

## Caracterización del ciclo de brisas diurnas en una región costera tropical a partir del modelo atmosférico WRF: caso Urabá antioqueño

### *Daytime breeze cycle characterization in a tropical coastal region using the WRF model: the case of the Gulf of Urabá, Colombia*

DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2022.594> Fecha de recepción: 2022-03-03 / Fecha de aceptación: 2022-07-27

Leidys Milena Arroyo Quinto<sup>1</sup>; Vladimir Giovanni Toro Valencia<sup>2</sup>; Eishower Rincón Vargas<sup>3</sup>; José Andrés Posada-Marín<sup>4</sup>; Rubén Darío Molina Santamaría<sup>5</sup>; Juan Fernando Salazar<sup>6</sup>

#### CITAR COMO:

Arroyo Quinto, L. M.; Toro Valencia, V.G.; Rincón Vargas, E.; Posada-Marín, J. A.; Molina Santamaría, R. D.; Salazar, J. F. (2022). Caracterización del ciclo de brisas diurnas en una región costera tropical a partir del modelo atmosférico WRF: caso Urabá antioqueño. *Bol. Cient. CIOH*; 41(1): 49-61. ISSN impreso 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2022.594>

#### RESUMEN

La determinación de los campos de viento asociados a las brisas marinas es indispensable para la valoración de procesos oceánicos-atmosféricos en las zonas costeras, como el transporte de contaminantes y la generación del oleaje tipo wind sea. Con esta información es posible cuantificar efectos producidos desde el continente en el mar, así como entender los procesos de erosión costera durante el día. Es importante recalcar que en parte litoral del golfo de Urabá se realiza una frecuente disposición de plaguicidas esparcidos desde avionetas y que la costa este del golfo presenta procesos acelerados de erosión costera. En el presente trabajo se realizó la caracterización del ciclo diurno de las brisas marinas sobre las costas del golfo de Urabá, utilizando los resultados del modelo Weather Research and Forecasting (WRF). Con esta finalidad se analizaron los campos de viento y temperatura de enero y febrero de 2008 a 2013. Los valores del viento en varios niveles de la vertical, así como lo campos de viento superficial fueron comparados con información *in situ*. Se identificó un sistema de brisas que inicia su desplazamiento de mar a tierra entre las 07:00 y 10:00 hora local (HL) y se invierte entre las 13:00 y 16:00 HL. Una evidencia del cambio de dirección son los valores de temperatura superficial, los cuales se correlacionaron positivamente con el viento. Como trabajo futuro se espera que el modelo WRF sea implementado para años recientes, con el fin de realizar un proceso más adecuado de calibración/validación utilizando estaciones climáticas que se han instalado en los últimos años.

**PALABRAS CLAVES:** brisas marinas, modelo WRF, hodógrafas, golfo de Urabá.

#### ABSTRACT

*Determining the wind fields associated with sea breezes is essential for assessing oceanic-atmospheric processes in coastal areas, such as the transport of pollutants and the generation of wind-sea waves.*

<sup>1</sup> Orcid: 0000-0003-1493-7841. Universidad de Antioquia. Correo electrónico: [leidys.arroyo@udea.edu.co](mailto:leidys.arroyo@udea.edu.co)

<sup>2</sup> Orcid: 0000-0003-4398-9472. Universidad de Antioquia. Correo electrónico: [vladimir.toro@udea.edu.co](mailto:vladimir.toro@udea.edu.co)

<sup>3</sup> Orcid: 0000-0003-4598-523X. Universidad de Antioquia. Correo electrónico: [eishower.rincon@udea.edu.co](mailto:eishower.rincon@udea.edu.co)

<sup>4</sup> Orcid: 0000-0001-7456-8772. Universidad de Antioquia. Correo electrónico: [andres.posada@udea.edu.co](mailto:andres.posada@udea.edu.co)

<sup>5</sup> Orcid: 0000-0003-1548-2578. Universidad de Antioquia. Correo electrónico: [ruben.molina@udea.edu.co](mailto:ruben.molina@udea.edu.co)

<sup>6</sup> Orcid: 0000-0001-7963-7466. Universidad de Antioquia. Correo electrónico: [juan.salazar@udea.edu.co](mailto:juan.salazar@udea.edu.co)

*With this information, it is possible to quantify the produced effects from the continent in the sea and understand the coastal erosion processes during the day. It is important to emphasize that in the coastal part of the Gulf of Urabá, there is frequent disposal of pesticides spread from small planes and that the east coast of the gulf presents accelerated coastal erosion processes. In the present work, the characterization of the diurnal cycle of sea breezes on the coasts of the Gulf of Urabá was carried out using the results of the Weather Research and Forecasting (WRF) model. To this purpose, wind and temperature fields were analyzed for January and February from 2008 to 2013. Wind values at various levels of the vertical and surface wind fields were compared with *in situ* information. It was found that the breeze system begins its movement from sea to land between 07:00 and 10:00 local time (LT) and reverses between 13:00 and 16:00LT. Evidence of the change of direction is the surface temperature values which were positively correlated with the wind. As future work, the WRF model is expected to be implemented for recent years to carry out an adequate calibration/validation process using climatic stations that have been installed lately.*

**KEYWORDS:** *Sea breezes, WRF model, hodograph, Gulf of Urabá.*

## INTRODUCCIÓN

Existe una fuerte relación entre el océano-continente modulado por la atmósfera y el océano que permite la ocurrencia de procesos naturales que afectan particularmente a las zonas costeras. Un fenómeno representativo en estos lugares es el de las brisas marinas, cuyos regímenes circulatorios diurnos influyen de forma significativa en la dispersión de contaminantes por vía aérea (Lalas, Asimakopoulou, Deligiorgi y Helmis, 1983; Salvador y Millán, 2003). Además, las brisas son importantes en el entendimiento de los cambios morfológicos producidos en la costa y de manera específica en procesos de erosión, ya que podrían permitir la intensificación de la energía del oleaje que llega a las playas (Pattiaratchi y Masselink, 1997).

Hasta el momento no existe consenso en la comunidad científica relacionado con un método que permita la identificación de las brisas en cualquier espacio costero (Azorín-Molina y López-Bustins, 2006). Sin embargo, los parámetros comunes que se utilizan para caracterizar las brisas son su magnitud, la distancia que alcanzan entre la costa y el continente, las direcciones desde donde soplan (mar/tierra), así como la distancia y altura donde comienza la corriente de retorno (Miller, Keim, Talbot y Mao, 2003; Carnesoltas, 2002). El método más usado considera que la brisa marina se produce con el cambio fuerte en la dirección y magnitud del viento, así como la diferencia térmica notable entre el continente y el mar (Azorín- Molina, 2004).

