

Variabilidad estacional e interanual del viento en los datos del reanálisis NCEP/NCAR en la cuenca Colombia, mar Caribe

Seasonal and interannual wind variability into the NCEP/NCAR reanalysis data on the Colombian basin, Caribbean sea

Mauricio A. Ruiz-Ochoa¹ & Gladys Bernal Franco²

1. Mg. en Ingeniería - Recursos Hidráulicos, Est. Doctorado en Ingeniería Recursos - Hidráulicos,

2. Dra. en Ciencias en Ecología Marina, Profesora Asistente,

*Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín
gbernal@unal.edu.co*

Recibido para evaluación: 25 de Agosto de 2009 / Aceptación: 18 de Septiembre de 2009 / Versión Final: 30 de Septiembre de 2009

Resumen

Se realizó un estudio de los vientos superficiales en los datos del reanálisis NCEP/NCAR sobre la cuenca Colombia. Para verificar la información, los datos se compararon con fuentes directas (ICOADS y boya Caribe central 42085) en una localidad costera y otra oceánica. Se encontró que el reanálisis suaviza los vientos y los datos se ajustan mejor en la localidad oceánica. Se analizó la variabilidad estacional e interanual de la cuenca. La variabilidad espacio temporal de los vientos está dominada por la acción del chorro tropical superficial del Caribe. Se delimitaron espacialmente cuatro regiones: sur (esquina Urabá-Morrosquillo), occidental (San Andrés y Providencia), central (chorro tropical superficial del Caribe), y norte. El chorro intensifica las velocidades y la cobertura espacial en DEF (diciembre-febrero) y las disminuye en SON (septiembre-noviembre). JJA (junio-agosto) registra las mayores velocidades del núcleo del chorro ($\geq 11 \text{ m s}^{-1}$), pero su cobertura espacial se reduce. En DEF y MAM (marzo-mayo) la velocidad del núcleo del chorro respecto a la media es menor durante El Niño (aumentan las frecuencias de vientos débiles), mientras que en JJA y SON la velocidad es mayor (aumentan las frecuencias de vientos fuertes). En La Niña ocurre lo contrario. La variabilidad estacional e interanual del chorro responde a los gradientes de presión y temperatura superficial de la región, así como a la influencia del Pacífico tropical y el Atlántico Norte.

Palabras Clave: Viento, Reanálisis NCEP/NCAR, Chorro tropical superficial del Caribe, Cuenca Colombia.

Abstract

A study of surface winds into the NCEP/NCAR reanalysis data on the Colombian Basin was performed. To verify the information, the data were compared with direct sources (ICOADS and Central Caribbean buoy 42085) in a coastal and an oceanic site. It was found that the reanalysis smoothes the winds and the data fit better in the oceanic locality. The seasonal and interannual variability of the basin was analyzed. The spatial and temporal variability of the winds is dominated by the Caribbean low level jet. Four regions were spatially delimited: South (Urabá-Morrosquillo corner), West (San Andres y Providencia), Central (Caribbean low level jet) and North. The speed and spatial extent of the jet is intensified in DJF (December-February) and decreases in SON (September-November). JJA (June-August) records the highest velocities in the core jet ($\geq 11 \text{ m s}^{-1}$), but the spatial extent is reduced. During El Niño, in DJF and MAM (March-May) the velocity of the core jet is lower compared to the average (the frequencies of weak winds increase), while in JJA and SON the speed is higher (the frequencies of strong winds increase). In La Niña the opposite occurs. Seasonal and interannual variability of the jet responds to pressure gradients and surface temperature of the region as well as to the influence of the tropical Pacific and the North Atlantic.

Key Words: Wind, NCEP/NCAR Reanalysis, Caribbean low level jet, Colombian Basin.

1. Introducción

El sistema océano-atmósfera es controlado por la radiación solar, que hace a los trópicos más calientes que los polos e induce la dinámica de la atmósfera y el océano (Gill, 1982; Peixoto y Oort, 1992). Este forzamiento produce gradientes de presión que a su vez generan los vientos (Gill, 1982). Sobre el océano, los vientos transfieren momentum a la superficie para producir corrientes u olas, además la acción de los vientos se relaciona con otras variables oceánicas como la temperatura superficial y el nivel del mar (Powell et al., 2003).

