et al., 2019). Estos casos ilustran cómo las descargas de ARD y ARnD impactan negativamente en los ecosistemas acuáticos y resaltan la necesidad de implementar medidas de gestión y tratamiento adecuadas.

El deterioro ambiental en cuerpos de agua marinos, como la Bahía de Cartagena, es un fenómeno complejo impulsado por distintos factores, no solo por vertimientos específicos. Un caso puntual de esta problemática es en la Bahía de Cartagena, cuya degradación ha sido ampliamente documentada por Cifuentes Montealegre & Mejía Dáger, 2015 y este detalla cómo los vertimientos de Aguas Residuales Domesticas y no Domesticas se vierten sin tratamiento, contribuyendo a que la Bahía sea uno de los cuerpos de agua más contaminados de la ciudad. Esta situación se agrava por la presencia de industrias en la Zona Industrial de Mamonal, que concentra el 70 % del sector petroquímico de la Región Caribe colombiana y vierte sus desechos con poco o ningún tratamiento (Cifuentes Montealegre & Mejía Dáger, 2015).

Más allá de los vertimientos directos, la sedimentación es un factor crítico. El estudio resalta la notable influencia de los aportes fluviales del Canal del Dique, un brazo artificial del río Magdalena, que introduce sedimentos provenientes de la tierra y aumenta las tasas de sedimentación en la Bahía y la plataforma continental (Cifuentes Montealegre & Mejía Dáger, 2015). Esta sedimentación, compuesta por lodos fluviales arcillosos, según el profesor Juan Darío Restrepo Ángel, Biólogo Marino y Oceanógrafo, se ha cubierto más de ochocientas de las mil hectáreas de praderas submarinas del sur de la Bahía y ha afectado playas que antes eran coralinas. Por otro lado, la dinámica de corrientes y vientos también juega un papel crucial en la dispersión de estos contaminantes y sedimentos. En la investigación se menciona cómo las brisas ("nortes") afectan la distribución del lodo fluvial, y cómo los "bombazos" de agua dulce cargados de nutrientes y limos provenientes del Canal del Dique llegan a los corales de las Islas del Rosario, reduciendo la salinidad y causando daños (Cifuentes Montealegre & Mejía Dáger, 2015).

Estos impactos multifactoriales afectan directamente ecosistemas sensibles y de alto valor ecológico. Los manglares, pastos marinos y formaciones coralinas son particularmente vulnerables. Por ejemplo, en las Islas del Rosario, parte del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo, se han registrado salinidades de 9 partes por mil, muy por debajo de la normal para corales 35 partes por mil, debido a los sedimentos del Canal Calamar-Mamonal (Cifuentes Montealegre & Mejía Dáger, 2015). La degradación de estos ecosistemas no solo implica una pérdida de biodiversidad, sino que también agrava los problemas de salud pública en las comunidades cercanas a las zonas de descarga y afecta actividades económicas como la pesca y el turismo (Cifuentes Montealegre & Mejía Dáger, 2015).

La modelación ambiental, aunque no se encuentre detallada como medida de mitigación en esta investigación, se infiere como una herramienta necesaria para poder comprender la compleja interacción de los factores de contaminación y sedimentación, y para diseñar estrategias efectivas de gestión ambiental. En el caso de la Bahía de Cartagena, la cual cuenta con una extensión aproximada de 82 km², es un claro ejemplo de la necesidad de implementar políticas efectivas de tratamiento y gestión de aguas residuales para proteger la salud pública y el medio ambiente.

METODOLOGÍA

Para la identificación de los artículos y su búsqueda se tuvieron en cuenta los siguientes pasos

1. Identificación de las palabras clave y formulación de ecuaciones de búsqueda.
2. Proceso de incorporación y omisión de la bibliografía encontrada.
3. Análisis e Interpretación de resultados de la bibliografía seleccionada.

Para la búsqueda bibliográfica se dividió la metodología en el siguiente apartado, que permite describir los pasos con mayor exactitud, estructurándolos de la siguiente manera: formulación, búsqueda y ejecución, y desenlace.

DESARROLLO

FORMULACION DE ECUACIÓN

Iniciando una vez estos espacios se determinó un listado de palabras claves correspondientes con la temática modelación ambiental de vertimiento en cuerpos de agua marino. Para la formulación se realizó un análisis bibliométrico clave como la base de datos de Science Direct y Scopus

BUSQUEDA Y RECOPIACIÓN DE DATOS SCOPUS

Se accedió a la base de datos de Science Direct, la cual es conocida por su extenso índice de artículos académicos, para la búsqueda en la base de datos se determinó a partir de la siguiente formulación de las palabras claves de búsqueda como se evidencia en la siguiente imagen

Figura 1 palabras claves en búsqueda en Science Direct

Find articles with these terms

Search box: ("Discharge modeling") AND (SEA)

Advanced search

Fuente propia

Figura 2 palabras claves en búsqueda en Scopus

Search within: Article title, Abstract, Keywords

Search documents *: ("Discharge modeling") AND (SEA)

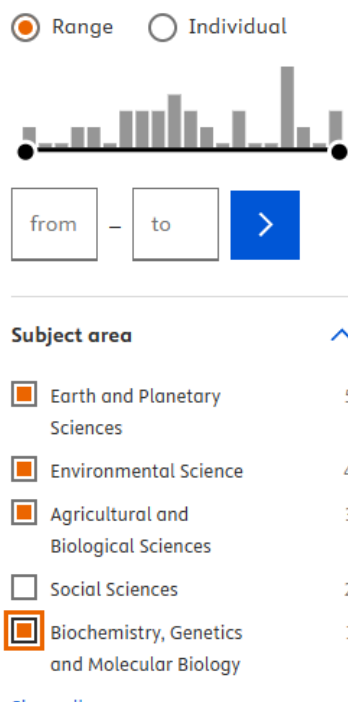
+ Add search field

Reset Search

Fuente propia

Estas palabras claves fueron seleccionadas para poder abarcar el espectro completo de investigaciones relevantes y asegurar que el análisis cubriera la relación entre la modelación ambiental del vertimiento en cuerpos de agua marino. Se aplicaron filtros para limitar la búsqueda a estudios recientes, revisiones sistemáticas y artículos en inglés y español, lo que permitió obtener un conjunto de datos representativo y actualizado, tal como se refleja en las siguientes figuras

Figura 3. Aplicación de filtros para limitar búsqueda en Scopus



Fuente propia

Figura 4. Aplicación de filtros para limitar búsqueda en Science Direct



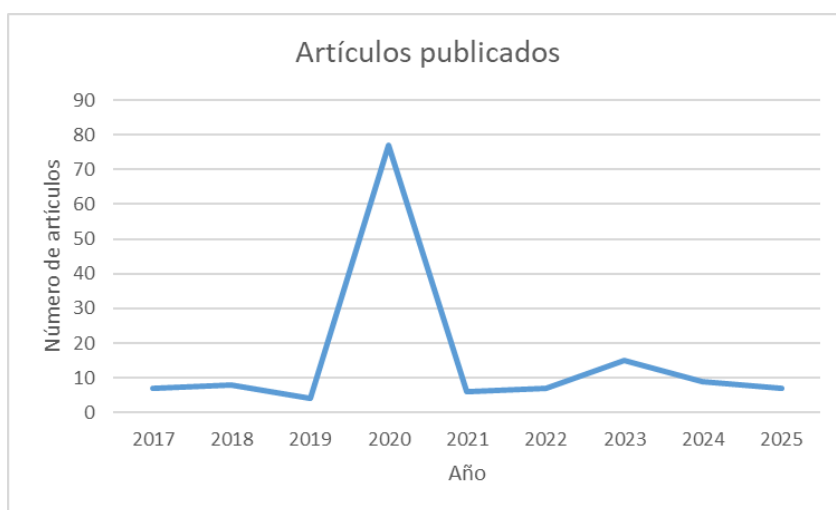
Fuente propia

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE SCIENCE DIRECT Y SCOPUS

Con el fin de obtener resultados más pertinentes y acordes, en ambas bases de datos se aplicaron filtros específicos durante la búsqueda bibliográfica, los cuales permitieron discriminar la información de acuerdo con la temática del estudio. Entre los filtros utilizados se incluyeron áreas del conocimiento como ciencias de la Tierra y planetarias, Ciencias Ambientales y Ciencias Biológicas y Agrícolas. Inicialmente se consideró un rango temporal desde el año 2006 hasta la actualidad; sin embargo, debido a la naturaleza evolutiva de los modelos y las tecnologías empleadas, se replanteó el criterio temporal, restringiendo la búsqueda a documentos publicados entre los años 2017 y 2025, para el caso de la base de datos Scopus se utilizó un rango temporal desde el año 2015 hasta el año 2023.