Las brisas marinas han sido determinadas a partir de mediciones *in situ* (Delgado, Larios y Ocampo, 1994; Huamantínco y Piccolo 2011; Pérez *et al.*, 2018) y usando modelación numérica (Rani, Ramachandran, Subrahmanyam, Alappattu y Kunhikrishnan, 2010; Steele, Dorling, Von Glasow y Bacon, 2013; Comin, Acevedo, Miglietta, Rizza y Degrazia, 2015). Recientemente, el modelo WRF (Weather Research and Forecasting) se ha empleado de manera amplia demostrando su capacidad para reproducir consistentemente este fenómeno. Algunos de estos ejercicios se han concentrado en la caracterización de las brisas (Arrillaga, Yagüe, Sastre y Román-Cascón, 2016; Lin *et al.*, 2019), otros han analizado su relación con la dispersión de contaminantes y el ciclo diurno del viento cerca de la costa (Parajuli *et al.*, 2020; Aravind, Srinivas, Hegde, Seshadri y Mohapatra, 2022) y también se ha empleado para estudiar su modulación en la meteorología urbana (Ribeiro *et al.*, 2018; Bauer, 2020).

En el caso de Colombia, el modelo WRF se ha utilizado para caracterizar las variables atmosféricas. Las investigaciones realizadas usando este modelo han evaluado principalmente parámetros como la temperatura, la dirección y velocidad del viento y la precipitación acumulada (Jiménez, 2014). Al comparar los resultados del modelo con datos de precipitación *in situ* Jiménez (2014) encontró que WRF sobreestimó su valor en regiones con topografía compleja como la cordillera Oriental de Colombia, mientras que en la cordillera Central presentó valores similares a los medidos (Posada-Marín, Rendón, Salazar, Mejía y Villegas, 2018).

En el Caribe colombiano se han realizado estudios con el fin de caracterizar sus procesos atmosféricos (Pérez *et al.*, 2018). Sin embargo, debido al escaso número de estaciones meteorológicas cerca de la línea de costa, los resultados no han sido contundentes debido a que solo algunos sitios costeros cuentan con información histórica de variables como viento y temperatura. Es de notar que en los últimos años se ha aumentado el número de estas estaciones costeras (Moreno y Muñoz, 2006; Castillo-Morales, Herrera-Vásquez, Dagua-Paz, Arzuza-Monterrosa y Herrera-Moyano, 2017; Moreno-Calderón, Pico-Hernández, Dagua-Paz, Herrera-Moyano y Gonzales-Montes, 2020).

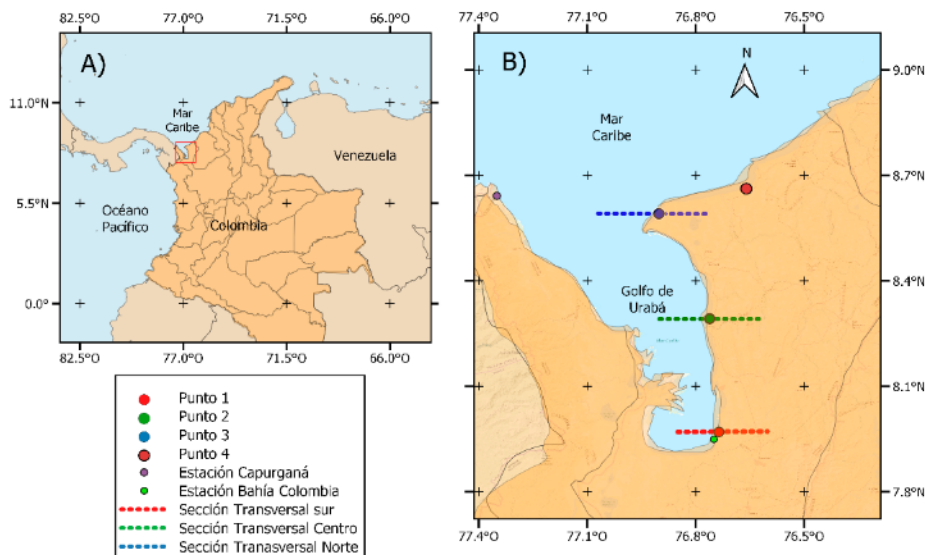
En la mayoría de las investigaciones se han utilizado datos provenientes de bases de datos y de reanálisis globales con resoluciones espacial y temporal gruesas de alrededor de 30 km y 6 horas, respectivamente. Este tipo de información no es suficiente para describir procesos de mesoescala como las brisas marinas (Bao y Zhang, 2013), lo cual genera la necesidad de realizar estudios donde se reduzcan sus escalas (Posada-Marín *et al.*, 2018). Una situación similar, en cuanto a estudios y escalas, se presenta en el golfo de Urabá, ubicado en la parte occidental del mar Caribe colombiano.

El golfo de Urabá se proyecta como un polo de desarrollo económico de la región y de Colombia, dado que es el epicentro de tres posibles obras portuarias que servirán como terminales para la exportación de productos nacionales y regionales (García y Galíndez, 2018). En tal sentido es necesario avanzar en el conocimiento de los procesos físicos que se desarrollan en el golfo y, de manera particular, caracterizar la dinámica de las brisas marinas, debido a que su comportamiento se puede asociar al incremento de la energía del oleaje, valores que son relevantes en los proyectos portuarios mencionados.

En esta investigación se realizó una descripción del sistema de brisas marinas utilizando datos de simulaciones realizadas con el modelo WRF. Esta investigación es novedosa para la región, dado que se obtuvo, entre otros, información modelada de alta resolución espacial y temporal del viento en diferentes niveles en la vertical, considerando las características geométricas del golfo.

## ÁREA DE ESTUDIO

Este estudio se realizó en la región del golfo de Urabá, ubicado al sur del Caribe colombiano (Fig. 1A). El golfo tiene una forma alargada en dirección norte-sur, con aproximadamente 25 km de ancho y 80 km de largo.



**Figura 1. (a)** Ubicación del golfo en el Caribe colombiano; **(b)** Área de estudio, en líneas punteadas se muestran las tres secciones transversales y en puntos los cuatro sitios de análisis.

Se caracteriza por tener dos épocas climáticas: una seca, que va desde diciembre hasta abril, con vientos provenientes del noreste y magnitudes de hasta 4 m/s, y otra húmeda, que comienza en mayo y termina en noviembre, donde se presentan vientos débiles provenientes del sur, con magnitudes de hasta 2 m/s. Su temperatura promedio anual es de 27.2 °C (Hernández y Mercado, 2020).

## METODOLOGÍA

Para la simulación del campo de vientos sobre la zona de estudio se usó el modelo WRF, el cual cuenta con un conjunto de ecuaciones diferenciales capaces de representar los procesos dinámicos y las relaciones energéticas del sistema tierra-atmósfera-océano (Manta, 2017). En este caso se analizaron datos modelados de los meses de enero y febrero, entre 2008 y 2013. Estas simulaciones utilizaron la configuración propuesta por Posada-Marín *et al.* (2018), donde se emplearon datos de reanálisis obtenidos del producto ECMWF ERA-Interim (Disponible en <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>) para las condiciones iniciales y de contorno con una cuadrícula de 0.75° x 0.75°.