A lo largo de la historia, los vientos se han estudiado a partir de tres fuentes de información: boyas y plataformas, modelos numéricos y satélites (McIntosh y Hubbert, 1992), siendo estas dos últimas de creciente interés. Aunque las boyas son continuas en el tiempo no ocurre lo mismo en el espacio y los barcos registran datos esparcidos tanto en tiempo como en espacio (Stewart, 2008). Sin embargo, la calidad de los datos in situ (boyas y plataformas) sirven como fuentes de calibración para la información obtenida de los modelos y los satélites.

El reanálisis climático del Centro Nacional para la Predicción Ambiental/Centro Nacional para las Investigaciones Atmosféricas (NCEP/NCAR, por sus iniciales en inglés) de Estados Unidos (Kalnay et al., 1996), ha producido registros globales atmosféricos por más de 60 años con el fin de apoyar las necesidades investigativas de la comunidad científica, utilizando un modelo de dinámica de asimilación de datos con variadas resoluciones espaciales y temporales a diferentes niveles atmosféricos en todo el mundo, apoyado en una red de más de 18,000 puntos para las variables: viento, temperatura y presión, entre otras. Por su parte, la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA, por sus iniciales en inglés) de Estados Unidos, por más de un siglo ha colectado, editado y digitalizado millones de datos obtenidos de boyas, plataformas y observaciones de barcos mercantiles (Woodruff et al., 1987; Worley et al., 2005). El resultado de este trabajo es el Conjunto de Datos Internacional Integrado sobre los Océanos y la Atmósfera (ICOADS, por sus iniciales en inglés), con el cual se ha estudiado el forzamiento atmosférico sobre el océano (Stewart, 2008).

Sobre la cuenca Colombia, los únicos registros instrumentales de viento disponibles son dos boyas oceánicas y algunas estaciones meteorológicas en las costas (aeropuertos); así que la información oceánica debe ser obtenida de modelos de reanálisis atmosféricos globales como NCEP/NCAR (Magaña et al., 1999; Wang, 2007; Whyte et al., 2008) y ERA-40 (Muñoz et al., 2008); y de satélites (Andrade, 1993; Amador, 2008). Los primeros trabajos sobre los vientos en la cuenca Colombia (Pujos, 1986; Andrade, 1993), analizan la distribución espacial de la velocidad del viento para las épocas climáticas seca (diciembre-febrero, DEF) y húmeda (septiembre-noviembre, SON) en relación con los vientos Alisios. Entre otros reportan que durante la época húmeda los vientos Alisios del suroeste son fuertes y atraviesan el istmo de Panamá hacia el centro de la cuenca Colombia, pero esta incursión directa desde el Pacífico no aparece registrada en los estudios recientes que han utilizado como fuentes de datos el satélite QuikScat (Amador et al., 2006; Amador, 2008) y el reanálisis NCEP/NCAR (Poveda y Mesa, 1999; Andrade, 2000; Mora y Amador, 2000; Wang, 2007; Amador, 2008; Whyte et al., 2008).

En la atmósfera la existencia de chorros atmosféricos ha sido observada a diferentes niveles, en distintas épocas climáticas y en muchas regiones alrededor del mundo (Stensrud, 1996), p.e., Norte y Sur América, África, Australia, Asia y la Antártica (Whyte et al., 2008 y referencias adentro). La cuenca Colombia está influenciada directamente por el chorro tropical superficial del Caribe (también conocido como chorro de bajo nivel de los mares Intra-Americanos, chorro tropical superficial de San Andrés y/o chorro de bajo nivel en el oeste del Caribe) cuyo núcleo se localiza en 15°N, 75°W (Amador, 1998; Poveda, 1998) y es responsable del clima seco sobre La Guajira debido a la alta divergencia de humedad asociada a la dinámica del mismo (Poveda y Mesa, 1999; Andrade, 2000). Sin embargo, hasta los trabajos de Wang (2007), Amador (2008), Muñoz et al. (2008) y Whyte et al. (2008), la literatura sobre este chorro era escasa.

