

ARTÍCULO CORTO

Factores oceanográficos como moduladores de la biodiversidad en el sistema de surgencia de La Guajira: una revisión sistemática*Oceanographic factors as modulators of biodiversity in the La Guajira upwelling system: a systematic review*DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.621> Fecha de recepción: 2023-09-18 / Fecha de aceptación: 2023-11-10Aura María Rodríguez Burgos¹, Francisco Briceño Zuluaga²

CITAR COMO:

Rodríguez Burgos, A.M.; Briceño Zuluaga, F. (2023). Factores oceanográficos como moduladores de la biodiversidad en el sistema de surgencia de La Guajira: una revisión sistemática. *Bol. Cient. CIOH*, 42(2): 59-70. ISSN en línea 2215-9045. DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.621>

RESUMEN

En la zona norte de Colombia se encuentra el departamento de La Guajira, un área marinocostera influenciada por diferentes procesos oceanográficos y atmosféricos que le atribuyen características únicas. Diversas investigaciones se han centrado en describir el comportamiento oceanográfico de La Guajira, en la cual las variables ambientales responden de manera distinta de acuerdo con la época climática; sin embargo, son pocos los trabajos que contrastan los procesos oceanográficos del área de interés con la biodiversidad. La presente revisión sistemática tuvo como objetivo determinar los principales factores ambientales que modulan la oceanografía de La Guajira, y establecer si los autores los vinculan con aspectos de biodiversidad. Para lograrlo se realizó una búsqueda de artículos científicos relacionados con temas de climatología y oceanografía de La Guajira, para lo cual fueron consultadas tres bases de datos mundialmente reconocidas: Scopus, Science Direct, y Web of Science. Finalmente, se concluyó que, a pesar de que varias investigaciones han analizado el comportamiento del mar Caribe y la manera en la que su temperatura, salinidad y clorofila varían a diferentes escalas, pocas investigaciones se han enfocado en relacionar estas características con la biodiversidad de la zona; un aspecto clave para tener en cuenta si se considera que las especies y los ecosistemas responden a la manera en la que se comporta el clima y el océano.

PALABRAS CLAVE: La Guajira, surgencia, oceanografía, biodiversidad.

ABSTRACT

In the northern part of Colombia is the department of La Guajira, a marine-coastal area influenced by different oceanographic and atmospheric processes that give it unique characteristics. Various investigations have focused on describing the oceanography of La Guajira, in which the environmental variables respond differently according to the climatic season; however, there are few works that contrast the oceanographic processes of the area of interest with the biodiversity. The objective of this systematic review was to determine the main environmental factors that modulate the oceanography of La Guajira and to establish whether the authors link them with aspects of biodiversity. To achieve this, a search was carried out for scientific articles related to the climatology and oceanography of La

¹ Orcid: 0000-0002-9104-4417. Universidad Militar Nueva Granada – Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas y JEAI-IRD-UMNG: CHARISMA, Colombia. Correo electrónico: est.aura.rodriguez@unimilitar.edu.co

² Orcid: 0000-0002-2696-0996. Universidad Militar Nueva Granada - Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas y JEAI-IRD-UMNG: CHARISMA, Colombia. Correo electrónico: francisco.briceno@unimilitar.edu.co

Guajira, for which three world-renowned databases were consulted: Scopus, ScienceDirect, and Web of Science. Finally, it was concluded that, although several investigations have analyzed the behavior of the Caribbean Sea and the way in which its temperature, salinity and chlorophyll vary at different scales, few investigations have focused on relating these characteristics with the biodiversity of the zone; a key aspect to take into account if we think that species and ecosystems respond to the way the climate and the ocean behave.

KEYWORDS: *La Guajira, upwelling, oceanography, biodiversity.*

INTRODUCCIÓN

La Guajira es una península ubicada al norte de Colombia (Fig. 1), caracterizada por ser un área de ecosistemas desértico y xerofítico, que además está altamente influenciada por el sistema de surgencia del Caribe, el cual a su vez es impulsado por los vientos Alisios del noreste (Martínez, Goddard, Kushnir y Ting 2019) y el chorro de bajo nivel del Caribe (CLLJ, por sus siglas en inglés) (Muñoz, Busalacchi, Nigam y Ruiz-Barradas, 2008; Wang, 2007; Andrade y Barton, 2005).

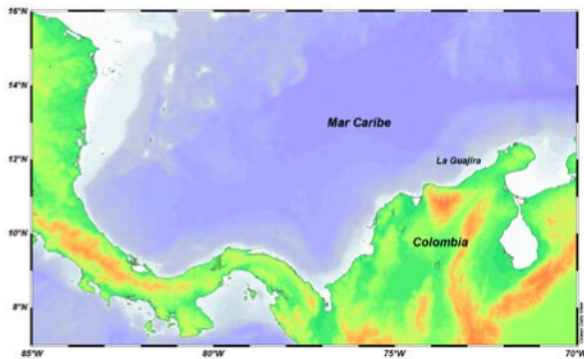


Figura 1. Departamento de La Guajira y su área marina adyacente.

Adicionalmente, está influenciada por el movimiento de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), responsable de las precipitaciones en el área, las cuales oscilan entre 218 mm y 532 mm (Toro-Tobón, Alvarez-Flórez, Mariño-Blanco y Melgarejo, 2022). La temperatura superficial del mar (TSM) oscila entre 20 °C y 30 °C, con un promedio de 25 °C (Rueda-Roa y Muller-Karger, 2013, Chollet *et al.* 2012). Estos atributos permiten que haya un afloramiento de materia orgánica que atrae una diversidad de especies como peces, reptiles

marinos y tiburones (Andrade y Barton, 2005; Vásquez y Sullivan, 2021).