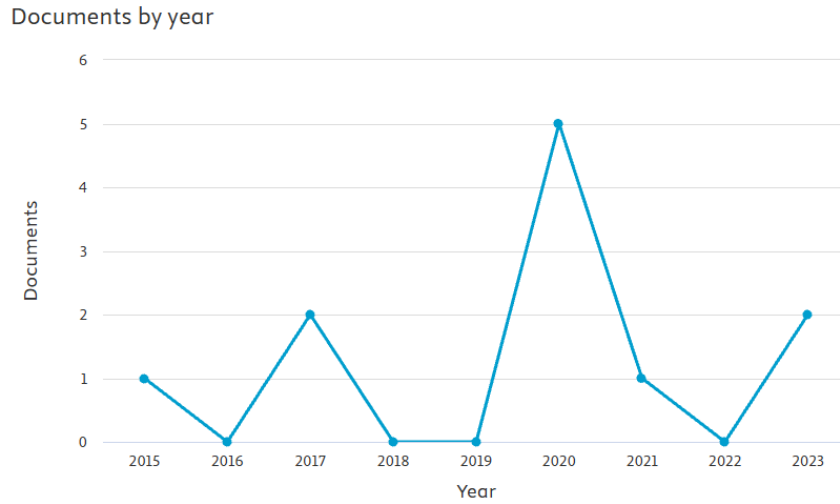
Esta delimitación permitió obtener artículos recientes, centrados en la modelación de vertimientos marinos y en la evaluación de los impactos generados por dichas descargas. Se priorizaron artículos científicos y revisiones sistemáticas, publicados en su mayoría en inglés, con el propósito de abarcar investigaciones desde el alcance local, regional e internacional. en la figura 5 y 6 se presenta la distribución de los artículos seleccionados por año de publicación.

Figura 5. Artículos por año en Science Direct.



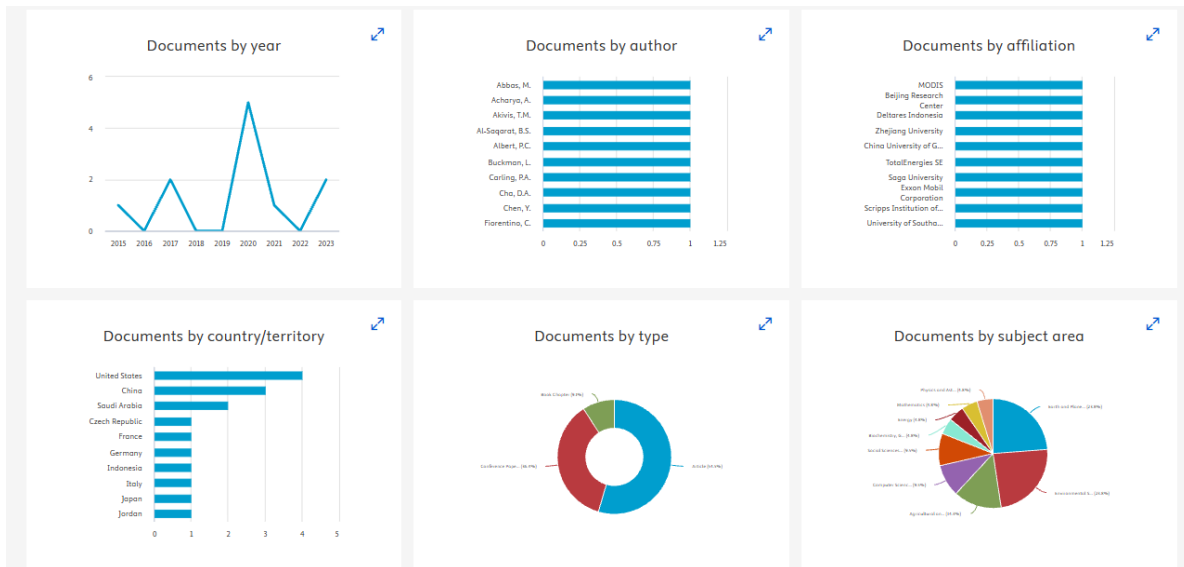
Fuente propia

Figura 6. Artículos por año en Scopus



Fuente propia

Figura 7 Fuentes y autores en Scopus



Fuente propia

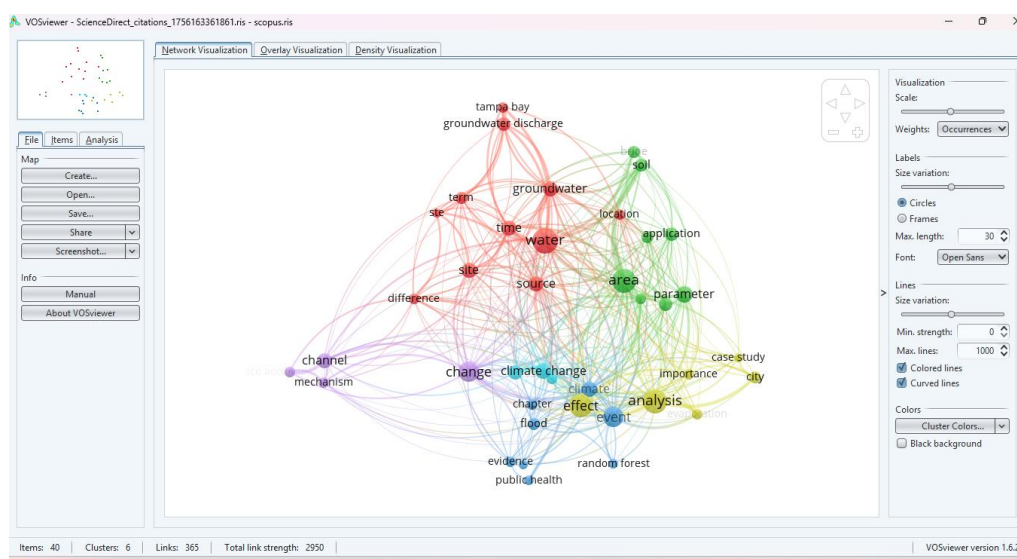
En el grafico documento por año se identificó que el año en el que más artículos se encontraron fue en el 2020. Para el gráfico documentos por autor, se presenta un análisis de la producción por parte de autores individuales. Algunos autores destacados como Abbas, Acharya y Akiwisi, los cuales tienen una contribución significativa, lo que sugiere que estos investigadores están activos

en la publicación, posiblemente en campos relacionados. En el área de documentos por afiliación, se observa una dominancia de instituciones como MODIS y Beijing Research Center, junto con varias universidades. Y los países con más producción documental fueron Estados Unidos y China. Por último, se evidencio que las áreas donde se concentra mayormente los documentos son en Ciencias de la Tierra y Planetarias y Ciencias Ambientales (23.8% cada una), evidenciando un enfoque prioritario hacia temas ambientales y de sostenibilidad. Y Ciencias Agrícolas y Biológicas (14.3%).

ANALISIS DE DATOS CON VOSVIEWER

Una vez recopilados los artículos relevantes en formato compatible, los datos fueron procesados en VOSviewer, que es un Software especializado en el análisis y visualización de datos bibliométricos. Con el VOSviewer, se realizó un análisis de coocurrencias de palabras clave, las redes de colaboración entre autores y estudios de citas. Esto permitió identificar patrones, tendencias de investigación y conexiones entre las palabras claves y temáticas en el campo de estudio.

Figura 8 Programa VOSviewer

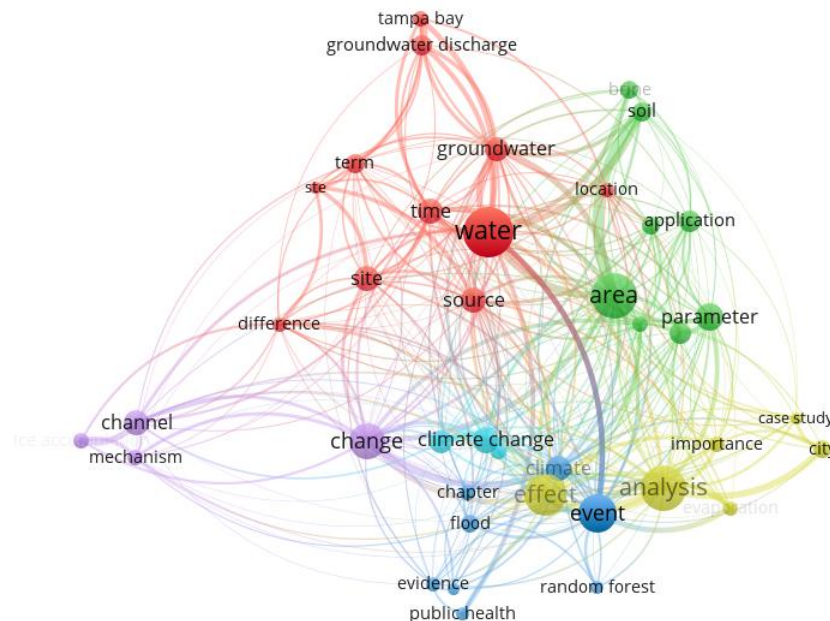


Fuente propia

A través de la visualización generada por el software, se interpretaron las relaciones entre conceptos claves y frecuencia de las colaboraciones entre investigadores, lo cual facilito la

identificación de áreas propietarias de investigación, brechas de conocimiento y posibles enfoques innovadores en la modelación ambiental del vertimiento en cuerpos de agua marino.