Los trabajos anteriores se concentran en la acción del chorro, su estructura vertical y su variabilidad temporal; otros trabajos regionales sobre el clima del mar Caribe no contienen detalles de la cuenca Colombia (Amador et al., 2006; Curtis y Gamble, 2007). El efecto de El Niño/Oscilación del Sur (ENSO, por sus iniciales en inglés) sobre la climatología de la región también se

ha estudiado en variables relacionadas como temperatura superficial del mar (Alexander y Scott, 2002; Bernal *et al.*, 2006), precipitación (Amador, 1998; Curtis y Gamble, 2007) y caudales (Poveda, 2004; Poveda *et al.*, 2006). En este trabajo se hace un estudio de la variabilidad espacio temporal del viento en los datos del reanálisis NCEP/NCAR sobre la cuenca Colombia, dado que ésta es una de las bases de datos más usadas (Mora y Amador, 2000; Amador *et al.*, 2006) y es continua en tiempo y espacio. El objetivo principal es verificar los datos del reanálisis a partir de la información *in situ* más confiable disponible y entender la variabilidad estacional e interanual de los vientos superficiales sobre toda la cuenca a una escala apropiada, teniendo en cuenta las oscilaciones de la velocidad y dirección del viento. Se presentan resultados de las medias trimestrales

sobre rosas de viento en cuadrantes de $1.88^\circ \times 1.905^\circ$ y la comparación de las medias de años El Niño, normales y La Niña.

2. Materiales y métodos

La cuenca Colombia es una de las cinco cuencas del mar Caribe que con el Golfo de México forman el mar Mediterráneo Americano (Tomczak y Godfrey, 1994). Limita al norte con Jamaica, Haití y República Dominicana, al sur con el margen continental de Colombia, Panamá y Costa Rica, al este con la elevación Beata y al oeste con la elevación centroamericana. El área de estudio se ubica entre las latitudes $8^\circ - 16^\circ\text{N}$ y las longitudes $83^\circ - 71^\circ\text{W}$ (Fig. 1).

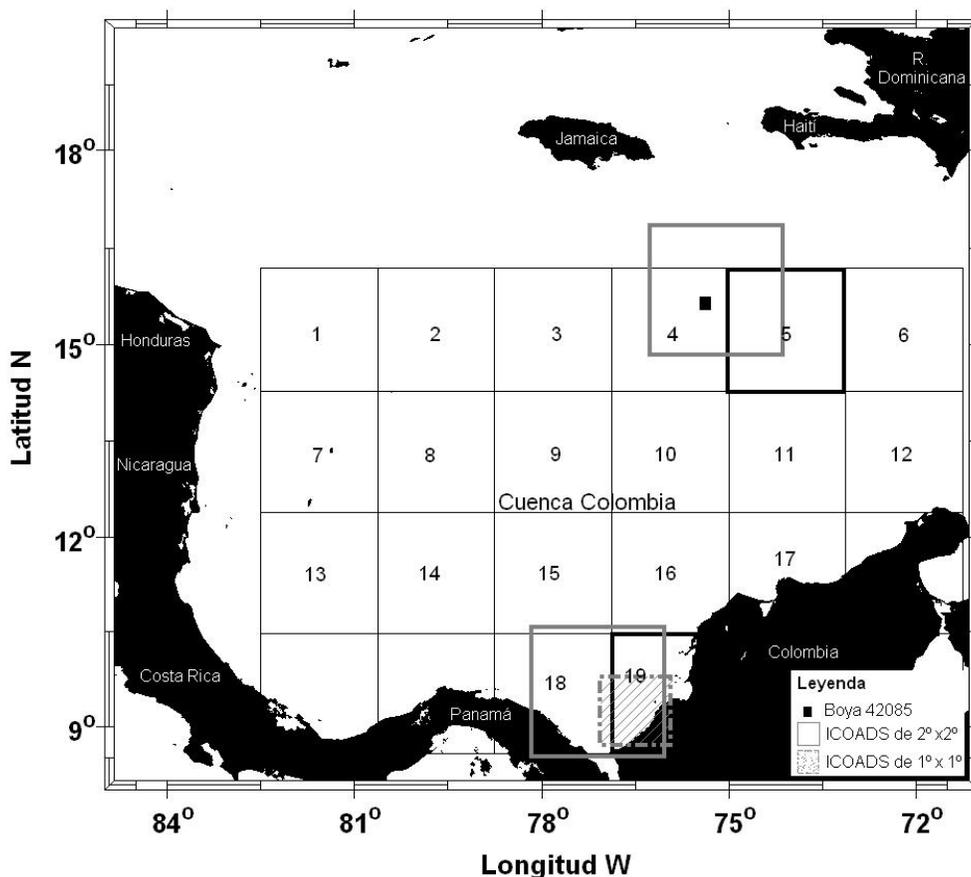


Figura 1. Área de estudio y ubicación de los datos del reanálisis NCEP/NCAR, del ICOADS y de la boya Caribe central (42085). Los cuadrantes enumerados corresponden a los datos del reanálisis y los utilizados en la comparación fueron resaltados (5, localidad oceánica; 19, localidad costera).