Se obtuvieron resultados en tres dominios con resoluciones espaciales de 30 km, 10 km y 3 km, así como en 37 niveles sigma en la vertical hasta los 50 hPa y con una resolución temporal de 3 horas. En los análisis del presente trabajo solo se utilizaron los resultados del dominio de mayor resolución, debido a que allí está enmarcada el área de interés.

Con los campos de viento se calculó un promedio horario mensual para enero y febrero en el período 2008 a 2013, con el que se realizaron los análisis que se mencionarán más adelante. En este artículo solo se muestran las gráficas de uno de los dos meses estudiados (febrero), debido a las similitudes que se presentaron en los resultados de los dos meses mencionados.

Se analizaron tres secciones transversales costeras (líneas punteadas), una en la parte sur, y dos en la parte central y norte, así como en cuatro sitios (puntos) ubicados cerca de las secciones mencionadas (Fig. 1B). Además se usó información medida *in situ* por dos estaciones meteorológicas: una localizada al sur, en Bahía

Colombia, y otra el norte, en Capurganá. De estas estaciones se obtuvieron datos horarios para velocidad y dirección del viento de los meses de enero y febrero del año 2010, que se compararon con las simulaciones empleando como estadísticos el sesgo (Bias), el error cuadrático medio (ECM) y el índice de acuerdo (IOA).

Los cambios de dirección del viento se definieron a través de hodógrafas realizadas con datos de viento a 10 m de la superficie (Salvador y Millán, 2003). Este tipo de gráficas describen la trayectoria horaria de las componentes del viento en el plano horizontal (Delgado *et al.*, 1994). La existencia de la brisa se identificó usando el método propuesto por Gustavsson, Lindqvist, Borne y Bogren (1995) y Pérez *et al.* (2018), en el cual se consideran los siguientes criterios: la brisa inicia con un cambio en la dirección del viento ( $\theta$ )  $\geq 100^\circ$  en dirección mar-tierra, aumento de la magnitud del viento ( $v$ ) mayor a 0 m/s y menor a 10 m/s, y una reducción del valor de la temperatura ( $T$ ). El ciclo termina cuando nuevamente hay un cambio en la dirección del viento  $\geq 100^\circ$  (tierra-mar), y un aumento de la velocidad y reducción la temperatura.

En este estudio se analizaron los perfiles verticales de las componentes zonal ( $T$ ) y vertical ( $W$ ) del viento en las tres secciones transversales mencionadas (Fig. 1B). Los análisis se realizaron entre las 07:00 y las 19:00 hora local (HL), utilizando los ocho primeros niveles en la vertical (entre 1000 hPa y 650 hPa). Posteriormente, se analizaron los campos de viento de los valores promedios de  $U$ ,  $V$ , y  $T$ , entre las 7:00 y las 22:00 HL. Se calcularon las diferencias de temperatura entre la parte marina y la continental en los sitios de la Figura 1B, correspondientes a zonas específicas en el sur, centro y norte del golfo de Urabá.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

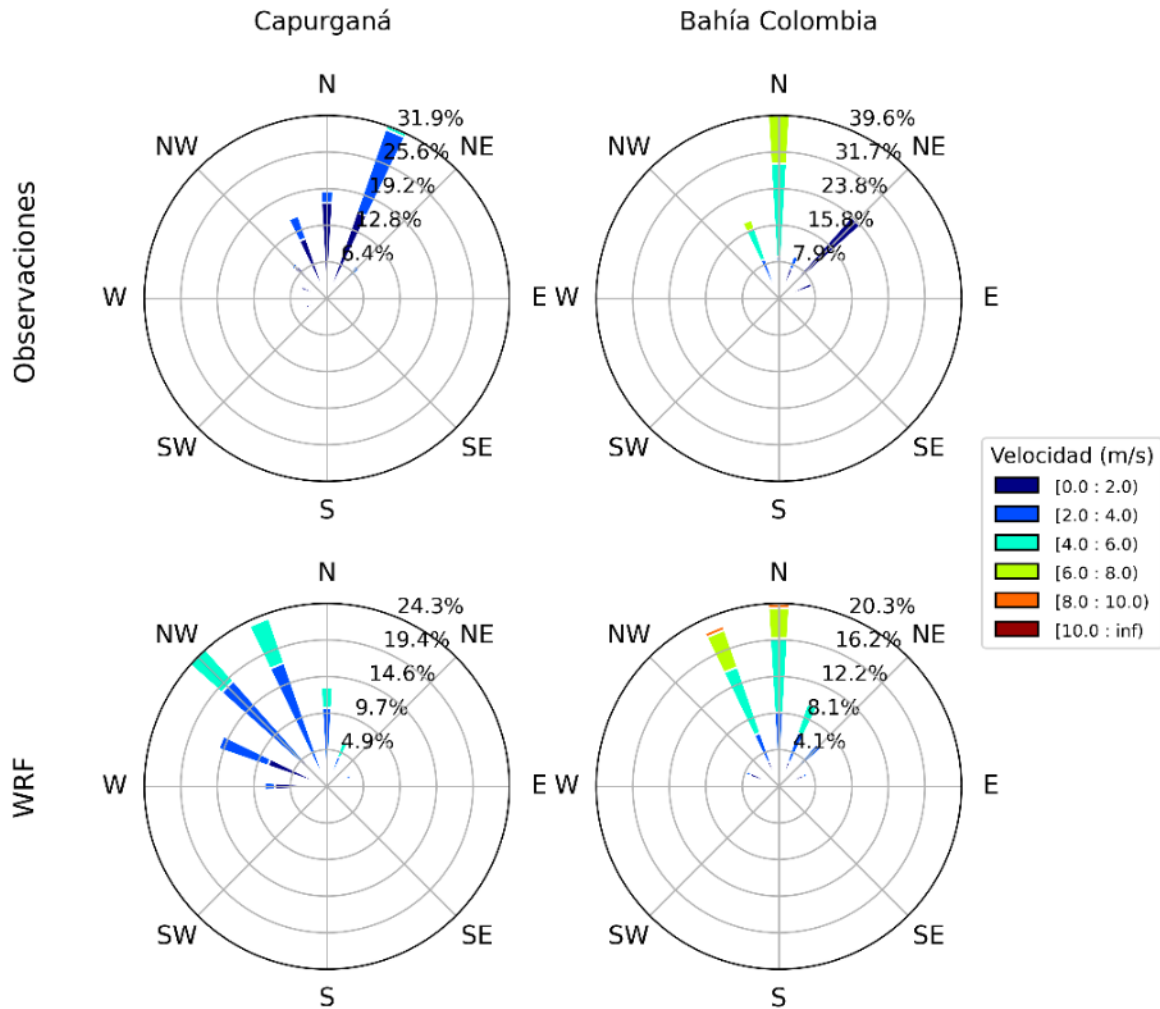
Las horas mencionadas en los resultados que se presentarán a continuación corresponden al tiempo local de Colombia calculado como UTC (Tiempo Universal Coordinado) menos 5 horas.