Figura 9. Ocurrencia de términos



Fuente propia

La figura 9 visualiza las relaciones entre palabras claves en estudios sobre la modelación ambiental del vertimiento en cuerpos de agua marino, entre ellos se encuentra un análisis de electos principales tales como: Nodo centrales, Clúster de color, Relación entre nodos y las implicaciones del análisis.

En los nodos la palabra “Water” aparece en el centro del mapa, indicando su relevancia y alta frecuencia en los estudios analizados. Otros términos importantes en la red son “Chanel”, “Área”, “Parameter”.

En las conexiones, las palabras están conectadas por líneas que indican la relación entre ellas y los colores representan diferentes grupos temáticos:

- Rojo: Los términos relacionados con el agua.
- Verde: Los términos asociados con áreas y parámetros.
- Azul: Los términos sobre análisis y efectos.

- Morado: Los elementos relacionados con el cambio y mecanismos.

También se abordaron las siguientes temáticas:

- Fuentes de Agua: Términos como "groundwater discharge" y "source".
- Efectos del Cambio Climático: Referencias a "flood", "climate change" y "public health".
- Análisis y Estudio: Uso de "case study", "analysis", y "random forest".

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE LA BIBLIOGRAFIA SELECCIONADA

Finalmente, se sintetizaron los hallazgos para así resaltar las contribuciones más significativas de la modelación ambiental del vertimiento en cuerpos de agua marinos, en esta se incluyeron los artículos que dieron a conocer las aplicaciones prácticas de los distintos programas para la modelación y simulación, destacando sus aportes en términos de monitoreo, simulación, análisis y prevenciones para la sostenibilidad en los ecosistemas marinos.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El respectivo análisis de los artículos seleccionados permite identificar las distintas herramientas que sirven para la simulación de los vertimientos al mar, destacando la modelación hidrodinámica y la calidad del cuerpo de agua como los enfoques claves para poder predecir y gestionar los impactos que generan estos vertimientos. Estos modelos son importantes para la optimización de proyectos como la evaluación de la dispersión de los contaminantes, la predicción de la evolución del vertimiento, la mejora en la gestión del recurso hídrico marino. También, resalta la relevancia que cada fuente consultada, y dando a conocer como las tecnologías contribuyen a incrementar la eficiencia en la gestión de los vertimientos, la reducción de riesgos de contaminación y la mitigación de los impactos ambientales marinos.

1. La investigación realizada por Arroyave Gómez et al. (2021) se enfocó en comprender cuál es la interacción entre los factores naturales, tales como el afloramiento estacional, y las presiones antropogénicas, (Capone & Hutchins, 2013; Griffiths et al., 2017). conocidos como los vertimientos de Aguas residuales no tratadas, sobre la calidad ambiental en la zona costera en la

ciudad de Santa Marta, ubicada en el caribe colombiano. Para este trabajo, se aplicó un modelo acoplado tridimensional **AEM3D**.

El AEM3D es un modelo tridimensional acoplado hidrodinámico–biogeoquímico, este integra los procesos físicos y ecológicos en ambientes acuáticos como lagos, estuarios y zonas costeras. En este modelo se simula la velocidad, la temperatura, la salinidad, los nutrientes y los procesos biogeoquímicos (producción primaria, ciclos de carbono, nutrientes, oxígeno, metales, sedimentos y biota acuática). El software es licenciado y fue desarrollado por la empresa HydroNumerics. El modelo resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Reynolds para un flujo incomprensible (Dallimore & McAllister, 2022). Esta ecuación describe la conservación de la cantidad de movimiento en la columna de agua y se expresa de la siguiente manera:

Ecuación

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u + fk * u = -\frac{1}{\rho_0} \nabla \eta + f_{friccion}$$

Donde

- $u = u, v = \text{vector de velocidad horizontal (m/s)}$
- $\frac{\partial u}{\partial t} = \text{Tasa de cambio temporal de la velocidad.}$
- $(u \cdot \nabla)u =$
término advectivo, representa la aceleración debida al transporte horizontal
- $f = \text{Parámetro de Coriolis } (f = 2 \Omega \sin \phi), \text{ depende de la latitud } \phi$
- $k = \text{Vector unitario vertical}$
- $k \times u =$
Fuerza de Coriolis, describe el efecto de la rotación terrestre sobre la circulación
- $\eta = \text{Elevación de la superficie libre (m)}$
- $\rho_0 = \text{Densidad de referencia del agua (kg/m}^3\text{)}$
- $F_{friccion} =$
Términos de fricción vertical y horizontal, que representan la disipación turbulenta.

el modelo AEM3D describe la conservación de la masa en el sistema, considerando la variación temporal del nivel libre de agua y la divergencia del flujo horizontal integrado verticalmente. (Dallimore & McAllister, 2022) En formato más claro, se expresa de la siguiente manera:

Ecuación

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\int_b^{\eta} u \, dz \right) = 0$$

Donde

- η = Elevación de la superficie libre (m).
- b = Cota del fondo (m).
- $u=(u,v)$ = Vector de velocidad horizontal (m/s).
- z = Coordenada vertical (m).
- ∇ = Operador de divergencia horizontal.

Por último, se tiene la ecuación de transporte de (temperatura, salinidad, nutrientes) que se expresa de la siguiente manera:

Ecuación

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \cdot \nabla C = \nabla \cdot (K \nabla C)$$

Donde

- C es la concentración de un escalar
- K el coeficiente de difusión turbulenta

Para la modelación de este estudio se recopilamos datos batimétricos, meteorológicos, mareográficos e información de caudales y calidad del agua, los cuales sirvieron como insumos para configurar la malla tridimensional del modelo. Se establecieron condiciones de frontera abiertas y cerradas, así como forzamientos físicos como viento, radiación y mareas, incorporando además las cargas puntuales de vertimientos. Posteriormente, se simulamos distintos escenarios

para analizar la dispersión de nutrientes, la demanda biológica de oxígeno (DBO) y el comportamiento del oxígeno disuelto. Finalmente, el modelo fue calibrado y validado con datos recolectados en campo, alcanzando un desempeño satisfactorio con métricas como el Error Medio Cuadrático (RMSE) y coeficientes de correlación superiores a $R^2 > 0.7$, demostrando su efectividad para representar los procesos hidrodinámicos y biogeoquímicos de la bahía.

Los resultados de esta investigación evidenciaron que, a pesar de la descarga de aguas residuales no tratadas, el sistema natural presenta una alta capacidad de autodepuración, debido a las elevadas tasas de renovación y mezcla. Estos procesos están influenciados principalmente por el régimen de afloramiento estacional, que aporta aguas profundas frías y ricas en nutrientes, generando un recambio constante de masas de agua; la dinámica de las corrientes costeras y mareas, que favorecen la dispersión lateral y vertical de los contaminantes; y la morfología y batimetría de la bahía, que facilitan la mezcla vertical y reducen la acumulación localizada de nutrientes. Esta combinación de factores evita la acumulación excesiva de nutrientes y, por ende, el desarrollo de floraciones algales persistentes. Sin embargo, durante los periodos de afloramiento, el sistema mostró respuestas biológicas rápidas, evidenciadas por picos de clorofila-a ocasionados por la repentina disponibilidad de nutrientes, lo que subraya la sensibilidad del ecosistema frente a cambios en el balance de las cargas. (Arroyave Gómez et al., 2021).

2. El artículo de Kim et al. (2023), estudio el transporte y la acumulación de micro plásticos (MPs) que son vertidos desde la estación científica King Sejong en Marian Cove, el cual está ubicado en la Antártida occidental. La investigación surge a raíz del hallazgo creyente de micro plásticos en zonas que antes eran consideradas prístinas, es decir una zona sin alteraciones, como el océano austral. Para evaluar la dinámica de estos contaminantes, los autores implementaron un modelo de simulación numérica combinado con el rastreo de movimiento de las partículas Lagrangianas, este es un método para poder describir el movimiento de fluidos o campos, a lo largo del tiempo. El uso de modelos lagrangianos ha sido ampliamente recomendado por autores como van Sebille et al. (2015) para estimar rutas de transporte oceánico a partir de datos de corrientes y vientos. Y así pues clasificando los micro plásticos según su comportamiento de flotación o sedimentación.