Para el Caribe colombiano, se obtuvieron datos de las componentes zonal (u) y meridional (v) del viento a 10 m de altura del reanálisis NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996), con periodo de registro entre Ene/1948 y Dic/2006, resolución espacial de $1.88^\circ \times 1.905^\circ$ y resolución temporal mensual (NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, Web: <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html>). Para la comparación con otros registros, también se usaron los datos mensuales de las componentes zonal (u) y meridional (v) del viento a 10 m de altura de dos localidades, una costera y otra oceánica provenientes del ICOADS (Worley et al., 2005), para dos resoluciones espaciales: de $2^\circ \times 2^\circ$ con registro entre Ene/1800 y Dic/2006; y de $1^\circ \times 1^\circ$ con registro entre Ene/1960 y Dic/2006 (NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, Web: <http://icoads.noaa.gov/data.icoads.html>). En la localidad oceánica, además se obtuvieron datos de dirección y velocidad del viento de la boya Caribe central (42085), localizada en $15.093N - 75.064W$ con registro mensual entre Jun/2005 y Dic/2006, provenientes de la NOAA, Centro Nacional de Datos de Boyas (NDBC, por sus iniciales en inglés) (Web: www.ndbc.noaa.gov/).

En la comparación de los datos del reanálisis NCEP/NCAR, del ICOADS y de la boya Caribe central (42085), se calcularon diagramas de la distribución de frecuencias por direcciones (rosas de viento) de las tres fuentes completas, y se examinó el grado de dependencia lineal durante el periodo en común. Así, en la localidad costera, se correlacionaron las series de tiempo entre Ene/1948 y Dic/2006 y en la localidad oceánica entre Jun/2005 y Dic/2006. La confiabilidad en estas estimaciones fue determinada para un nivel de significancia estadística del 95%.

A partir de las series de tiempo del reanálisis NCEP/NCAR (cuadrantes enumerados, Fig. 1), se calcularon los valores estadísticos descriptivos, los ciclos anuales y las rosas de viento. Estos valores fueron representados espacialmente para los cuatro trimestres del año y para los años El Niño y La Niña. Con estas gráficas se analizó la variabilidad estacional del viento en la cuenca y su comportamiento durante los eventos ENSO en cada uno de los trimestres que representan el clima de Colombia (Mesa et al., 1997; DEF, MAM marzo-mayo, JJA junio-agosto y SON). Los años El Niño y La Niña fueron diferenciados de un año normal, con ayuda del Índice Oceánico de El Niño (ONI, por sus iniciales en inglés), Web: www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml.

Para los cálculos de los valores estadísticos descriptivos, ciclos anuales y análisis de correlación se utilizó el software Matlab® 2007 y para las rosas de vientos el software libre WRPLOT View™ - Lake Environmental Software, versión 5.9.

3. Resultados

En la Figura 2 se presenta la comparación de las rosas de vientos y las series de tiempo de dirección y velocidad del viento en los datos del reanálisis NCEP/NCAR e ICOADS en la localidad costera. Los datos del reanálisis mostraron una frecuencia de 42% de vientos del noreste (velocidades entre 3.6 y 8.8 m s^{-1}), y 39% de vientos del este (velocidades entre 2.1 y 5.7 m s^{-1}), mientras que en los datos de ICOADS dominaron vientos tanto del norte (34-35% con velocidades entre 0.5 y 11.1 m s^{-1}), como del noreste (24-34% con velocidades entre 2.1 y mayores a 11.1 m s^{-1}). Reanálisis suaviza las velocidades pero conserva la variabilidad general, mientras que hay diferencias marcadas en cuanto a la dirección. Efectivamente, los coeficientes de correlación entre las bases de datos del reanálisis e ICOADS son de 0.22 a 0.25 para la dirección y de 0.4 a 0.42 para la velocidad. Estos valores son bajos pero estadísticamente significativos.