En esta zona son pocos los estudios realizados que aborden temas de biodiversidad marina y/o su relación con la climatología u oceanografía, entre los cuales se destacan Muller-Karger (2023), Ayala, Gutiérrez y Montoya (2022), Dorado-Roncancio, Medellín-Mora, Mancera-Pineda y Pizarro-Koch (2022), Invemar (Eds. 2010), Páramo *et al.*, (2003); Bernal *et al.*, (2016), debido a que es un área en la cual se abordan principalmente aspectos sociales, culturales y económicos (Bonet-Morón y Hahn-De-Castro, 2017; Colorado y Moreno, 2017).

En este sentido, se considera pertinente discutir no solo los temas sociales, sino también abordar temas climatológicos y oceanográficos de la zona, ya que su variación en el tiempo podría poner en riesgo a las poblaciones indígenas y la biodiversidad asociada (Vásquez y Sullivan, 2021). Por tal motivo, el presente trabajo tuvo como objetivo identificar las tendencias en investigación en el área marítima de La Guajira a partir de un análisis bibliométrico, y con base en este determinar los principales factores ambientales que modulan la oceanografía de La Guajira, y establecer si los autores lo vinculan o no con aspectos de biodiversidad.

ÁREA DE ESTUDIO

La región de La Guajira, en términos oceanográficos y ecológicos se caracteriza por la presencia de un sistema de surgencia estacional de baja productividad (Gómez y Acero, 2020); por consiguiente, existe una alta variabilidad en términos de estructura oceanográfica y atmosférica. Empleando reflectancias satelitales y funciones empíricas ortogonales estandarizadas, Bastidas-Salamanca, Ricaurte, Santamaría

del Ángel, Ordóñez, Murcia y Romero (2017) identificaron 9 regiones oceanográficas en el Caribe colombiano de alta variabilidad en el ciclo anual, una de las cuales fue denominada Sistema de La Guajira, descrita por Murcia, Ricaurte, Ordóñez y Bastidas-Salamanca (2017) como una zona de alto dinamismo oceanográfico, en la cual el principal mecanismo de fertilización lo constituye la advección, más que el transporte de Ekman, y que varía dependiendo de la época dominante; bien sea a través de remolinos de mesoescala desde el este, que están transportando nutrientes desde el golfo de Venezuela, o bien desde el oeste por las descargas continentales del río Magdalena llevadas a través de la contracorriente del Caribe.

El área es habitada por diferentes grupos indígenas Wayúu, Koguis y Arzarios, reconocidos por su cultura y tradición; alcanzando una población superior al 1000 000 de habitantes, según la Cámara de Comercio de La Guajira (2017).

Su economía se concentra en la extracción minera de sal, gas y carbón; en la agricultura a través de siembra de ajonjolí, arroz, sorgo, algodón, yuca, caña de azúcar y tabaco, además de algunas actividades turísticas. Sin embargo, es el tercer departamento más pobre de Colombia, seguido de Chocó y Vichada (Otero-Cortés, 2013).

METODOLOGÍA

Se realizó una búsqueda de artículos científicos conexos con temas de climatología y oceanografía de La Guajira, Colombia. La búsqueda se realizó usando tres bases de datos disponibles en la Universidad Militar Nueva Granada: Scopus, Science Direct, Web of Science (WoS). La información se obtuvo bajo un criterio de búsqueda de artículos publicados en los últimos 20 años (2003 al 2021) relacionados con la biodiversidad, ecología, oceanografía y climatología de la zona (Fig. 2).

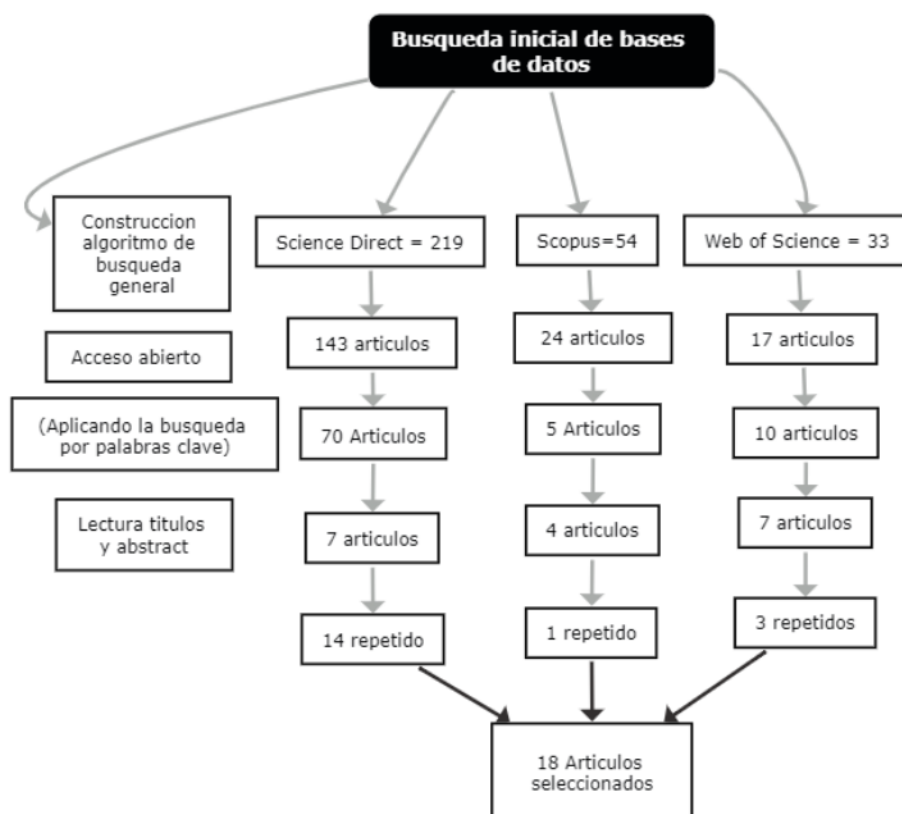


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de filtrado que se aplicó a los documentos encontrados en las bases de datos previa revisión sistemática.