El modelo utilizado en el estudio es FVCOM, el cual es un modelo numérico tridimensional hidrodinámico basado en el método de volúmenes finitos para simular la circulación costera, el transporte de sedimentos y dispersión de partículas. El modelo representa con alta resolución las

mareas, corrientes y olas que afectan en el caso de la investigación el transporte de los micro plásticos. El FVCOM es un modelo espacial tridimensional y es de uso gratuito con fines académicos y de investigación (Gao, Chen, & Beardsley, 2002).

Este modelo resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes tridimensionales promediadas de Reynolds (**uRANS**) bajo la aproximación hidrostática y la aproximación de Boussinesq. Las principales son:

a. Ecuación de continuidad (conservación de masa)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0$$

Donde

- η = elevación de la superficie libre.
- H = profundidad total (nivel del agua + batimetría).
- u, v = componentes horizontales de velocidad.

b. Ecuaciones de transporte de momento

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} + F_u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - fu = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} + F_v$$

Donde:

- f = parámetro de Coriolis.
- τ_x, τ_y = esfuerzos de corte.
- F_u, F_v = términos de fricción.
- g = aceleración de la gravedad

los resultados de la investigación mostraron que la dispersión y acumulación de los micro plásticos en la bahía estaban relacionadas entre las condiciones hidrodinámicas locales (corrientes, olas y

mareas) y al momento que se realiza la descarga del vertimiento. En el estudio se evidencio que la concentración de los micro plásticos aumenta en las zonas donde las corrientes son un poco débiles y la energía hidrodinámica es baja, esto debido a que la dispersión se ve limitada. Asimismo, la morfología que tiene la Bahía de Maria Cove y su batimetría compleja genera que las áreas de retención natural, actuando como trampas que favorecen a la acumulación de las partículas. Por otra parte, los momentos críticos del ciclo fueron identificados por el modelo, y corresponden a las fases donde la marea esta baja y la transición a pleamar, donde las velocidades de corriente disminuyen, lo cual provoca una mayor retención de los micro plásticos, mientras que en condiciones de marea alta y un oleaje intenso, la dispersión es significativamente mayor. Además, el modelo utilizó micro plásticos con rangos de densidad entre 0,91 y 1,40 g/cm³ y tamaños entre 50 µm y 5 mm, simulando diferentes tipos de polímeros presentes en los vertimientos. Se observó que las partículas de menor tamaño permanecen en suspensión por más tiempo y son transportadas a mayores distancias, mientras que las partículas más densas y grandes tienden a depositarse en las zonas de menor energía, contribuyendo a la formación de bolsones de alta concentración en sectores específicos de la bahía.

La modelación en este artículo permitió evaluar con detalle los mecanismos físicos que determinan el destino de los micro plásticos en un ecosistema antártico vulnerable. Gracias a ello, se propusieron medidas prácticas para mejorar el diseño y la operación de las plantas de tratamientos en las estaciones científicas. En suma, el uso de modelos numéricos en esta investigación destaca su papel fundamental en el diseño de estrategias de mitigación adaptadas a entornos con condiciones extremas (Kim et al., 2023).

3.En el estudio desarrollado por Alvir et al. (2022) se propuso una metodología para modelar el comportamiento de los vertimientos desde emisarios submarinos en zonas costeras, esto mediante la integración de los modelos ROMS y OpenFOAM. El modelo ROMS (Regional Ocean Modeling System) es un modelo hidrodinámico tridimensional diseñado para representar los procesos de campo lejano, simulando así las corrientes, mareas, temperatura y salinidad (Shchepetkin & McWilliams, 2005). Este modelo es un software de código abierto y se utilizan ecuaciones simplificadas de Navier- Stokes bajo las aproximaciones hidrostática y Boussinesq, resolviendo la ecuación de continuidad, las ecuaciones de transporte de momento y las de conservación de masa

y energía, lo que permite reproducir de forma precisa la circulación oceánica y costera a gran escala.

Las ecuaciones utilizadas son

a. Ecuación de continuidad (conservación de masa)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0$$

Donde:

- η = elevación de la superficie libre.
- H = profundidad total (nivel del agua + batimetría).
- u, v = componentes horizontales de velocidad.

Por su parte, OpenFOAM es una plataforma de dinámica de fluidos computacional (CFD), también gratuita y de código abierto, utilizada para el campo cercano, donde se requiere mayor detalle en la representación de la pluma de vertimiento (Maric, Marschall, & Bothe, 2013). En este caso, se empleó el solver twoLiquidMixingFoam, que está diseñado para simular la mezcla miscible de dos líquidos incompresibles bajo diferentes condiciones hidrodinámicas.

El estudio fue aplicado en el emisario submarino de Rijeka, Croacia, una ciudad costera con un importante vertimiento Urbano, se realizaron varias simulaciones con distintas condiciones estacionales, para así observar el comportamiento del chorro del efluente bajo escenarios de estratificación térmica y variabilidad de salinidad. Los resultados obtenidos mostraron una buena concordancia con los datos experimentales y confirmaron que el modelo propuesto es capaz de predecir con precisión la mezcla, dispersión y dilución del vertimiento, estando en condiciones estivales como invernales. En el modelo se evidencio que las concentraciones más altas de los contaminantes se presentaron en las zonas cercas de la descarga, estas con valores iniciales superiores a 15 mg/L de sólidos disueltos y nutrientes, disminuyendo rápidamente con la distancia debido al efecto de la dilución. Asimismo, la pluma del efluente se extendió aproximadamente entre 200 y 400 metros desde el punto de descarga en condiciones de estratificación débil, mientras que, en escenarios con estratificación fuerte, la dispersión lateral fue menor y las manchas de contaminante permanecieron más concentradas cerca del fondo. En contraste, durante periodos de

mayor energía hidrodinámica, como mareas vivas o presencia de vientos intensos, la pluma alcanza hasta 600 metros de longitud, aunque con concentraciones significativamente más bajas debido al incremento de la mezcla vertical.

La modelación se empleó desde el diseño hasta la evaluación de impactos ambientales del emisario, destacando su valor como herramienta de gestión integrada. Este tipo de metodología no solo mejora la representación de procesos físicos complejos, sino que también reduce el número de ecuaciones resolviendo salinidad y temperatura como fracciones de volumen. El enfoque de Alvir et al. (2022) ofrece una solución robusta y adaptable a diversas regiones costeras del mundo.

4. El estudio hecho por Birocchi et al. (2021) en él se enfocaron en evaluar la dispersión de contaminantes fecales, específicamente de coniformes termo tolerantes, que son originados por tres emisarios submarinos de aguas residuales domésticas ubicados en el canal de São Sebastião, en la costa del estado de São Paulo, Brasil. Según Teodoro et al. (2010) y Lamparelli et al. (2016), muchos emisarios en la costa brasileña operan con pretratamiento limitado, lo que eleva el riesgo sanitario. La investigación se desarrolló mediante modelado numérico, utilizando el software Visual Plumes con el modelo **UM3** para el campo cercano y el modelo **ECOM** para el campo lejano. Los escenarios analizados incluyeron condiciones hidrodinámicas de verano e invierno del año 2016, con el objetivo de identificar si los vertimientos generaban impactos sobre las zonas costeras y recreativas.

El software Visual Plumes es una herramienta desarrollada por la Agencia de protección Ambiental (EPA) para modelar plumas de descarga de emisarios submarinos, la función principal es modelar la dinámica inicial del vertimiento en campo cercano usando modelos integrados como UM3. este software es gratuito y de libre acceso y se encuentra disponible en la Agencia (EPA, 2024).

El modelo UM3 (User Mixed Model 3D) es un modelo de pluma integral que está incluido en Visual Plumes. Es un modelo integral tridimensional, en el cual se simula chorros y plumas de vertimientos en medios estratificados, este simula el comportamiento de la pluma justo después de salir del difusor, calcula la trayectoria, dilución inicial y la densidad de la pluma MIKE 3 Flow Model (s. f.).

El modelo UM3 resuelve un sistema de ecuaciones integrales que están basadas en la conservación de la masa, la cantidad de movimientos y la densidad. Esta se expresa de la siguiente manera

a. Ecuación Conservación de masa

$$\frac{dQ}{ds} = 2\pi r u_e$$

Donde

- Q = caudal en la pluma.
- r = radio de la pluma.
- u_e = velocidad de entrainment (mezcla lateral).

b. Conservación de momento

$$\frac{d}{ds}(\rho Q u) = \rho a g' Q k - D$$

Donde

- ρ = densidad de la pluma.
- ρa = densidad ambiental.
- g' = gravedad reducida.
- D = fricción y pérdidas de energía.

c. Conservación de densidad o concentración:

$$\frac{d}{ds}(\rho Q) = E_m$$

Donde

- Donde E_m representa la mezcla turbulenta entrante.