En la localidad oceánica, en cambio, las tres fuentes de datos mostraron que la frecuencia predominante del viento fue la componente este (Fig. 3), en un 90% para el reanálisis con velocidades entre 3.6 y 8.8 m s^{-1} ; en un 85% para el ICOADS de $2^\circ \times 2^\circ$ con velocidades entre 3.6 y mayores a 11.1 m s^{-1} ; y en un 95% para la boya Caribe central (42085) con velocidades entre 5.7 y mayores a 11.1 m s^{-1} . Las series de tiempo de la dirección del viento para las tres fuentes de datos también mostraron un buen ajuste. Para la velocidad se encontró que los datos del reanálisis están subestimados, mientras que los del ICOADS de $2^\circ \times 2^\circ$ se ajustan a los resultados de la boya Caribe central (42085). Los coeficientes de correlación entre la boya Caribe central (42085), el reanálisis y el ICOADS de $2^\circ \times 2^\circ$ se presentan en la Tabla 1. Los coeficientes encontrados fueron altos y estadísticamente significativos. La base de datos de reanálisis tiene una alta correlación con los datos de la boya (0.9 y 0.92 para dirección y velocidad, respectivamente) pero más baja con los datos de ICOADS de $2^\circ \times 2^\circ$ (0.61 y 0.72).

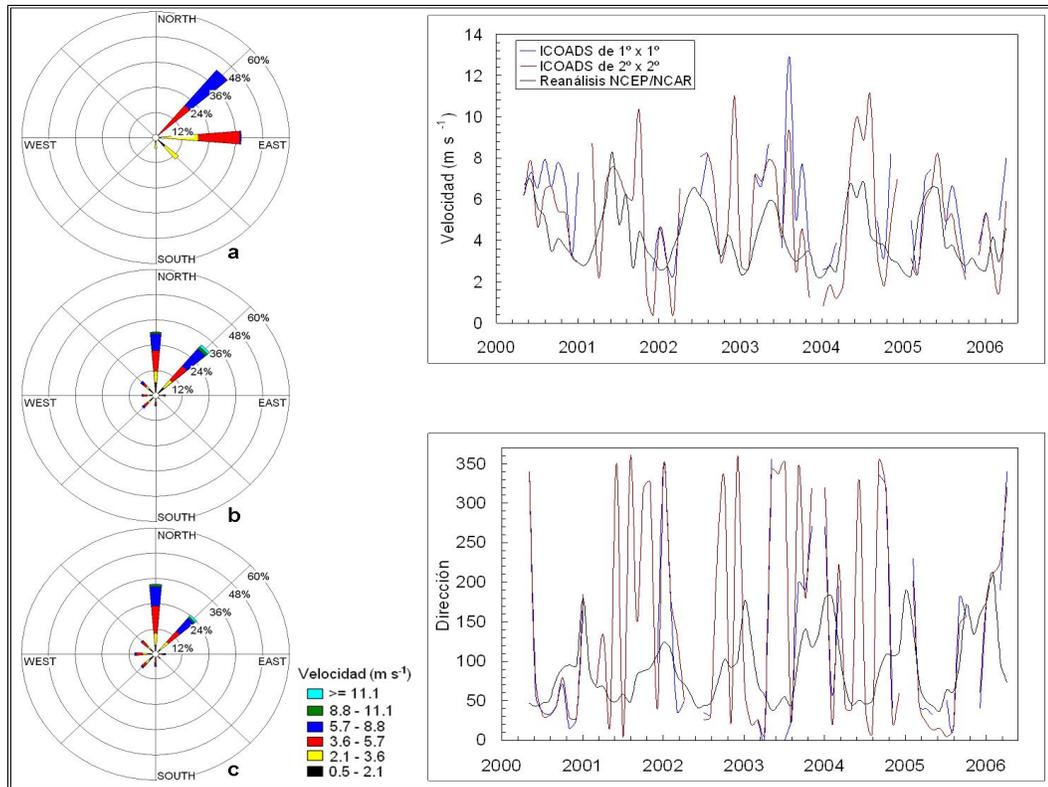


Figura 2. Comparación de la información de las bases de datos en la localidad costera. Izquierda: frecuencias por direcciones del viento de (a) reanálisis NCEP/NCAR, (b) ICOADS de 2° x 2°, y (c) ICOADS de 1° x 1°. Derecha: velocidad del viento (panel superior) y dirección del viento (panel inferior).