La búsqueda en las bases de datos se realizó siguiendo el siguiente algoritmo de búsqueda: Caribbean Sea OR Guajira AND oceanographic, Guajira AND upwelling, Guajira AND Caribbean Jet, Guajira AND Climatology. La selección de los documentos se fundó en aquellos que cumplieran estrictamente con el algoritmo de búsqueda, que estuvieran en inglés y español. Los documentos repetidos en cada base de datos no fueron tenidos en cuenta y, posteriormente, se creó una matriz con los artículos seleccionados que permitió realizar la comparación entre los años de publicación, las bases de datos y los temas abordados. Adicionalmente, se realizó un análisis bibliométrico de los artículos seleccionados en la base de datos Scopus empleando el software VOSviewer, de acceso libre para analizar y visualizar la literatura científica a través de redes bibliométricas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis bibliométrico

La búsqueda sistemática arrojó un total de 306 publicaciones relacionadas con procesos climatológicos y oceanográficos del Caribe colombiano y La Guajira. Al realizar el proceso de filtración, según los criterios de selección, se obtuvieron un total de 85 publicaciones disponibles en las tres bases de datos seleccionadas. Finalmente, se revisaron detenidamente estas publicaciones, evaluando si estaban o no relacionadas y eran relevantes con el objetivo de este trabajo, seleccionando así un total de 18 publicaciones (Tabla 1).

Tabla 1. Artículos seleccionados después del proceso de filtración.

Autor	Año	Nombre de la publicación	Base de datos
Alonso del Rosario, J. Vidal, J.; Blázquez, E.	2021	The Upwelling of the Colombian Caribbean Coasts: Remote Sensing, Morphology, and Influence on the Lake Maracaibo	Scopus
Torregroza-Espinosa, A. Restrepo, J.; Escobar, J. Pierini, J.; Newton, A.	2021	Spatial and temporal variability of temperature, salinity and chlorophyll-a in the Magdalena River mouth, Caribbean Sea	Science Direct
Orfila, A.; Urbano, C.; Sayol, J.; González-Montes, S. Cáceres-Euse, A.; Hernández, I.; Muñoz, A.	2021	On the Impact of the Caribbean Counter Current in the Guajira Upwelling System	WoS
Correa-Ramírez, M.; Rodríguez, A.; Ricaurte-Villota, C. Paramo, J.	2020	The Southern Caribbean upwelling system off Colombia: Water masses and mixing processes	Scopus
Alonso del Rosario, J; Vidal, L.; Blázquez, E.	2019	On the prediction of upwelling events at the colombian caribbean coasts from modis-SST imagery	Scopus
Montoya-Sanchez, R.; Devis-Morales, A.; Bernal, G.; Poveda, G.	2018	Seasonal and intraseasonal variability of active and quiescent upwelling events in the Guajira system, southern Caribbean Sea	Science Direct
Beier, E.; Bernal, G.; Ruiz-Ochoa, M.; Barton, E.	2017	Freshwater exchanges and surface salinity in the Colombian basin, Caribbean Sea	WoS
Bastidas-Salamanca, M.; Ordóñez-Zúñiga, A.; Ricaurte-Villota, C.	2016	Events of wind intensification and relaxation in the Bay of Santa Marta (Colombian Caribbean): Oceanographic implications	Scopus
Santos, F.; Gómez, M.; Varela, R.; Ruiz-Ochoa, M.; Días, J.	2016	Influence of upwelling on SST trends in La Guajira system	WoS

Autor	Año	Nombre de la publicación	Base de datos
Bernal, G.; Osorio, A.; Urrego, L.; Peláez, D.; Molina, E.; Zea, S.; Montoya, R.; Villegas, N.	2016	Occurrence of energetic extreme oceanic events in the Colombian Caribbean coasts and some approaches to assess their impact on ecosystems	Science Direct
Alonso del Rosario, J. Blázquez, E.; Isaza-Toro, E.; Vidal, J.	2015	Internal structure of the upwelling events at Punta Gallinas (Colombian Caribbean) from modis-sst imagery	Science Direct
Sarmiento-Devia, R.; Vásquez, Á.; Mejías, M. Dávila, P.; Franco-Herrera, A.	2014	Variabilidad intra-anual del régimen climático en sectores de surgencia en el sudeste del Mar Caribe, usando ERA Interim.	WoS
Jouanno, J.; Sheinbaum, J.	2013	Heat Balance and Eddies in the Caribbean Upwelling System	WoS
Ruiz-Ochoa, M.; Beier, E.; Bernal, G.; Barton, E.	2012	Sea surface temperature variability in the Colombian Basin, Caribbean Sea	Science Direct
Lonin, S.; Hernández, J. Palacios, D.	2010	Atmospheric events disrupting coastal upwelling in the southwestern Caribbean	WoS
Arévalo-Martínez, D. Franco-Herrera, A.	2008	Características oceanográficas de la surgencia frente a la ensenada de Gaira, departamento de Magdalena, época seca menor de 2006	Science Direct
Andrade, C.; Barton, E.	2005	The Guajira upwelling system	Science Direct
Páramo, J.; Quiñones, R.; Ramírez, A.; Wiff, R.	2003	Relationship between abundance of small pelagic fishes and environmental factors in the Colombian Caribbean Sea: an analysis based on hydroacoustic information	WoS

Para la búsqueda realizada en la base de datos Scopus, el análisis bibliométrico incluyó la representación de la coocurrencia de palabras clave en el programa VOSviewer (Fig. 3).