### *Evaluación de los resultados de la simulación*

Se realizaron comparaciones en los sitios de la malla del modelo más cercanos a las estaciones

meteorológicas en Bahía Colombia y Capurganá. Las rosas de viento para estos dos lugares indican que las direcciones del viento en los meses analizados se mantienen entre el noreste y noroeste (Fig. 2). Sin embargo, el modelo tiene baja concordancia con las observaciones al representar la frecuencia y el valor de dichas

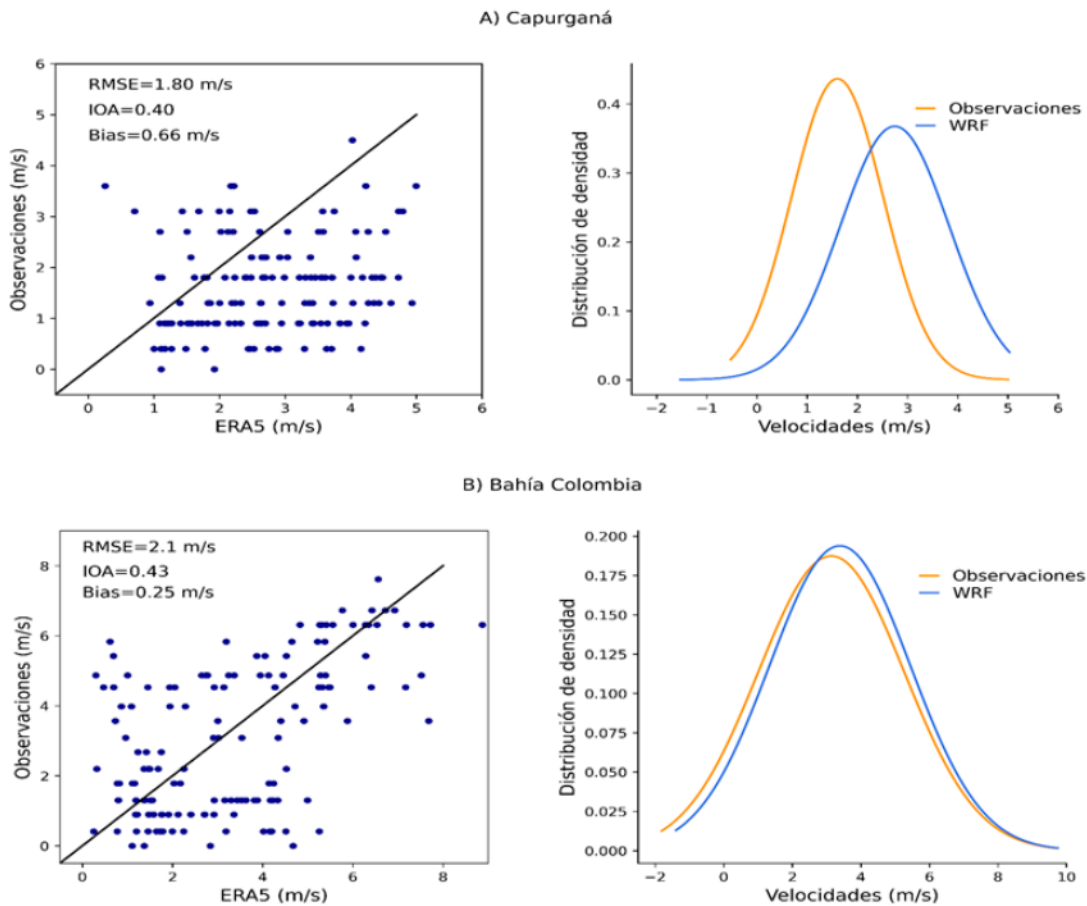
direcciones, especialmente en Capurganá. Respecto a este comportamiento, Jiménez y Dudhia (2013) encontraron que el WRF presenta menores diferencias con las observaciones en zonas con menor complejidad en el terreno, en este caso Bahía Colombia se ajusta mejor a dichas características.



**Figura 2.** Rosas de viento de las observaciones (arriba) vs. WRF (abajo), para Capurganá (izquierda) y Bahía Colombia (derecha). Enero y febrero de 2010.

Los valores de velocidad del viento del modelo y de las estaciones presentan un grado medio de dispersión. Los resultados sugieren una similitud moderada entre el modelo y las observaciones (IOA con las observaciones de 0.4 Capurganá y 0.43 en Bahía Colombia, Figura 3, panel

izquierdo). Es de notar que las comparaciones con el punto de Bahía Colombia muestran un mejor ajuste. Esto es evidente en la función de densidad de probabilidad de la velocidad del viento para el modelo y las observaciones (Fig. 3B, panel derecho).



**Figura 3.** Gráfico de dispersión con datos de velocidad para el modelo y las observaciones (izq.). Funciones de distribución de densidades de los datos de velocidad para el modelo y las observaciones (der.) en los puntos: **A)** Capurganá; **B)** Bahía Colombia.

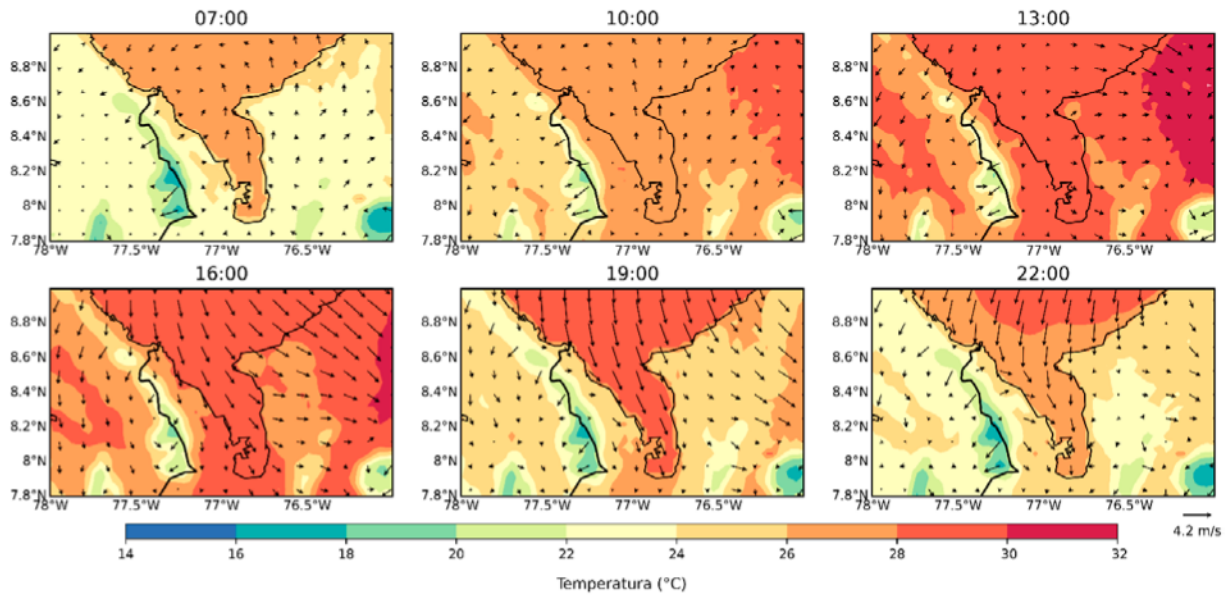
### **Caracterización de las brisas marinas en el golfo de Urabá**