Por otro lado, el modelo ECOM (Estuarine and Coastal Ocean Model) fue utilizado para el campo lejano, es decir, la dispersión de contaminantes una vez que la pluma deja la zona inmediata del

emisario. El tipo es hidrodinámico tridimensional, es gratuito y fue desarrollado por la Rutgers University, es utilizado para estudios costeros. El modelo simula corrientes, mareas, salinidad y temperatura. También calcula la advección y dispersión de los contaminantes en la columna de agua. La ecuación de gobierno principales del modelo se expresa de la siguiente manera:

a. Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + v \frac{\partial (Hv)}{\partial y} = 0$$

Donde

- η = altura de la superficie libre.
- H = profundidad total.
- u, v = velocidades horizontales

b. Ecuaciones de momento horizontal

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_m \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - f u = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_m \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

Incluyen el efecto Coriolis, gradientes de presión y difusión turbulenta vertical.

c. Ecuación de transporte de contaminantes:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \nabla \cdot (K_c \nabla C)$$

Donde

- C = concentración de contaminantes.
- K_c = coeficiente de dispersión.

Los resultados de esta investigación indicaron que las plumas generadas por los emisarios eran, en su mayoría, adecuadamente dispersadas por la circulación natural del canal, y este no excedían los límites máximos permisibles que esta establecidos en la resolución CONAMA 274 (2000), sin embargo, en un evento puntual durante junio de 2016, ya que una anomalía se asoció a las condiciones hidrodinámicas atípicas registradas en esa temporada, caracterizadas por bajas velocidades de corriente, la ausencia de estratificación térmica escasa mezcla vertical, lo que provocó un aumento temporal de la persistencia de coliformes en el agua. La zona cercana al emisario de Araçá presentó los mayores niveles de concentración, aunque incluso allí los valores superaron los 1000 MPN/100 mL por menos del 0,1 % del tiempo simulado. El modelo fue validado con datos reales proporcionados por CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) y SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo), estas entidades son responsables del monitoreo de la calidad del agua y del saneamiento en la región. Además, los principales resultados mostraron que la mayor parte del tiempo, la pluma de efluente se mantenía cerca de la zona de descarga, con altas tasas de dilución inicial y concentraciones menores en el campo lejano, lo que evidencia que el sistema de dispersión es eficiente bajo condiciones normales. Sin embargo, durante el evento de junio de 2016, las condiciones ambientales favorecieron una acumulación localizada de contaminantes, demostrando la sensibilidad de la dinámica de pluma frente a variaciones hidrodinámicas (Birocchi et al., 2021).

La modelación numérica se aplicó para entender la dinámica de dilución bacteriana en ambientes costeros influenciados por múltiples fuentes de vertimiento, como lo son los 3 emisarios submarinos: Emisario de Araca, el cual está ubicado en una zona con alta densidad poblacional y actividades portuarias, presento concentraciones altas de coliformes termo tolerantes debido al volumen elevado de descarga. El emisario de Barra Velha, en el que se maneja los vertimientos de aguas residuales domésticas de una zona urbana. Y, por último, el emisario de Ponta do Guaecá, en donde se recibe descargas de aguas residuales domésticas de las áreas residenciales y turísticas más pequeñas, por lo que sus aportes son menores en comparación con los otros dos emisarios.

Esta herramienta permitió que los autores identificar zonas de riesgo sanitario, lo cual resulta clave para la planificación costera, el monitoreo de playas y el diseño futuro de emisarios. En conjunto, este artículo demuestra cómo la modelación ambiental puede integrarse con datos de monitoreo

para guiar decisiones de saneamiento en áreas urbanas con creciente presión demográfica (Birocchi et al., 2021).

5. En el contexto de ciudades costeras altamente urbanizadas, Al Mamoon et al. (2020) se llevaron a cabo un análisis del comportamiento de las aguas pluviales descargadas a través de emisarios marinos en la bahía de Doha, Catar. para esto se utilizó el modelo numérico tridimensional **MIKE 3**, y se simularon tres escenarios clave: el primero con condiciones de clima seco, el segundo con un evento representativo de lluvia, y el tercero con la primera descarga tras un periodo prolongado sin precipitaciones, se eligieron estos tres escenarios ya que según Zgheib et al. (2011) y Gasperi et al. (2010) han documentado que los eventos de lluvia tras periodos secos arrastran cargas significativas de contaminantes, conocidos como first flush. El objetivo fue evaluar la dispersión de contaminantes, como coliformes fecales y sólidos suspendidos, y su posible impacto sobre la calidad del agua y los sedimentos costeros.

El modelo MIKE3, es un sistema numérico 3D, baroclinico y no necesariamente es hidrostático, está diseñado para simular las dinámicas complejas en océanos, regiones costeras, y estuarios. Fue desarrollado por la empresa danesa DHI y forma parte de suite MIKE Powered by DH. Este modelo permite la simulación de flujos transitorios en 3D, incorporando variaciones de densidad, batimetría detallada y forzamientos extremos como viento, mareas, corrientes, precipitación y evaporación. MIKE3D es un software comercial con licencia propietaria, este no tiene código abierto, por lo cual se requiere de licencia para su uso MIKE 3 Flow Model (s. f.) En este modelo se usan las siguientes ecuaciones del gobierno

a. Continuidad (local 3D)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$$

Donde

- u, v, w = son las velocidades
- S = representa fuentes/sumideros volumétricos (normalmente $S=0$)

b. Momento horizontal (x, y) con hidrostática y Boussinesq):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \nabla h \cdot (v h \nabla h u)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} - f u = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \nabla h \cdot (v h \nabla h v)$$

Donde

- $F = \text{Coriolis}$
- $H = \text{la elevación de la superficie}$
- $p' = \text{el término baroclínico (gradiente de densidad por } T, S)$
- $v_t, v_h = \text{las viscosidades turbulentas vertical y horizontal}$
- $Fu, v = \text{agrupan esfuerzo del viento, fricción de fondo, presión atmosférica, radiación de oleaje}$

La realización de esta modelación ambiental aplicada en este estudio funcionó como una herramienta predictiva para evaluar el comportamiento dinámico de los vertimientos urbanos bajo las distintas condiciones hidro-meteorológicas. Los hallazgos respaldan la necesidad de una gestión proactiva de las infraestructuras de drenaje pluvial, especialmente en zonas áridas en donde las lluvias intensas pueden arrastrar contaminantes acumulados Zgheib et al. (2011) y Gasperi et al. (2010). Este tipo de análisis basado en las simulaciones, permite la toma de decisiones para la planificación urbana y protección costera (Al Mamoon et al., 2020).

Los resultados obtenidos de la modelación revelaron que, si bien las concentraciones de contaminantes en las inmediaciones de los emisarios submarinos eran significativas, con valores iniciales que alcanzaban hasta 15–20 mg/L de sólidos suspendidos totales (TSS) y 5–7 mg/L de nitrógeno total, en términos generales, el riesgo sanitario para las actividades recreativas se mantenía bajo, especialmente en las aguas superficiales donde las tasas de dilución eran más elevadas. No obstante, el estudio identificó un riesgo ambiental más relevante relacionado con la acumulación de contaminantes en los sedimentos, especialmente de metales pesados y nutrientes, lo que podría generar un impacto a largo plazo sobre los ecosistemas bentónicos y la calidad ecológica del ambiente marino costero. El modelo MIKE 3 también permitió estimar la extensión geográfica de la pluma de vertimiento, que alcanzó áreas de influencia de aproximadamente 1,2 a 1,8 km desde los puntos de descarga, dependiendo de la condición de marea y estratificación.

Además, se observó que estas áreas de afectación coinciden con zonas de pastos marinos, arrecifes de coral y áreas de recreación turística, lo que representa un potencial riesgo tanto para los ecosistemas marinos sensibles como para las comunidades que dependen de estas áreas para actividades económicas y recreativas.

6. La investigación de Palomar et al. (2018) se centra en la evaluación de herramientas comerciales para modelar la descarga de salmuera que es proveniente de plantas desalinizadoras, específicamente en la región del Mar Mediterráneo, donde la proliferación de estas plantas hace prioritaria la gestión adecuada de los vertimientos debido a los impactos potenciales sobre los ecosistemas marinos. El estudio se enfocó en la etapa de campo cercano, caracterizada por la mezcla inicial de la salmuera con el agua receptora. La metodología consistió en un análisis comparativo de los modelos CORMIX, VISJET y Visual Plumes, evaluando sus fundamentos teóricos, limitaciones, capacidad predictiva y validación con datos experimentales. Para la simulación, se emplearon condiciones ambientales típicas del Mediterráneo y configuraciones de difusores con chorros inclinados, analizando parámetros críticos como salinidad, densidad, caudal de descarga, velocidad del chorro, temperatura y estratificación del agua. Estos modelos se basan en ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía, aplicando formulaciones de plumas turbulentas y procesos de difusión. Su campo de aplicación está orientado a evaluar la dispersión y dilución de descargas de salmuera, y requieren información detallada sobre las características del efluente, datos hidrodinámicos locales, condiciones meteorológicas, profundidad y configuración de los emisarios, permitiendo así predecir con mayor precisión el comportamiento de los vertimientos en zonas costeras.