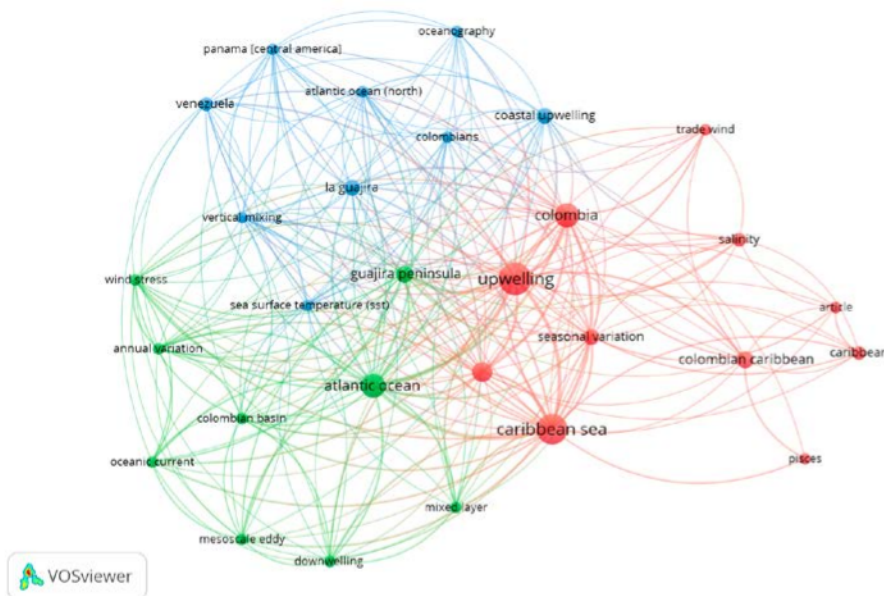


Figura 3. Análisis bibliométrico por coocurrencia de palabras clave para los resultados Scopus.

En esta gráfica los nodos (círculos de colores) representan la característica seleccionada (palabras clave). La ubicación y el tamaño de los nodos tienen significado; por ejemplo, un nodo con mayor tamaño representa mayor presencia de dicha palabra clave, indicando que se han investigado mucho más que las otras entre los artículos encontrados en la base de datos. Para el caso particular de esta búsqueda, los nodos de mayor tamaño corresponden con "upwelling", "Caribbean Sea" y "Colombia", los cuales hacen referencia al área de estudio.

Adicionalmente, se identifican tres colores en la figura (verde, azul y rojo). Esta agrupación por color se denomina clúster y corresponde al conjunto de nodos que se han investigado de manera común, lo que representa grandes temáticas agrupadas que pueden ser estudiadas de manera simultánea. Para el caso de la base de datos Scopus evaluada y, excluyendo las palabras asociadas con áreas geográficas, el clúster azul engloba las temáticas de afloramiento costero, mezcla vertical y temperatura superficial del mar; el verde incluye estrés del viento, variación anual, circulación (eddies y corrientes) y capa de mezcla, y el rojo, incluye vientos, salinidad, estacionalidad y peces. A partir de este análisis gráfico es posible identificar el predominio de estudios en temas físicos, asociados con oceanografía y meteorología, y pocos o casi nulos, los asociados con aspectos biológicos, lo que representa un primer indicio de oportunidad de investigación.

Es importante tener presente que la base de datos Scopus incluye artículos científicos publicados en revistas indexadas y no incluye literatura gris (informes, tesis, libros, memorias de eventos), la cual, eventualmente, puede contener investigaciones que aporten al conocimiento oceanográfico, climático y de biodiversidad que se escapan del presente análisis.

FACTORES OCEANOGRÁFICOS MODULADORES DE LA BIODIVERSIDAD

Proceso de surgencia de La Guajira

El proceso de surgencia es un fenómeno oceanográfico donde la interacción de vientos costeros y corrientes provocan el ascenso de aguas profundas y, de esta manera, nutrientes del fondo del mar, los cuales son impulsados

hasta la zona superficial, donde son aprovechados por organismos fotosintéticos. Por lo tanto, este proceso de afloramiento de productividad favorece a diferentes especies pelágicas (Andrade y Barton, 2005). Este proceso ocurre generalmente en los bordes oeste de los continentes, sin embargo, existen ciertas zonas con condiciones específicas que permiten este fenómeno (Albuquerque *et al.*, 2014).

Además de la importancia asociada al mantenimiento de la red trófica oceánica y por tanto al establecimiento de zonas de alta biodiversidad (Arévalo-Martínez y Franco-Herrera, 2008); a grande escala pueden incluso llegar a regular el balance térmico local, regional e incluso global (England *et al.*, 2014; Jouanno y Sheinbaum, 2013). En el caso de la surgencia de La Guajira, esta es impulsada por los vientos Alisios, el CLLJ y la corriente de Caribe (Alonso del Rosario *et al.*, 2019). El sistema de surgencia del Caribe ha sido estudiado en dos zonas principales: la cuenca occidental (La Guajira, Colombia) y la oriental (Cariaco, Venezuela). En ambas áreas el comportamiento oceanográfico es diferente y los valores de TSM y salinidad varían notoriamente (Montoya-Sánchez, Devis-Morales, Bernal y Poveda, 2018); asimismo, en las dos surgencias costeras la producción pesquera es muy desigual (Gómez y Acero, 2020).

Algunos autores consideran que, comparado con otros procesos de surgencia costeros, el de La Guajira es débil y con baja productividad debido a un proceso de mezcla que ocurre en el giro Panamá-Colombia (Correa-Ramírez *et al.*, 2020). Allí, la influencia de la desembocadura del río Magdalena provoca una dilución de las aguas dulces, ricas en nutrientes y sales en el mar Caribe, lo que induce una reducción en los valores de salinidad, así como la concentración de los nutrientes, lo que contribuye a la baja productividad de este sistema de surgencias (Beier *et al.*, 2017). No obstante, otro autor considera que el proceso de afloramiento es alto gracias a la desembocaduras del río Magdalena, Orinoco y la salida del lago de Maracaibo. Además, que se da un aporte eólico de polvo del desierto de La Guajira, que también nutre las aguas del Caribe (Andrade y Barton, 2005).