En la Figura 4 se observan los campos de viento superficial promedio (vectores) para febrero cada 3 horas, entre las 7:00 y las 22:00. En colores se muestran los campos de temperatura superficial promedio. Al interior del golfo y cerca de la costa, las temperaturas varían entre 26 °C y 28 °C. Los valores de temperatura más altos se evidencian en las horas de la tarde (entre 13:00 y 19:00) y se reducen a partir de las 22:00.

Entre las 07:00 y las 10:00 el viento ingresa a la región desde el sur y gira tomando una dirección hacia el occidente del golfo de Urabá. Este comportamiento se modifica a las 13:00,

cuando el viento inicia a desplazarse tanto al este como al occidente del golfo de Urabá. A las 19:00 se observa un viento más débil en la costa, junto con temperaturas más bajas, y, finalmente, a las 22:00 el viento toma una dirección noroeste (hacia el interior del golfo) y se reduce aún más la magnitud del viento en la costa.

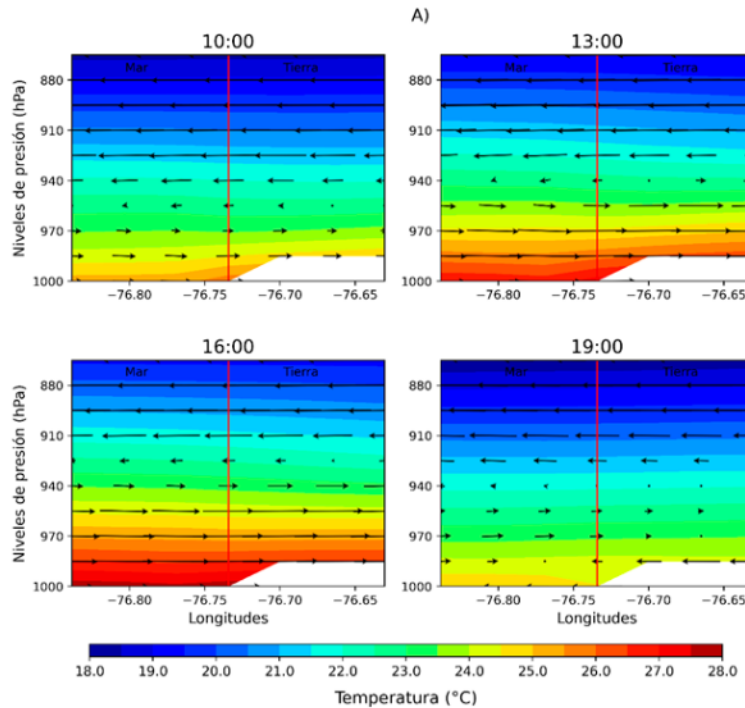
Los perfiles verticales (Fig. 5) muestran que en el sur (A) y el centro (B) de la costa del golfo de Urabá se presenta un flujo hacia tierra entre las 10:00 y las 16:00, que inicia con una altura hasta los 970 hPa y alcanza su mayor desarrollo a las 16:00, con un retorno a los 925 hPa. De manera complementaria, en estas horas se presentan las mayores temperaturas en la parte superficial de la costa (entre 26°C y 27°C).

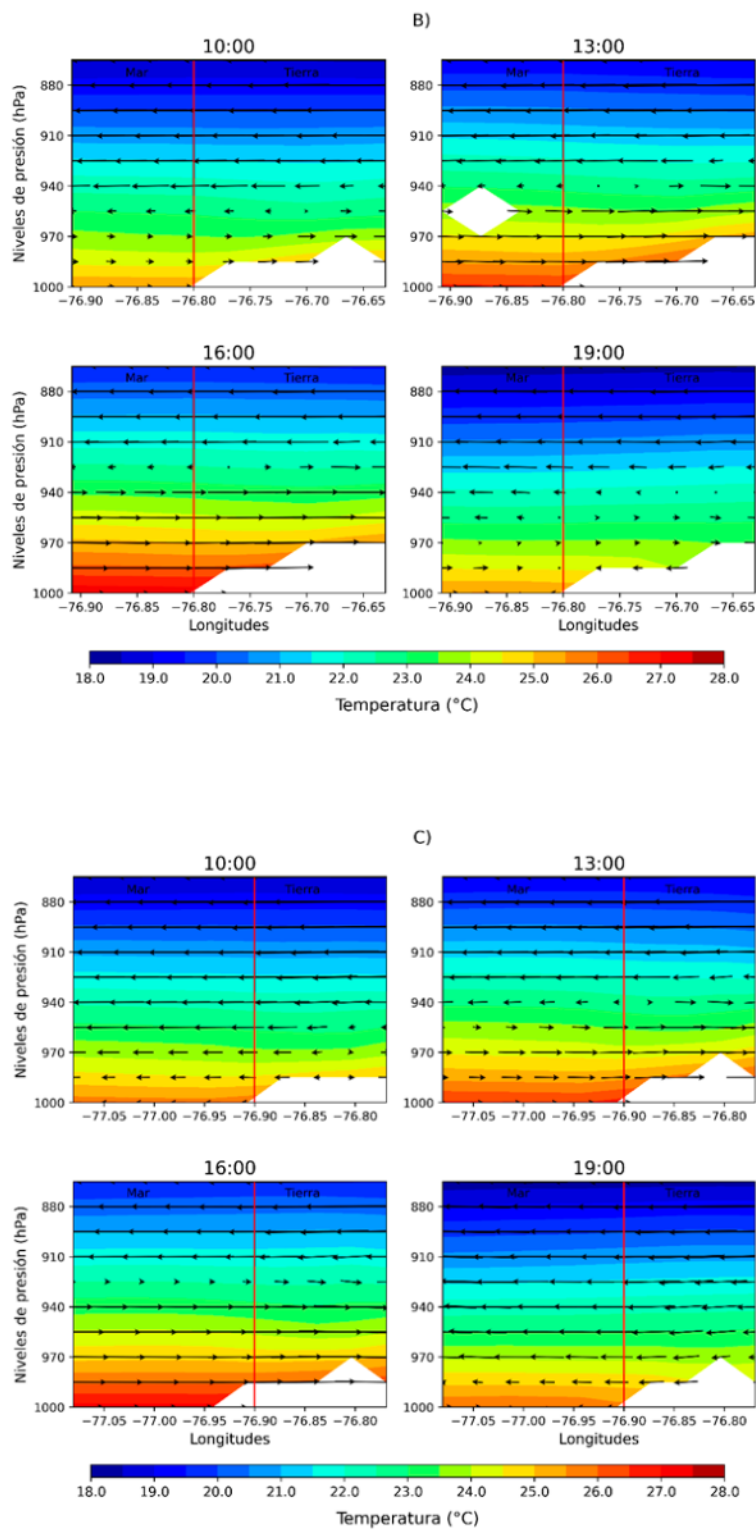


**Figura 4.** Campos de viento promedio para febrero entre las 7:00 y las 22:00 (HL), a una altura promedio de 10 m. En colores se observan los valores del campo de temperatura.