Los resultados indican que los modelos comerciales presentan inconsistencias en la predicción del comportamiento de chorros de flotabilidad negativa, fenómeno principalmente asociado a diferencias de densidad generadas por la elevada salinidad de la salmuera, aunque las variaciones de temperatura también pueden influir, especialmente en ambientes estratificados. Se observó que la mayor dilución se alcanza con chorros ascendentes inclinados, y que la validación con datos de laboratorio revela desviaciones en las predicciones. El estudio recomienda una selección cuidadosa del modelo según el régimen hidráulico y las condiciones del entorno, siguiendo los criterios de Roberts (1980), quien estableció los fundamentos para evaluar la dilución inicial, aportando un marco confiable para comparar simulaciones.

El modelo predominante utilizado fue CORMIX en sus versiones 1 y 2, basado en análisis dimensional y modelos integrales. Estos sistemas simulan chorros en ambientes homogéneos y estratificados, permitiendo evaluar la trayectoria, dilución y asentamiento de la salmuera. Aunque son herramientas prácticas, se concluye que requieren mejoras para representar con fidelidad la dinámica de chorros densos, siendo su aplicación más adecuada en fases preliminares del diseño ambiental de emisarios (Palomar et al. 2018).

7. En el modelo numérico, Ataie-Ashtiani (2017) presenta la investigación del **MODSharp**, este modelo fue para analizar la intrusión salina y la migración de penachos contaminantes en un acuífero **costero** ubicado en el sur de Irán, en la región de Bushehr, sobre el Golfo Pérsico. También fue desarrollado para cuantificar el flujo de agua subterránea y la descarga de contaminantes desde acuíferos costeros hacia zonas marinas. La metodología se basa en una formulación numérica cuasi tridimensional, que adopta un enfoque de interfaz nítida (sharp interface) para poder representar la intrusión de agua salada en acuíferos estratificados. Se realizaron simulaciones bajo diferentes escenarios de presión hidráulica, condiciones de frontera y permeabilidad del suelo.

ModSharp es un modelo hidrodinámico numérico que fue desarrollado para analizar el comportamiento de chorros inclinados y plumas densas que provienen de descargas submarinas. Su objetivo es predecir la dilución inicial y trayectoria de la pluma, además de la interacción con el medio receptor, en el cual se considera los efectos de la salinidad, temperatura, velocidad de descarga, geometría del difusor y la estratificación ambiental. Este modelo no es de libre acceso, es un software con licencia académica desarrollado por el equipo de Ataie-Ashtiani en la Sharif University of Technology (Irán) y fue creado especialmente para fines investigativos. El modelo cuenta con las siguientes ecuaciones:

a. Ecuación de continuidad (conservación de la masa)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

b. Ecuaciones de cantidad de movimiento (Navier-Stokes bajo aproximación de Boussinesq)

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + g \frac{\Delta \rho}{\rho_0}$$

Donde

- u = *vector velocidad*
- ν = *viscosidad cinemática*
- ρ = *densidad*
- g = *gravedad*

c. Ecuación de transporte de salinidad y temperatura

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \cdot \nabla C = D \nabla^2 C$$

Donde

- C = *concentración de salinidad o temperatura*
- D = *coeficiente de difusión molecular*

El estudio también aborda de manera explícita el concepto de vertimiento, entendiendo que los contaminantes transportados por el flujo subterráneo hacia el mar, lo cual constituyen una forma de vertimiento difuso. A diferencia de los vertimientos puntuales a través de emisarios, esta descarga subterránea ocurre de manera continua e invisible, y esto de una manera u otra está afectando la calidad del agua costera y los ecosistemas marinos sin una fuente identificable en superficie. Esta forma de vertimiento es particularmente relevante en zonas con alta presión urbana o agrícola, ya que nutrientes, lixiviados y otras sustancias químicas pueden infiltrarse en los acuíferos y terminar en el mar sin tratamiento previo. Por ello, el modelo propuesto se orienta a cuantificar estas cargas contaminantes y aportar herramientas para su gestión dentro del marco de control de vertimientos no convencionales.

Los resultados obtenidos, indican que la omisión de la interfaz de intrusión salina en modelos simplificados genera errores significativos en la estimación de la velocidad de migración del penacho contaminante. También se comprobó que la conductividad hidráulica es un factor crítico que afecta el volumen y la dirección del flujo contaminado hacia el mar. El modelo demostró ser eficaz para evaluar el comportamiento de contaminantes bajo la influencia de procesos costeros.

Se apoya en el trabajo de Bear et al. (1999), el cual destaca la complejidad de los flujos densidad-dependientes en zonas de intrusión marina.

El modelo MODSharp se basa en la adaptación del sistema SHARP, MODSharp es una actualización del modelo SHARP, ya que parte de su misma estructura numérica basada en diferencias finitas, pero incorpora módulos avanzados para simular mareas, recarga, fugas verticales y procesos de mezcla entre agua dulce y salada. Estas mejoras permiten analizar con mayor precisión la intrusión salina y el transporte de contaminantes. En este modelo, y utilizando diferencias finitas para resolver las ecuaciones de flujo y transporte en acuíferos estratificados. Integra condiciones de marea, efectos de recarga y fuga, y permite simular procesos de mezcla entre agua dulce y salada. Su uso se orienta a la gestión sostenible de zonas costeras, la evaluación de impacto ambiental y la planificación de medidas de protección frente a la contaminación subterránea. (Ataie-Ashtiani 2017)

8. En la investigación hecha por Muhammetoglu et al. (2017) desarrollan un modelo híbrido para poder predecir la dilución de las aguas residuales y la concentración de bacterias indicadoras, como lo son coliformes totales y fecales, en un emisario submarino profundo ubicado en Antalya, Turquía. así pues, utilizando el modelo Visual Plumes-UM3 para el campo cercano, y el modelo de dispersión de Brooks, el cual es un modelo matemático que es utilizado para simular la dispersión de contaminantes en campos lejanos de emisarios submarinos, se basa en la ecuación de difusión- advección, para poder predecir cómo se diluyen y transportan las partículas o contaminantes, considerando las corrientes marinas, la geometría del emisario y la difusión turbulenta.

El estudio compara las predicciones del modelo con las mediciones de campo, encontrando una alta concordancia, con las métricas de desempeño que reporta coeficiente de determinación (R^2) superior a 0.85 y un error cuadrático medio (RMSE) menor al 15%, lo que confirma la confiabilidad del modelo. Durante el verano, el penacho permanece sumergido debido a la fuerte estratificación, mientras que en el invierno puede alcanzar la superficie, generando potenciales riesgos de contaminación en zonas recreativas. Además de esto, se incorporan herramientas de sistema de información geográfica (SIG) y geo-estadísticas en 2D, que permiten mapear la dispersión de coliformes y evaluar espacialmente la calidad del agua. En la evaluación de la calidad

del agua se consideraron parámetros clave como coliformes totales, coliformes fecales, turbidez, oxígeno disuelto, salinidad y temperatura, los cuales permiten establecer los niveles de riesgo para actividades recreativas. (Muhammetoglu et al. 2017)

La siguiente tabla, presenta un comparativo de los modelos utilizados en los estudios revisados en este trabajo, el objetivo es facilitar la selección del modelo más adecuado para cada contexto de aplicación, esto permite que el ingeniero pueda evaluar de forma técnica las herramientas disponibles y escoger aquella que mejor represente el comportamiento del sistema que se quiere estudiar.

Tabla 1 Comparación de Modelos para la Modelación de Ambiental de Vertimientos en cuerpos de agua Marinos

Modelo	Tipo De Modelo	Tipo De Sistema	Facilidad de uso	Licencia	Información Requerida	Ecuaciones de Gobierno	Limitantes	Espacial	Casos de aplicación
AEM3D	Hidrodinámico 3D + Calidad del agua	Costero, estuarios, emisarios	Intermedia	Requiere licencia	Batimetría, forzantes climáticos, descargas	Navier-Stokes+ transporte de reactivo	Alta demanda computacional	3D	Calidad de agua, eutrofización, dispersión de contaminantes
CORMIX	Dispersión de plumas	Costero	Alta	Licencia comercial	Velocidad, temperatura, Salinidad, flujo	Ecuaciones de chorro turbulento	No modela procesos a gran escala	2D/local	Diseño de emisarios, dilución inicial, permiso de vertimientos
Delft3D	Hidrodinámico 3d + transporte	Costero, estuario y ríos	Media	Gratuito	Batimetría, mareas, viento, corrientes	Navier-Stokes+ transporte de solutos	Requiere de experiencia y calibración	2D/3D	Dispersión de contaminantes, erosión, calidad del agua