El afloramiento en La Guajira es fuerte durante los meses de diciembre a marzo y julio, debido

a que es temporada seca y la intensidad de los vientos es alta, mientras que en la temporada de lluvias de octubre a noviembre los vientos se debilitan, así como la surgencia (Andrade y Barton, 2005; Montoya-Sánchez *et al.*, 2018). Lo anterior concuerda con Alonso del Rosario *et al.*, (2019) y Alonso del Rosario *et al.*, (2015), quienes consideran que el afloramiento de la zona de surgencia es principalmente costero y no se evidencia en mar abierto, además, está fuertemente influenciado por la ZCIT. Cuando se encuentra al sur (diciembre hasta abril-mayo) los vientos Alisios predominan, se intensifica el CLLJ y también la surgencia. Por otro lado, se debilita alrededor de junio-agosto, cuando la ZCIT se encuentra hacia el norte y se presentan las temporadas de lluvias.

De este modo se determina que la zona del Caribe está fuertemente influenciada por los vientos Alisios que inducen el CLLJ, aunque durante todo el año se presentan dos episodios de surgencia en la península de La Guajira. El primero es el más fuerte y se presenta desde octubre-noviembre hasta marzo-abril. El segundo se presenta entre mayo a julio, cuando la ZCIT se encuentra en la zona norte y es mucho más débil (Alonso del Rosario *et al.*, 2021).

Temperatura

Ruiz-Ochoa *et al.*, (2012) encontraron que la influencia de la surgencia de La Guajira se observó en todo el periodo evaluado (1985-2009), pero fue más intenso entre diciembre y febrero. Durante este periodo la temperatura osciló entre 25.5 °C y 29.5 °C, y no hubo diferencia entre los años La Niña o El Niño. De igual forma, lo anterior concuerda con Lonin *et al.*, (2010), Bastidas-Salamanca *et al.*, (2016), Santos *et al.*, (2016), quienes encontraron que durante los tres primeros meses del año la TSM oscila entre 25 °C a 28 °C, asociada a proceso de surgencia; mientras que en la temporada de surgencia debilitada, la TSM se eleva sobre los 28 °C. Sin embargo, Alonso del Rosario *et al.*, (2019) encontraron valores diferentes, estos autores consideran que durante los procesos de surgencia la temperatura varía de 22 °C a 23 °C, y cuando la surgencia se debilita la temperatura oscila entre 28 °C a 29 °C. La anterior discrepancia puede asociarse a que los estudios se realizaron en diferentes años, en los

que además se presentaron fenómenos El Niño o La Niña, que hicieron que los valores medidos fueran diferentes.

Clorofila

Los valores de clorofila se suelen medir en el mar a través de imágenes satelitales provenientes de espectroradiómetros. La clorofila se asocia a una mayor productividad primaria, es decir, que en el medio hay más disponibilidad de nutrientes para ser usados por los primeros eslabones de la cadena trófica en el mar (Roberts *et al.*, 2017). Por ejemplo, Orfila *et al.*, (2021) encontró que entre junio y octubre, cuando el viento está debilitado, los valores de clorofila fueron cercanos a 3 mg·m⁻³; sin embargo, Arévalo-Martínez y Franco-Herrera (2008) hallaron durante la época seca, cuando los vientos son fuertes, las aguas de Caribe exhiben TSM entre 21 °C y 24 °C, con una salinidad entre 36.5 a 37.2 y valores de clorofila de 0.59 mg m⁻³. Por lo tanto, los meses de mayor productividad corresponden con la temporada de lluvias, entre junio y octubre. Por el contrario, cuando la ZCIT se ubica al norte, la concentración de clorofila disminuye durante los meses de abril y mayo (Orfila *et al.*, 2021).

El Caribe colombiano se encuentra influenciado por la descarga de ríos, lo cual ocasiona variaciones en los valores de salinidad, temperatura y clorofila. Torregroza-Espinosa *et al.*, (2021), encontraron que en la desembocadura del río Magdalena, la salinidad tiene valores cercanos a 28, la temperatura promedio es de 27.6 °C y los valores de clorofila de 1.5 mg m⁻³. Esto concuerda con los procesos de mezcla descritos por Correa-Ramírez *et al.*, (2020), los cuales ocasionan que las condiciones oceanográficas de esta área, con respecto a zonas donde no hay desembocadura, sean diferentes y afecten los procesos de surgencia.

Salinidad

En la zona del giro Panamá-Colombia, la dilución del agua dulce proveniente de los ríos y escorrentías se presenta durante todo el año y hace que los valores de salinidad disminuyan (Torregroza-Espinosa *et al.*, 2021). Mientras que al norte de La Guajira la salinidad aumenta de diciembre a mayo, debido a los procesos de surgencia, donde se pueden obtener valores

cercanos a 36.5 (Sarmiento-Devia *et al.*, 2013). Cuando el Fenómeno El Niño está presente el aumento de los valores de la salinidad ocurre en temporada seca de diciembre a febrero; mientras que en periodos La Niña, cuando inician la temporada de lluvias (entre septiembre y noviembre), cerca de la zona costera de La Guajira los procesos de dilución son mayores (Beier *et al.*, 2017) y, por ende, la salinidad disminuye.

Biodiversidad

Algunos autores mencionan la relación entre los procesos oceanográficos de la zona de interés con la abundancia y distribución de diferentes especies como el arenque del Atlántico Norte (*Opisthonema oglinum*), la sardina escamada (*Harengula jaguana*) y la alacha (*Sardinella aurita*), las cuales tienen una preferencia por ciertas condiciones de salinidad y temperatura, favorecida por procesos de surgencia (Páramo *et al.*, 2003). Algunos organismos planctónicos suelen abandonar el margen continental para desarrollarse en zonas de mar abierto, por lo que dependen estrictamente de los procesos de surgencia que ocurren en las costas para obtener alimento en sus primeras etapas de vida (Andrade y Barton, 2005). Por otro lado, Bernal *et al.* (2016) menciona la importancia de comprender estos procesos oceanográficos con relación a nuestros ecosistemas costeros de manglar, arrecife y playa, para saber cómo se están comportando frente a esos procesos y la manera en la que responden.