En el norte del golfo el flujo hacia tierra ocurre entre las 13:00 y las 16:00, y su altura máxima llega a los 925 hPa, con un retorno a los 910 hPa. A las 19:00 se presenta un flujo hacia el mar que llega hasta los 865 hPa. Los resultados muestran cambios en la dirección del viento que sugieren

la ocurrencia de la brisa marina y terrestre, con desplazamientos del viento hacia la tierra en horas con mayor radiación solar y hacia el mar en las horas nocturnas. Esto concuerda con lo expresado por varios autores (Simpson, 1994; Gustavsson *et al.*, 1995; Salvador *et al.*, 2016).

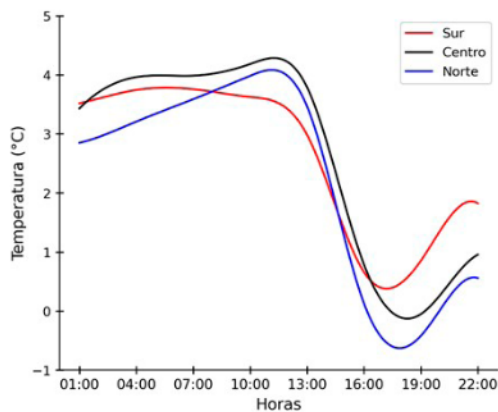




**Figura 5.** Perfil vertical del viento (flechas) y contornos de temperatura. **A)** En el sur; **B)** En el centro; **C)** En el norte del golfo de Urabá.



Las diferencias entre la temperatura del aire sobre el mar y el aire sobre tierra se muestran en la Figura 6. Los resultados muestran que mayores diferencias de temperatura se presentan entre las 01:00 y 13:00, y las menores diferencias (0.5°C) entre las 16:00 y las 19:00 en los puntos del centro y el sur, lo cual sugiere un incremento en la temperatura sobre el continente. Esta reducción inicia a partir de las 10:00 y concuerda con los flujos hacia tierra evidenciados en los campos superficiales (Fig. 4) y en los perfiles verticales (Fig. 5), lo cual tiene concordancia con el contraste térmico en la costa propuesto por Sills (1998).



**Figura 6.** Diferencias de temperatura del aire sobre el mar y el aire sobre tierra para los puntos en el sur, centro y norte del golfo de Urabá.

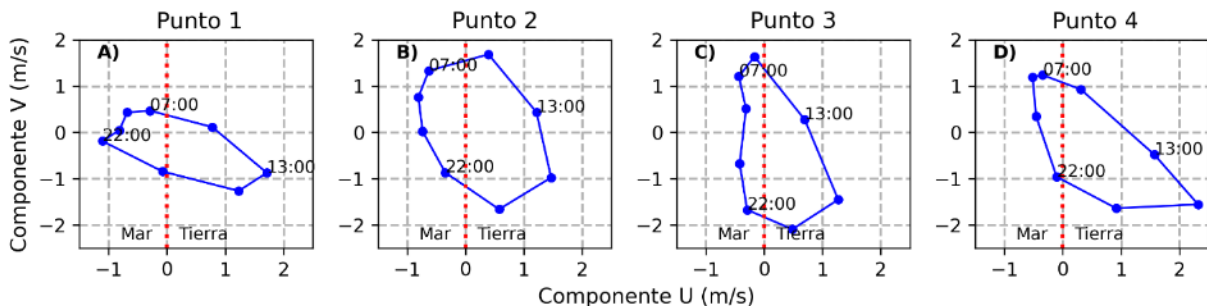
El norte es el único punto donde a las 16:00 la temperatura sobre tierra es mayor que la del mar (0.6 °C); sin embargo, en esta zona se conserva el mismo patrón de los demás sitios. Las diferencias térmicas que se evidencian en los resultados son consideradas el aspecto más determinante para la identificación de la brisa marina, de acuerdo con Pielke y Segal (1986). En el caso del Caribe colombiano autores han encontrado que no es tan

contrastante, tal como sucede con Urabá, pero diferencias de hasta 2 °C fueron suficientes para determinar la ocurrencia de la brisa (Kazakov, Lezhenin y Speransky, 1996; Pérez *et al.*, 2018).

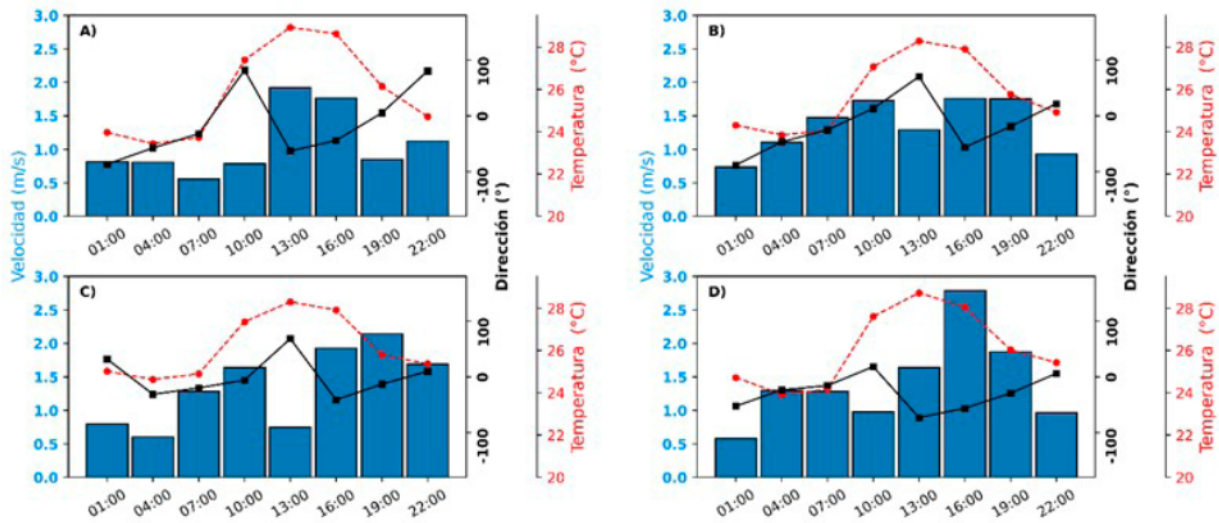
La Figura 7 muestra las hodógrafas como función de la componente U (m/s) y V (m/s) del viento superficial para los cuatro sitios del golfo especificados en la Figura 1B. En general, las hodógrafas tienen una forma elíptica y muestran un giro del viento en el sentido horario. Según Carnesoltas (2002), la geometría elíptica está relacionada con la formación de la brisa, y de acuerdo con Pérez *et al.* (2018) en la costa Caribe colombiana las brisas marinas tienen una mayor ocurrencia en la temporada de pocas lluvias. Esto coincide con las características climáticas de la región de estudio en el período de análisis.