ECOM	Hidrodinámico 3D+ Transporte	Estuarios y Zonas costeras	Intermedia	Requiere licencia	Batimetría, viento, salinidad, corrientes	Navier-stokes + advección - dispersión	No incluye procesos biogeoquímicos	3D	Dispersión de contaminantes, estuarios estratificados
FVCOM	Hidrodinámico 3D basado en mallas no estructuradas	Costero y oceánico	Complejo	Gratuito	Batimetría, viento, salinidad. corrientes	Navier-stokes + ecuaciones de malla	Requiere mucho procesamiento	3D	Bahías complejas, estuarios, dispersión de contaminantes
MIKE3	Hidrodinámico 3D + Calidad del agua	Costero, estuarios y océanos	Intermedia	Requiere licencia	Batimetría viento, descargas, corrientes	Navier- Stokes+ transporte- reactivo	Alto costo y curva de aprendizaje	3D	Calidad de agua, dispersión de contaminantes, mareas
MODSharp	Flujo subterráneo estratificado + mezcla agua dulce-salada	Zonas costeras- Acuíferos	Complejo	Gratuito	Conductividad hidráulica, niveles freáticos, mareas	Diferencias finitas + transporte	Validación limitada en campo	2D/3D	Intrusión salina, migración de contaminantes subterráneos
OpenFOAM	CFD hidrodinámico numérico	Costero y oceánico	Complejo	Gratuito	Mallas, condiciones iniciales y de frontera	Navier-stokes + turbulencia LES/RANS	Requiere alta capacidad de computo	3D	Estudios detallados de dinámica local y dispersión
UM3(visual plumes)	Dispersión +Dilución inicial	Campo cercano	Media	Gratuito EPA	Salinidad, temperatura, caudal, emisario	Balance de momento masa y energía	No simula campo lejano	2D	Dispersión de plumas, predicción de coliformes
VISJET	Dispersión de plumas	Costero/Mar adentro	Media	Licencia comercial	Caudal, salinidad, profundidad, Angulo de difusor	Ecuaciones de chorro sumergido	Menos flexible ante múltiples chorros	2D	Diseño de jets, difusión inicial de emisiones puntuales

Visual plumes	Dispersión + dilución inicial	Campo cercano	Alta	Gratuito	Salinidad, temperatura, caudal, emisario	Balance de Momento, masa y energía	Limitado a near-field	2D	Dilución inicial, dispersión de contaminantes en campo cercano
------------------	----------------------------------	------------------	------	----------	---	---	--------------------------	----	---

Fuentes propia

CONCLUSIONES

La modelación ambiental del vertimiento es una herramienta predictiva fundamental para comprender y gestionar los impactos de los vertimientos en cuerpos de agua marinos. Los estudios analizados demuestran que modelos numéricos, hidrodinámicos y de calidad, como AEM3D, FVCOM, ROMS, MIKE3 y Visual Plumes, son capaces de simular con precisión las condiciones estacionales, mareas, corrientes y la dispersión de componentes químicos y biológicos. Esta capacidad predictiva es crucial para la evaluación de riesgos ambientales y el diseño de infraestructuras de descarga. La integración de datos de campo para la calibración y validación de estas simulaciones es un paso crítico que asegura la fiabilidad de los resultados, permitiendo una representación efectiva de los procesos hidrodinámicos y biogeoquímicos complejos en bahías y zonas costeras.

Los modelos ambientales desempeñan un papel importante en el cuidado de los ecosistemas y las comunidades costeras al permitir la identificación de zonas vulnerables y la implementación de estrategias de mitigación. Al predecir la dispersión de contaminantes como coliformes fecales y micro plásticos, la modelación ayuda a prevenir la contaminación y proteger la salud pública, identificando áreas de riesgo sanitario y guiando mejoras en el tratamiento de aguas residuales. Además, la capacidad de los modelos para evaluar la acumulación de contaminantes en los sedimentos, como metales pesados y nutrientes, es crucial para salvaguardar la biodiversidad marina, incluyendo ecosistemas sensibles como pastos marinos y arrecifes de coral. Finalmente, al abordar vertimientos difusos como la intrusión salina y la migración de contaminantes subterráneos, los modelos contribuyen a una gestión más integral y sostenible de los recursos hídricos, protegiendo tanto la calidad del agua costera como las fuentes de agua dulce para las comunidades.



La efectividad de la modelación ambiental puede optimizarse, ya que la precisión de los modelos depende de la calidad y disponibilidad de datos de entrada, como caudales, temperatura, concentración de contaminantes. La complejidad de algunos modelos 3D y la necesidad de licencias para el uso de software específico pueden representar desafíos. Sin embargo, estas limitaciones ofrecen oportunidades para fortalecer la recolección de datos ambientales de alta calidad, establecer criterios técnicos estandarizados para la selección y aplicación de modelos, y promover la investigación y adaptación local. Esto es especialmente relevante en áreas geográficas específicas, como la isla de San Andrés donde es crucial adaptar los modelos a las dinámicas locales

RECOMENDACIONES

Se recomienda integrar la modelación ambiental como herramienta clave para la planificación y evaluación de vertimientos en cuerpo marinos, ya que la modelación permite simular el comportamiento hidrodinámico y fisicoquímico de los sistemas acuáticos, lo que facilita la identificación de zonas con mayor vulnerabilidad, la predicción del transporte de contaminantes y la evaluación de escenarios de riesgo. Su aplicación contribuye significativamente en la toma de decisiones basados en evidencia científica y técnica

Se recomienda fortalecer la recolección, disponibilidad y sistematización de datos ambientales para alimentar los modelos de simulación, la efectividad de estos modelos depende de la calidad y precisión de los datos de entrada, como los caudales, temperatura, concentración de contaminantes y los parámetros a usar. Contar con información confiable y actualizada es importante para garantizar resultados representativos y funcionales para la gestión ambiental.

Se recomienda que, como ingenieras ambientales, se priorice un enfoque equilibrado que contemple la precisión, aplicabilidad y practicidad en la selección de herramientas de modelación. Es fundamental elegir modelos que permitan predecir con confianza la dispersión de contaminantes y evaluar los impactos ambientales bajo condiciones reales del sistema costero o marino en estudio. Los artículos revisados y la tabla comparativa evidencian que diferentes modelos desempeñan roles cruciales en la predicción, evaluación y gestión de los vertimientos en el mar. Por lo tanto, la elección del modelo debe basarse en el alcance del estudio, la disponibilidad

de datos y los recursos computacionales, asegurando así que se utilicen las herramientas más adecuadas para cada contexto específico.

Desde el contexto local, se recomienda para futuras investigaciones, la actualización y profundización de la modelación ambiental del vertimiento realizado mediante el emisario submarino en lugares del caribe y específico en la isla de San Andrés, ya que en la revisión bibliográfica no se obtuvieron resultados de este, actualmente existe un documento técnico elaborado por la empresa Violía, sin embargo, se considera que de ser contrastado, ampliado y validado mediante modelos más actuales, y que se considere la dinámica mareo gráfica, la biodiversidad de la isla, actividad económica y los riesgos sociales asociados.

REFERENCIAS BIBLOGRÁFICAS

1. Al Mamoon, A., Al-Sulaiti, H., Al-Kuwari, H., & Khairy, H. (2020). Stormwater disposal through marine outfalls in the Bay of Doha, Qatar: Environmental risk assessment using numerical modeling. *Science of The Total Environment*, 732, 139305. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139305>
2. Alvir, M., Ciglenečki, I., Jukić, A., Ljubić, I., & Pušić, T. (2022). One-way nested OpenFOAM–ROMS model for coastal flow and outfall evaluation. *Ocean Engineering*, 264, 112535. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112535>
3. Arroyave Gómez, D. M., Restrepo, J. D., Rendón, A. R., & Toro Botero, Á. F. (2021). Modelado biogeoquímico de una zona costera tropical con surgencia estacional e impactada por un emisario submarino sin tratamiento. *Boletín de Contaminación Marina*, 172, 112771. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112771>
4. Ataie-Ashtiani, B. (2007). MODSharp: Regional-scale numerical model for quantifying groundwater flux and contaminant discharge into the coastal zone. *Environmental Modelling & Software*, 22(9), 1307–1315. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.07.005>
5. Aquatic Ecosystem Model 3D. (s. f.). https://www.hydronumerics.com.au/software/aquatic-ecosystem-model-3d?utm_source