Recientemente, Dorado-Roncancio *et al.* (2022) analizaron la distribución de copépodos entre los años 2013 y 2018 encontrando que responde a patrones oceanográficos locales regulados por la variabilidad del oxígeno disuelto y la temperatura en la columna de agua. Empleando datos recolectados en un crucero desarrollado en el año 2008, Lozano, Vidal y Navas (2010) reportaron que existen diferencias espaciales en el Caribe colombiano en cuanto a composición y abundancia porcentual de las especies fitoplanctónicas. Por su parte, Medellín y Martínez (2010), empleando datos del mismo crucero, describieron la distribución del mesozooplankton, indicando que las mayores concentraciones de biomasa y abundancia se encontraron en la zona nororiental y suroccidental del Caribe colombiano, las cuales están relacionadas con la surgencia

y las descargas continentales, así como con el patrón de corrientes superficiales y los eventos de circulación ciclónica.

Las condiciones del fondo marino también cobran relevancia en la biodiversidad del Caribe colombiano. En cuanto a equinodermos, Benavides-Serrato y Borrero-Pérez (2010) identificaron un patrón de distribución batimétrico claro, con cuatro conglomerados de estaciones que podrían ser explicados por la estructura de las masas de agua, corrientes marinas y el tipo de sedimento. Mientras que Trujillo, Sosa y Linero (2009) evidenciaron un efecto débil del tamaño de grano, que conforma el sustrato físico, sobre la distribución espacial de la macroinfauna de La Guajira.

En la actualidad, hay un interés creciente por el potencial en energías renovables con el que cuenta el área de La Guajira, tanto a nivel continental como marino. Se han realizado estudios del recurso eólico en toda la zona costera del Caribe colombiano con datos de alta (Gil, Cañón y Martínez, 2021) y baja resolución temporal (Bastidas-Salamanca y Rueda-Bayona, 2021), y para localidades puntuales como La Guajira (Ochoa, Álvarez y Chamorro, 2019). No obstante, y tal como lo menciona Garavito-Téllez (2020), este tipo de proyectos generan afectaciones ambientales al medio biótico, entre las que se incluyen pérdida de conectividad o fragmentación, pérdida de hábitat o colisiones contra las estructuras, lo cual requiere especial atención por parte de las autoridades ambientales y requerirá en el corto plazo, la realización de estudios puntuales sobre biodiversidad.

CONCLUSIONES

A partir de la revisión realizada se identificó que, en general, se tiene un conocimiento amplio sobre la manera en la que funciona y se comporta el sistema de surgencia de La Guajira. Asimismo, es posible identificar su influencia en las variaciones de salinidad, temperatura y clorofila, según la temporada durante el año. La surgencia es impulsada por los vientos Alisios, el CLLJ y la corriente de Caribe, además de que es influenciada por la ZCIT y su posición que varía según la temporada seca o húmeda durante el año.

A partir de imágenes satelitales, diversos autores han podido establecer los valores de variables de interés y como cambian en el ciclo anual. La temperatura durante los procesos de surgencia es fría oscila entre 25°C y 28°C; cuando la surgencia se debilita, la TSM aumenta a valores por encima de los 28°C. Los valores de clorofila suelen ser más altos durante los procesos de surgencia, pero también pueden variar según la temporada seca o húmeda. Los valores de salinidad son altos (36.5 a 37.2), pero disminuyen en la temporada húmeda o en zonas donde hay desembocaduras de los ríos, debido al proceso de mezcla y dilución.

No obstante, existe un vacío en relación con la surgencia y su impacto sobre la biodiversidad de la zona y los ecosistemas asociados a ella. Es interesante encontrar artículos que mencionan de forma muy breve la importancia del proceso de afloramiento para la diversidad marina, pero se debe entender que el clima y la oceanografía modula la manera en la que las especies se distribuyen. Además, muchas de las especies asociadas a las zonas de surgencia tienen un valor económico alto, lo que debería llamar aún más la atención para realizar investigaciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los entes financiadores del proyecto CHARISMA (JEA-IRD-Francia/UMNG-Colombia). Este artículo surgió del proyecto de investigación EXT-CIAS-3638.

FUENTE FINANCIADORA

Este artículo fue apoyado por el proyecto CHARISMA (JEA-IRD-Francia/UMNG-Colombia). Este artículo surgió del proyecto de investigación EXT-CIAS-3638, financiado por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Nueva Granada, vigencia 2021-1, y el Institut de Recherche pour le Développement (IRD-Francia) (JE0ECCHARI).

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: A. R., F. B.; Metodología: A. R.; Software: A. R., F. B.; Análisis: A. R., F. B.; Redacción-preparación del borrador original: A. R.; Redacción-revisión y edición: A. R., F. B. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, A.; Belem, A.; Briceño, F.; Cordeiro, L.; Mendoza, U.; Knoppers, B.; Gurgel, M.; Meyers, P.; Capilla, R. (2014). Particle fluxes and bulk geochemical characterization of the Cabo Frio upwelling system in Southeastern Brazil: sediment trap experiments between spring 2010 and summer 2012. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 86: 601-620. <https://doi.org/10.1590/0001-37652014107212> PMID:24838544
- Alonso del Rosario, J.; Blázquez, E.; Isaza-Toro, E.; Vidal, J. (2015). Internal structure of the upwelling events at Punta Gallinas (Colombian Caribbean) from MODIS-SST imagery. *Continental Shelf Research*, 109: 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.09.008>
- Alonso del Rosario, J.; Vidal, J. M.; Blázquez, E. (2019). On the prediction of upwelling events at the Colombian Caribbean coasts from MODIS-SST imagery. *Sensors*, 19(13): 2861. <https://doi.org/10.3390/s19132861> PMID:31252642 PMID:PMC6651733
- Alonso del Rosario, J.; Vidal, J. M.; Blázquez, E. (2021). The Upwelling of the Colombian Caribbean Coasts: Remote Sensing, Morphology, and Influence on the Lake Maracaibo. En: *Recent Advances in Differential Equations and Control Theory*. 1-18. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61875-9_1
- Andrade, C.; Barton, E. (2005). The Guajira upwelling system. *Continental Shelf Research*, 25(9): 1003-1022. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.12.012>
- Arévalo-Martínez, D.; Franco-Herrera, A. (2008). Características oceanográficas de la surgencia frente a la ensenada de Gaira, departamento de Magdalena, época seca menor de 2006. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 37(2): 131-162. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2008.37.2.195>
- Ayala, K.; Gutiérrez, J.; Montoya, E. (2022). Fitoplancton de la provincia oceánica del mar Caribe colombiano. Diez años de historia. *Biota Colombiana*, 23(1). <https://doi.org/10.21068/2539200x.903>