El cambio de dirección del viento hacia el continente para el punto 1 (Fig. 7A) ocurre entre las 04:00 y 07:00, y retorna al mar después de las 16:00, mientras en los puntos 2, 3 y 4 (figuras 7B, 7C, 7D) el viento gira hacia tierra entre las 07:00 y las 10:00, y retorna al mar después de las 19:00, pero en todos los sitios el viento se encuentra en el continente a las 13:00.

La variación promedio de la temperatura, la dirección y la velocidad del viento para los puntos de estudio se muestran en la Figura 8. Es de notar que la dirección del viento está referenciada al lugar de donde viene el viento y que 0° está orientado al Norte. Se observan cambios de dirección >100° para los puntos 1 y 4 (figuras 8A y 8D) entre las 07:00 y las 13:00, mientras en los puntos 2 y 3 (figuras 8B y 8C) estos cambios se evidencian entre las 10:00 y las 16:00. Dichas modificaciones en la dirección del viento representan un giro del Nordeste (NE) al Noroeste (NW) y viceversa.



**Figura 7.** Hodógrafas como función de las componentes U y V promedio cada tres horas para los cuatro sitios de estudios.



**Figura 8.** Gráficos de la velocidad (barras azules), dirección (línea negra continua) y temperatura (línea roja punteada) en función del tiempo (diurno). A) Punto 1; B) Punto 2; C) Punto 3 y D) Punto 4.

Durante las horas del día los valores más bajos de temperatura se observan a las 07:00 en todos los puntos, y los valores máximos a las 13:00 con un leve descenso a las 16:00. Por otra parte, durante la mañana los incrementos de la velocidad del viento para el punto 1 ocurren hasta las 13:00, en los puntos 2 y 3 hasta las 10:00, y en el punto 4 después de las 10:00. En general, los cambios evidenciados para temperatura, y dirección y velocidad del viento sugieren el inicio de la brisa de mar después de las 07:00, con un desarrollo en tierra entre las 10:00 y las 13:00, y, finalmente, unas horas de transición a tierra entre las 19:00 y las 22:00.

## CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio sugieren el establecimiento de un sistema de brisas a lo largo de la costa este y sur del golfo de Urabá. De acuerdo con los cambios de dirección y magnitud del viento, la brisa inicia a las 7:00 HL y gira de manera anticiclónica hasta las 16:00 HL donde regresa al inicio. En ese trayecto la brisa comienza en el mar y se traslada a tierra en horas diurnas. Al finalizar la tarde (19:00 HL) y en horas nocturnas se mueve en dirección del mar. El desarrollo vertical de la brisa marina ocurre cerca de los 925 hPa, mientras la terrestre en el sur y centro de Urabá solo alcanza 985 hPa.

Estos resultados coinciden con los cambios

de valores máximos de temperaturas, y de la velocidad y la dirección del viento sobre tierra y el mar, para el inicio y fin de la brisa. Estos resultados permiten avanzar en el entendimiento de la estructura vertical de la atmósfera en las zonas costeras y en particular de las brisas marinas, lo cual permitirá mejorar las estimaciones de procesos como la intensificación del oleaje local en el litoral y la consecuente erosión costera.

## AGRADECIMIENTOS

Las salidas del modelo WRF corresponden a simulaciones realizadas por la componente de modelación numérica de la atmósfera, enmarcadas dentro del proyecto 'Investigación para estabilización del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia', financiado por la Gobernación de Antioquia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arrillaga, J.; Yagüe, C.; Sastre, M.; Román-Cascón, C. (2016). A characterisation of sea-breeze events in the eastern Cantabrian coast (Spain) from observational data and WRF simulations. *Atmospheric Research*, 181: 265-280. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.06.021>
- Aravind, A.; Srinivas, C. V.; Hegde, M. N.; Seshadri, H.; Mohapatra, D. K. (2022). Impact of land surface processes on the simulation of

- sea breeze circulation and tritium dispersion over the Kaiga complex terrain region near west coast of India using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. *Atmospheric Environment: X*, 13,100149. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2022.100149>
- Azorín-Molina, C. (2004). *Estimación de la ocurrencia de la brisa marina en Alicante. IV Congreso de la Asociación Española de Climatología*. Santander, España. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/8945>
- Azorín-Molina, C.; López-Bustins, J. (2006). *WeMOi: Criterio Objetivo de selección de la brisa marina en el sureste de la península Ibérica (Alicante)*. Clima, sociedad y medio ambiente, España: Zaragoza: Asociación Española de Climatología. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/8741>
- Bao, X; Zhang, F. (2013). Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 Reanalysis Datasets against Independent Sounding Observations over the Tibetan Plateau. *Journal of Climate*, 26: 206-214. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00056.1>
- Bauer, T. J. (2020). Interaction of Urban Heat Island Effects and Land-Sea Breezes during a New York City Heat Event. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(3): 477-495. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0061.1>
- Carnesoltas, M. (2002). La circulación local de brisas de mar y tierra. Conceptos fundamentales. *Revista Cubana de Meteorología*, 9:39-59. <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/340>
- Castillo-Morales, F. M.; Herrera-Vásquez, G.; Dagua-Paz, C. J.; Arzuza-Monterrosa, C. A; Herrera-Moyano, D. (2017). Boletín Meteorológico Mensual del Caribe Colombiano No.49/Enero de 2017. Cartagena de Indias, Colombia: Dirección General Marítima. <https://doi.org/10.26640/23394129.48.2017>
- Comin, A.; Acevedo, O.; Miglietta, M.; Rizza, U.; Degrazia, G. (2015). Investigation of sea-breeze convergence in Salento Peninsula (southeastern Italy). *Atmospheric Research*, 160: 68-79. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.03.010>
- Delgado, O.; Larios, S.; Ocampo, F. (1994). Breezes during some months of spring and summer in the northwest of the Gulf of California [Las brisas durante algunos meses de primavera y verano en el noroeste del golfo de California]. *Ciencias Marinas*, 20: 421-440. <https://doi.org/10.7773/cm.v20i3.966>
- García, D; Galíndez, D. (2018). Puerto de Urabá: oportunidad logística para las exportaciones en Colombia. Estudio de caso. *En-Contexto*, 6: 109-126. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=551859331004>
- Gustavsson, T.; Lindqvist, S.; Borne, K.; Bogren, J. (1995). A study of sea and land breezes in an archipelago on the west coast of Sweden. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 15:785-800. <https://doi.org/10.1002/joc.3370150706>
- Hernández, T; Mercado, A. (2020). *Estimación de la distribución espacial y temporal de la precipitación en el distrito de Turbo, Colombia*. Tesis de grado ingeniería oceanográfica. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería. Medellín, Colombia. <http://hdl.handle.net/10495/15278>
- Huamantínco, M.; Piccolo, C. (2011). Caracterización de la brisa de mar en el balneario de Monte Hermoso, Argentina. *Estudios Geográficos*, 72: 461-475. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201118>
- Jiménez, M. (2014). *Validación de la capacidad del modelo "Weather Research and Forecasting" para pronosticar lluvia intensa, usando el método orientado a objetivos y tablas de contingencia*. Tesis C. Meter. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54576>
- Jiménez, P. A.; Dudhia, J. (2013). On the Ability of the WRF Model to Reproduce the Surface Wind Direction over Complex Terrain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(7): 1610-1617. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0266.1>
- Kazakov, A.; Lezhenin, A.; Speranskiy, L. (1996). Resultados preliminares del estudio de la capa límite mesometeorológica de la atmósfera en