6. Bear, J., Cheng, A. H. D., Sorek, S., Ouazar, D., & Herrera, I. (1999). *Seawater intrusion in coastal aquifers: Concepts, methods, and practices*. Springer.
7. Birocchi, P., Calijuri, M. C., & Garcia, R. (2021). Study of three columns of submarine outfalls of domestic wastewater using numerical modeling in the São Sebastião Channel, São Paulo State, Brazil. *Regional Studies in Marine Science*, 42, 101647. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101647>
8. Boehm, A. B., Paytan, A., Shellenbarger, G. G., & Davis, K. A. (2002). Oceanographic controls on the distribution of sewage-derived microorganisms in the coastal waters of southern California. *Environmental Science & Technology*, 36(24), 5163–5169.
9. Capone, D. G., & Hutchins, D. A. (2013). Microbial biogeochemistry of coastal upwelling regimes in a changing ocean. *Nature Geoscience*, 6(10), 711–717. <https://doi.org/10.1038/ngeo1916>
10. Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), 559–568.
11. Chen, Y., Xiao, S., & Li, D. (2020). Flashover discharge model of transmission lines in subsea observation network. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 103, 102094. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102094>
12. Dallimore, C. J., & McAllister, F. A. (2022). Multi-year three-dimensional simulation of seasonal variation in water quality in a shallow, eutrophic lake using the AEM3D model. *Science of the Total Environment*, 803, 149902. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149902>
13. Deltares. (2023). *Delft3D Flexible Mesh Suite: Integrated water modelling*. <https://www.deltares.nl/en/software/delft3d-flexible-mesh-suite>
14. Deltares. (2022). *Delft3D-FLOW User Manual*. Deltares Systems. <https://oss.deltares.nl/web/delft3d>

15. De Capital Humano - Secretaría de Educación - Subsecretaría de Políticas Universitarias, A. I.-M. (s. f.). *Invertebrados bentónicos como indicadores ambientales*. Argentina Investiga.
[https://argentinainvestiga.edu.ar/noticia.php?titulo=invertebrados bentnicos como indicadores ambientales&id=2912](https://argentinainvestiga.edu.ar/noticia.php?titulo=invertebrados_bentnicos_como_indicadores_ambientales&id=2912)
16. EPA. (2024). *Visual Plumes: A software tool for modeling the dispersion of thermal discharges into water bodies*. <https://www.epa.gov/ceam/visual-plumes>
17. FLOW-3D. (2022, enero 3). *Particle Model | FLOW-3D | CFD Software | Lagrangian Particles*. <https://www.flow3d.com/modeling-capabilities/particle-model/>
18. Flow Science Inc. (2023). *FLOW-3D User Manual*. Flow Science, Inc.
<https://www.flow3d.com>
19. Gao, G., Chen, C., & Beardsley, R. (2002). *FVCOM User Manual: Finite Volume Coastal Ocean Model*. University of Massachusetts Dartmouth. <https://fvcom.smast.umassd.edu>
20. Gasperi, J., Garnaud, S., Rocher, V., & Moilleron, R. (2010). Priority pollutants in wastewater and combined sewer overflow. *Science of the Total Environment*, 408(13), 2803–2812. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.02.038>
21. García, J. (2013). Impacto de los vertimientos en la calidad del agua en la costa colombiana. *Revista de Ciencias Ambientales*, 5(2), 45–60.
22. Grant, S. B., Sanders, B. F., & Boehm, A. B. (2001). Generation of Enterococci bacteria in a coastal urban watershed and its transport to the ocean. *Environmental Science & Technology*, 35(12), 2401–2409.
23. Hipsey, M. R., Antenucci, J. P., & Brookes, J. D. (2012). A generic, process-based model of microbial pollution in aquatic systems. *Environmental Modelling & Software*, 27–28, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.012>

24. Hodges, B. R. (2000). Pressure gradient errors and the hydrostatic assumption in the terrain-following coordinate ocean models. *Ocean Modelling*, 3(1–2), 73–94. [https://doi.org/10.1016/S1463-5003\(00\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S1463-5003(00)00011-3)
25. IDEAM. (2023). *Modelación ambiental y gestión sostenible de los recursos naturales*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <https://www.ideam.gov.co>
26. Imbs, D., & Imbs, D. (2024, junio 30). ¿Sabes qué es el biofouling? IMBS. International Maritime Business School. <https://www.imbs.edu.es/sabes-que-es-el-biofouling/>
27. Kim, B.-K., Hwang, J. H., & Kim, S.-K. (2023). Modelling microplastics discharged from a wastewater treatment plant into Marian Cove, West Antarctica. *Marine Pollution Bulletin*, 186, 114441. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114441>
28. Lamparelli, C. C., et al. (2016). State of the art of domestic sewage outfalls in the São Paulo State coast, Brazil. *Brazilian Journal of Water Resources*, 21(3), 572–584. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011615048>
29. Lynch, D. R., Horne, J. K., & Houghton, R. W. (2010). *Modeling the ocean: A guide to the use of numerical models in oceanography*. Cambridge University Press.
30. Maric, T., Marschall, H., & Bothe, D. (2013). voFoam - A geometrical Volume of Fluid algorithm on arbitrary unstructured meshes with local dynamic adaptive mesh refinement using OpenFOAM. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1305.3417>
31. Mengying, S., Jingen, D., Chengyun, M., Bin, L., & Tie, G. (2023). Optimization of cuttings slurry system for re-injection of oil-based drilling cuttings. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*.
32. Micella, I., Kroeze, C., Bak, M. P., & Stokal, M. (2024). Causes of coastal waters pollution with nutrients, chemicals and plastics worldwide. *Marine Pollution Bulletin*, 198, 115902. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115902>

33. MIKE 3 Flow Model. (s. f.). https://doc.mikepoweredbydhi.help/webhelp/2017/M3Nested/M3Nested/Cover/MIKE_3_Flow_Model.htm?utm_source
34. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). *Informe sobre el estado de las aguas en Colombia*. [URL del documento]
35. Munar-Samboní, A. M., Méndez-Pedroza, N. M., & Valbuena-Calderón, O. E. (2021). Modelación hidrodinámica y de calidad del agua en un ecosistema estuarino urbano con incidencia maregráfica y vertimientos de aguas residuales. *Entramado*, 17(1), 302–320. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.7285>
36. Muhammetoglu, A., Yalcin, O. B., & Ozcan, T. (2012). Prediction of wastewater dilution and indicator bacteria concentrations for marine outfall systems. *Marine Environmental Research*, 78, 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2012.04.005>
37. Palomar, P., Lara, J. L., Losada, I. J., Rodrigo, M., & Álvarez, A. (2012). Modelado de descarga de salmuera en campo cercano, parte 1: Análisis de herramientas comerciales. *Desalinización*, 290, 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.11.037>
38. Poncet, D. (2023). *MIKE 3 Wave FM: A next-generation application to accurately simulate wave agitation in ports and terminals*. DHI Group. <https://www.dhigroup.com/technologies/mikepoweredbydhi/mike-3-wave-fm>
39. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). (2016). *Aguas residuales: un desafío global*. [URL del documento]
40. Roberts, P. J. W. (1980). Ocean outfall design and simulation. *Water Pollution Control Federation*, 52(9), 2483–2495.
41. Shives, M. (2016). I need to summarize available coastal modeling codes like FVCOM, ROMS, MIKE21, MIKE3, Delft3D and maybe others. Please share your experiences? *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/post/I-need-to-summarize-available-coastal-modeling-codes-like-FVCOM-ROMS-MIKE21-MIKE3-Delft3D-and-maybe-others-Please-share-your-experiences>

42. Teodoro, A. C., & Gonçalves, J. A. (2010). Emisarios submarinos: evaluación de la eficiencia e impactos ambientales. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, 15(2), 199–208. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522010000200012>
43. Totic, M., Martins, F., Lonin, S., Izquierdo, A., & Restrepo, J. D. (2019). Hydrodynamic modelling of a polluted tropical bay: Assessment of anthropogenic impacts on freshwater runoff and estuarine water renewal. *Journal of Environmental Management*, 236, 695–714. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.104>
44. UNESCO. (2018). *El estado de los recursos hídricos en el mundo*. [URL del documento]
45. Van Sebille, E., Wilcox, C., Lebreton, L., Maximenko, N., Hardesty, B. D., Van Franeker, J. A., ... & Law, K. L. (2015). A global inventory of small floating plastic debris. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124006>
46. VOSviewer - Visualizing scientific landscapes. (2022). VOSviewer. <https://www.vosviewer.com/>
47. Wang, Y., Fang, Z., & Li, J. (2024). Development of generalized terrain-following FVCOM model for the simulation of hydrodynamic processes in complex coastal regions. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1441840. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1441840>
48. Yang, B., Yin, K., Li, X., & Liu, Z. (2022). Graph model under grey and unknown preferences for resolving conflicts on discharging Fukushima nuclear wastewater into the ocean. *Journal of Cleaner Production*, 332, 130019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130019>
49. Zhang, Y., & Liu, Y. (2024). Development of an OpenFOAM solver for coupled aero-hydrodynamic simulations of floating offshore wind turbines and aquaculture cages. *Computers & Fluids*, 252, 104753. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2025.104753>
50. Zamani, B., & Koch, M. (2020). Comparison between two hydrodynamic models in simulating physical processes of a reservoir with complex morphology: Maroon Reservoir. *Water*, 12(3), 814. <https://doi.org/10.3390/w12030814>