- Bastidas-Salamanca, M.; Ordóñez-Zúñiga, S.; Ricaurte-Villota, C. (2016). Events of wind intensification and relaxation in the Bay of Santa Marta (Colombian Caribbean): Oceanographic implications. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 45(2): 181-196. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2016.45.2.682>
- Bastidas-Salamanca, M.; Ricaurte, C.; Santamaría del Ángel, E.; Ordóñez, A.; Murcia, M.; Romero, D. (2017). Regionalización dinámica del Caribe. pp 14-31. En: Ricaurte-Villota, C. y M. L. Bastidas Salamanca (Eds.). 2017. *Regionalización oceanográfica: una visión dinámica del Caribe. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés" (Invemar). Serie de Publicaciones Especiales de Invemar # 14. Santa Marta, Colombia 180 pp.*
- Bastidas-Salamanca, M.; Rueda-Bayona, J. (2021). Pre-feasibility assessment for identifying locations of new offshore wind projects in the Colombian Caribbean. *Int. J. Sustain. Energy Plan. Manag.* 32: 139-154. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.6710>
- Beier, E.; Bernal, G.; Ruiz-Ochoa, M.; Barton, E. D. (2017). Freshwater exchanges and surface salinity in the Colombian basin, Caribbean Sea. *PloS one*, 12(8): e0182116. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182116> PMID:28777801 PMCID:PMC5544217
- Benavides-Serrato, M.; Borrero-Pérez, G. (2010). Equinodermos de la plataforma y ka frnaja superior del talud continental del Caribe Colombiano. Pp. 254-281. En: Invemar (Eds.). (2010). Biodiversidad del margen continental del Caribe colombiano. Serie de Publicaciones Especiales, Invemar. N°. 20 p. 4588.
- Bernal, G.; Osorio, A.; Urrego, L.; Peláez, D.; Molina, E.; Zea, S.; Montoya, R.; Villegas, N. (2016). Occurrence of energetic extreme oceanic events in the Colombian Caribbean coasts and some approaches to assess their impact on ecosystems. *Journal of Marine Systems*, 164: 85-100. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.08.007>
- Bonet-Morón, J.; Hahn-de-Castro, L. (2017). *La mortalidad y desnutrición infantil en La Guajira. Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana*, 255. <https://doi.org/10.32468/dtseru.255>
- Cámara de Comercio de La Guajira. (2017). *Informe socioeconómico de La Guajira. Estudio sobre el desempeño económico territorial de La Guajira.*
- Chollett, I.; Mumby, P.; Müller-Karger, F.; Hu, C. (2012). Physical environments of the Caribbean Sea. *Limnology and Oceanography*, 57(4): 1233-1244. <https://doi.org/10.4319/lo.2012.57.4.1233>
- Colorado, M.; Moreno, D. (2017). Economía de recursos naturales a partir de la producción de Spirulina (*Arthrospira maxima*) en fotobiorreactores, La Guajira, Colombia. *Retos*, 5(5): 50-59.
- Correa-Ramírez, M.; Rodríguez-Santana, Á.; Ricaurte-Villota, C.; Páramo, J. (2020). The Southern Caribbean upwelling system off Colombia: Water masses and mixing processes. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 155: 103145. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2019.103145>
- Dorado-Roncancio, F.; Medellín-Mora, J.; Mancera-Pineda, J.; Pizarro-Koch, M. (2022). Copepods of the off-shore waters of Caribbean Colombian Sea and their response to oceanographic regulators. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 101(8): 1129-1143. <https://doi.org/10.1017/S0025315422000133>
- England, M.; McGregor, S.; Spence, P., Meehl, G.; Timmermann, A.; Cai, W., Gupta, A.; McPhaden, M.; Purich, A.; Santoso, A. (2014). Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nature Climate Change*, 4(3): 222-227. <https://doi.org/10.1038/nclimate2106>
- Garavito-Téllez, L. (2020). *Impactos ambientales de los parques eólicos y líneas de transmisión de energía sobre la biodiversidad de áreas protegidas del departamento de La Guajira - Colombia. Universidad Pontificia Bolivariana. 70 pp.*
- Gil, S.; Cañón, J.; Martínez, J. (2021). Wind power assessment in the Caribbean region of