- la costa norte colombiana aplicando un modelo numérico. *Bol. Cient. CIOH*, 17:17-26. <https://doi.org/10.26640/22159045.81>
- Lalas, D.; Asimakopoulou, D.; Deligiorgi, D.; Helmig, C. (1983). Sea-breeze circulation and photochemical pollution in Athens, Greece. *Atmospheric Environment*, 17:1621-1632. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(83\)90171-3](https://doi.org/10.1016/0004-6981(83)90171-3)
- Lin, Y.; Cao, D.; Lin, N.; Xue, W.; Xu, S.; Zhao, Y., et al. (2019). Characteristics and simulation biases of corkscrew seabreezes on the east coast of China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124:18-34. <https://doi.org/10.1029/2017JD028163>
- Manta, G. (2017) *Caracterización de la brisa marina en Uruguay*. Tesis de maestría en Geociencias. Universidad de la República de Uruguay. Facultad de Ciencias. Montevideo, Uruguay. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/21451>
- Miller, S.; Keim, B.; Talbot, R.; Mao, H. (2003). Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts. *Reviews of Geophysics*, 41: 312-320. <https://doi.org/10.1029/2003RG000124>
- Moreno, J.; Muñoz, A. (2006). Desarrollo de un sistema de medición de parámetros oceanográficos y de meteorología marina, para el litoral Caribe y Pacífico colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 24:148-157. <https://doi.org/10.26640/22159045.156>
- Moreno-Calderón, M.; Pico-Hernández, S. A.; Dagua-Paz, C. J.; Herrera-Moyano, D. P.; Gonzales-Montes, S. (2020). *Boletín Meteomarinero Mensual del Caribe Colombiano* No.86 / Febrero de 2020. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima (Dimar). <https://doi.org/10.26640/23394099.86.2020>
- Parajuli, S. P.; Stenchikov, G. L.; Ukhov, A.; Shevchenko, I.; Dubovik, O.; Lopatin, A. (2020). Aerosol vertical distribution and interactions with land/sea breezes over the eastern coast of the Red Sea from lidar data and high-resolution WRF-Chem simulations. *Atmos. Chem. and Phys.*, 20(24):16089-16116. <https://doi.org/10.5194/acp-20-16089-2020>
- Pattiaratchi Ch.; Masselink, G. (1997). *Sea Breeze Effects on Nearshore Coastal Processes*. 25th International Conference on Coastal Engineering, New York. American Society of Civil Engineers, 4:4200-4213. <https://doi.org/10.1061/9780784402429.325>
- Pérez, A.; Ortiz, J.; Bejarano, L.; Otero, L.; Restrepo, J.; Franco, A. (2018). Sea breeze in the Colombian Caribbean coast. *Atmósfera*, 31:389-406. <https://doi.org/10.20937/ATM.2018.31.04.06>
- Pielke, R.; Segal, M. (1986). Mesoscale Circulations Forced by Differential Terrain Heating. In: Ray P.S. (eds) *Mesoscale Meteorology and Forecasting*. American Meteorological Society, Boston, MA. 516-548. [https://doi.org/10.1007/978-1-935704-20-1\\_22](https://doi.org/10.1007/978-1-935704-20-1_22)
- Posada-Marín, J.; Rendón, A.; Salazar, J. F.; Mejía, J.; Villegas, J. C. (2018). WRF downscaling improves ERA-Interim representation of precipitation around a tropical Andean valley during El Niño: Implications for GCM-scale simulation of precipitation over complex terrain. *Climate Dynamics*, 52: 3609-3629. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4403-0>
- Rani, I.; Ramachandran, R.; Subrahmanyam, B.; Alappattu, D.; Kunhikrishnan, P. (2010). Characterization of sea/land breeze circulation along the west coast of Indian sub-continent during pre-monsoon season. *Atmospheric Research*, 95: 367-378. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.10.009>
- Ribeiro, F.; Oliveira, A.; Soares, J.; de Miranda, R.; Barlage, M.; Chen, F. (2018). Effect of sea breeze propagation on the urban boundary layer of the metropolitan region of Sao Paulo, Brazil. *Atmospheric Research*, 214:174-188. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.07.015>
- Salvador, N.; Lariato, A. G.; Santiago, A.; Albuquerque, T. T.; Reis, N. C.; Santos, J. M.; Landulfo, E.; Moreira, G.; Lopes, F.; Held, G.; Moreira, D. M. (2016). Study of the thermal internal boundary layer in sea breeze conditions using different parameterizations: Application of the WRF model in the Greater Vitória region. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31: 593-609. <https://doi.org/10.1590/0102-7786312314b20150093>

- Salvador, R; Millán, M. (2003). Análisis histórico de las brisas en Castellón. *TETHYS, Revista de Meteorología*, 2:21-19. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7411981>
- Sills, D. M. L. (1998). *Lake and land breezes in southwestern Ontario: Observations, analyses and numerical modeling*. PhD dissertation. York University. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:128731413>
- Simpson, J. (1994). *Sea breeze and local winds*. Cambridge. <https://www.cambridge.org/0521025958>
- Steele, C. J.; Dorling, S. R.; Von Glasow, R.; Bacon, J. (2013). Idealized WRF model sensitivity simulations of sea breeze types and their effects on offshore windfields. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 443-461. <https://doi.org/10.5194/acp-13-443-2013>