- Colombia, using ten-minute wind observations and ERA5 data. *Renewable Energy*, 172: 158-176. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.033>
- Gómez, A.; Acero, A. (2020). Comparación de las surgencias de La Guajira colombiana y del oriente venezolano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 49 (2): 131-172. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2020.49.2.943>
- Instituto de Investigaciones Marina y Costeras "José Benito Vives de Andrés" (Eds.). 2010. Biodiversidad del margen continental del Caribe colombiano. Serie de Publicaciones Especiales, Invemar N°. 20 p. 4588.
- Jouanno, J.; Sheinbaum, J. (2013). Heat balance and eddies in the Caribbean upwelling system. *Journal of Physical Oceanography*, 43(5): 1004-1014. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-0140.1>
- Lonin, S.; Hernández, J.; Palacios, D. (2010). Atmospheric events disrupting coastal upwelling in the southwestern Caribbean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C6). <https://doi.org/10.1029/2008JC005100>
- Lozano, Y.; Vidal, L.; Navas, G. (2010). La comunidad fitoplanctónica en el mar Caribe colombiano. Pp. 86-118. En: Invemar (Eds.). 2010. *Biodiversidad del margen continental del Caribe colombiano. Serie de Publicaciones Especiales Invemar, N°. 20 p. 4588.*
- Martínez, C.; Goddard, L.; Kushnir, Y.; Ting, M. (2019). Seasonal climatology and dynamical mechanisms of rainfall in the Caribbean. *Climate dynamics*, 53(1): 825-846. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04616-4>.
- Medellín, J.; Martínez, O. (2010). Distribución del mesozooplankton en aguas oceánicas del mar Caribe colombiano durante mayo y junio de 2008. Pp. 120-148. En: Invemar (Eds.). 2010. *Biodiversidad del margen continental del Caribe colombiano. Serie de Publicaciones Especiales, Invemar N°. 20 p. 4588.*
- Montoya-Sánchez, R.; Devis-Morales, A.; Bernal, G.; Poveda, G. (2018). Seasonal and intraseasonal variability of active and quiescent upwelling events in the Guajira system, southern Caribbean Sea. *Continental Shelf Research*, 171: 97-112. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.10.006>
- Muller-Karger, F. (2023). La surgencia oceánica - Un fenómeno oceanográfico persistente en la península de La Guajira. *Ciencia e Ingeniería*, 10(1). <https://doi.org/10.5281/zenodo.8091877>
- Muñoz, E.; Busalacchi, A. J.; Nigam, S.; Ruiz-Barradas, A. (2008). Winter and summer structure of the Caribbean low-level jet. *Journal of Climate*. 21: 1260-1276. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1855.1>
- Murcia, M.; Ricaurte, C.; Ordóñez, A.; Bastidas-Salamanca, M. (2017). Región 1: Sistema de La Guajira. Pp. 32-47. En: Ricaurte-Villota, C. y M. L. Bastidas Salamanca (Eds.). 2017. *Regionalización oceanográfica: una visión dinámica del Caribe. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés". Serie de Publicaciones Especiales de Invemar # 14. Santa Marta, Colombia, 180 pp.*
- Ochoa, G., Álvarez, J.; Chamorro, M. (2019). Data set on wind speed, wind direction and wind probability distributions in Puerto Bolívar-Colombia. *Data in Brief*, 27: 104753. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104753>
- Orfila, A., Urbano-Latorre, C.; Sayol, J.; González-Montes, S.; Cáceres-Euse, A., Hernández-Carrasco, I.; Muñoz, A. (2021). On the impact of the Caribbean counter current in the Guajira upwelling system. *Frontiers in Marine Science*, 8: 626823. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.626823>
- Otero-Cortés, A. (2013). Río Ranchería: entre la economía, la biodiversidad y la cultura. *Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana. N°. 190*. <https://doi.org/10.32468/dtseru.190>
- Páramo, J.; Quiñones, R.; Ramírez, A.; Wiff, R. (2003). Relationship between abundance of small pelagic fishes and environmental factors in the Colombian Caribbean Sea: an analysis based on hydroacoustic information. *Aquatic Living Resources*, 16(3): 239-245. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(03\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(03)00043-3)

- Roberts, C.; O'Leary, B.; McCauley, D.; Cury, P.; Duarte, C.; Lubchenco, J.; Pauly, D.; Sáenz, A.; Sumaila, U.; Wilson, R.; Worm, B.; Castilla, J. (2017). Marine reserves can mitigate and promote adaptation to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(24): 6167-6175. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701262114> PMID:28584096 PMCID:PMC5474809
- Rueda-Roa, D.; Muller-Karger, F. (2013). The southern Caribbean upwelling system: Sea surface temperature, wind forcing and chlorophyll concentration patterns. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 78: 102-114. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2013.04.008>
- Ruiz-Ochoa, M.; Beier, E.; Bernal, G.; Barton, E. (2012). Sea surface temperature variability in the Colombian Basin, Caribbean Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 64: 43-53. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2012.01.013>
- Santos, F.; Gómez, M.; Varela, R.; Ruiz-Ochoa, M.; Días, J. (2016). Influence of upwelling on SST trends in La Guajira system. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(4): 2469-2480. <https://doi.org/10.1002/2015JC011420>
- Sarmiento-Devia, R.; Vásquez, Á.; Mejías, M.; Dávila, P.; Franco-Herrera, A. (2013). Variabilidad intranual del régimen climático en sectores de surgencia en el sudeste del Mar Caribe, usando ERA Interim. *Revista de biología marina y oceanografía*, 48(3): 471-485. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572013000300006>
- Toro-Tobón, G.; Alvarez-Flórez, F.; Mariño-Blanco, H.; Melgarejo, L. (2022). Foliar Functional Traits of Resource Island-Forming Nurse Tree Species from a Semi-Arid Ecosystem of La Guajira, Colombia. *Plants*, 11(13): 1723. <https://doi.org/10.3390/plants11131723> PMID:35807675 PMCID:PMC9269082
- Torregroza-Espinosa, A.; Restrepo, J.; Escobar, J.; Pierini, J.; Newton, A. (2021). Spatial and temporal variability of temperature, salinity and chlorophyll-a in the Magdalena River mouth, Caribbean Sea. *Journal of South American Earth Sciences*, 105: 102978. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102978>
- Trujillo, C.; Sosa, Z.; Linero, K. (2009). Estructura de la macroinfauna asociada a los fondos blandos del Caribe norte colombiano. *Intropica: Revista del Instituto de Investigaciones Tropicales*, 4(1): 101-112.
- Vásquez, C.; Sullivan, K. (2021). Biodiversity of Upwelling Coastal Systems of the Southern Caribbean Sea Adjacent to Guajira Peninsula. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8): 846. <https://doi.org/10.3390/jmse9080846>
- Wang, C., 2007. Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate. *Clim. Dyn.* 29: 411-422. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0243-z>