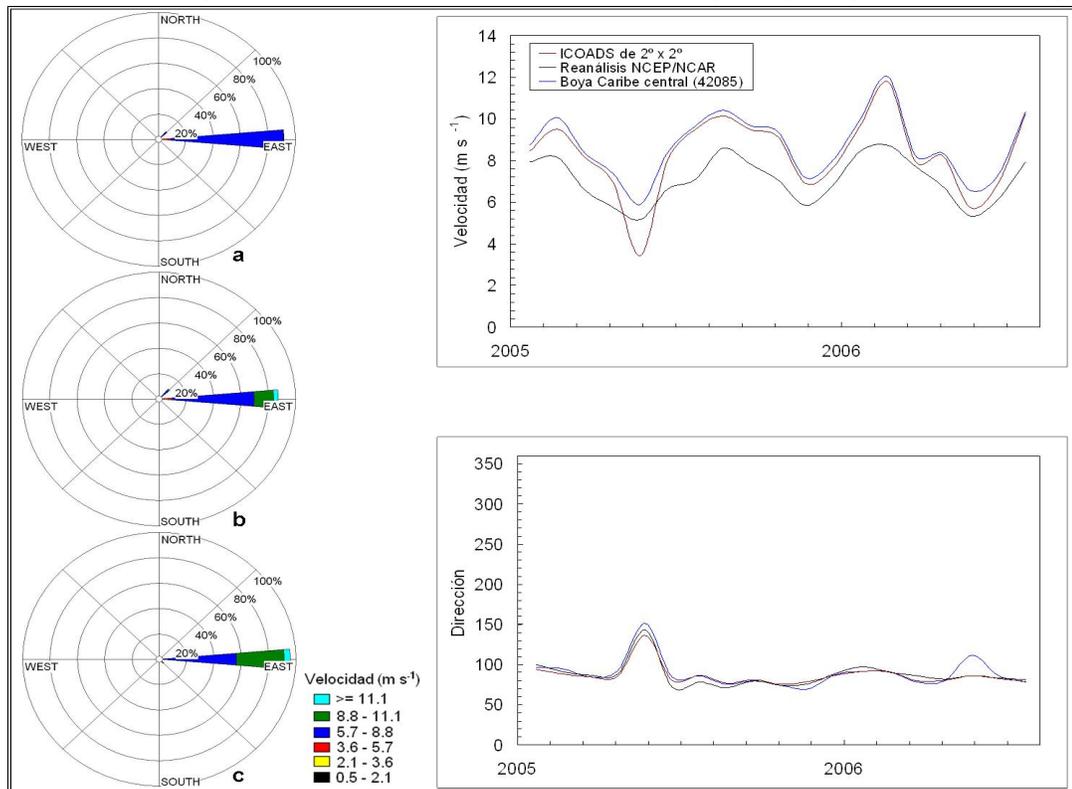


Figura 3. Comparación de la información de las bases de datos en la localidad oceánica. Izquierda: frecuencias por direcciones del viento de (a) reanálisis NCEP/NCAR, (b) ICOADS de 2° x 2°, y (c) boya Caribe central (42085). Derecha: velocidad del viento (panel superior) y dirección del viento (panel inferior).

Tabla 1. Coeficientes de correlación del viento en la localidad oceánica entre la boya Caribe central (42085), el reanálisis NCEP/NCAR y el ICOADS de 2° x 2°.

	Coeficiente de correlación (<i>r</i>)		
	Boya Caribe central (42085) – reanálisis NCEP/NCAR	Boya Caribe central (42085) – ICOADS de 2° x 2°	Reanálisis NCEP/NCAR – ICOADS de 2° x 2°
Dirección	0.90	0.93	0.61
<i>p</i> -valor	0.000	0.000	0.000
Velocidad (m s ⁻¹)	0.92	0.97	0.72
<i>p</i> -valor	0.000	0.000	0.000

La distribución espacial de las series de tiempo de la velocidad del viento sobre la cuenca Colombia para los datos del reanálisis NCEP/NCAR (Fig. 4), permitieron identificar cuatro regiones: sur (esquina Urabá-Morrosquillo), con velocidad media de 4.6 m s⁻¹; occidental (San Andrés y Providencia), con velocidad media

de 5.3 m s⁻¹; central (chorro tropical superficial del Caribe), con velocidad media de 8.2 m s⁻¹; y norte con velocidad media de 7.0 m s⁻¹. Las mayores oscilaciones de los vientos ocurren en las regiones central y sur, con valores de ± 1.6 y 1.7 m s⁻¹. Las otras regiones presentaron oscilaciones de ± 1.1 m s⁻¹.

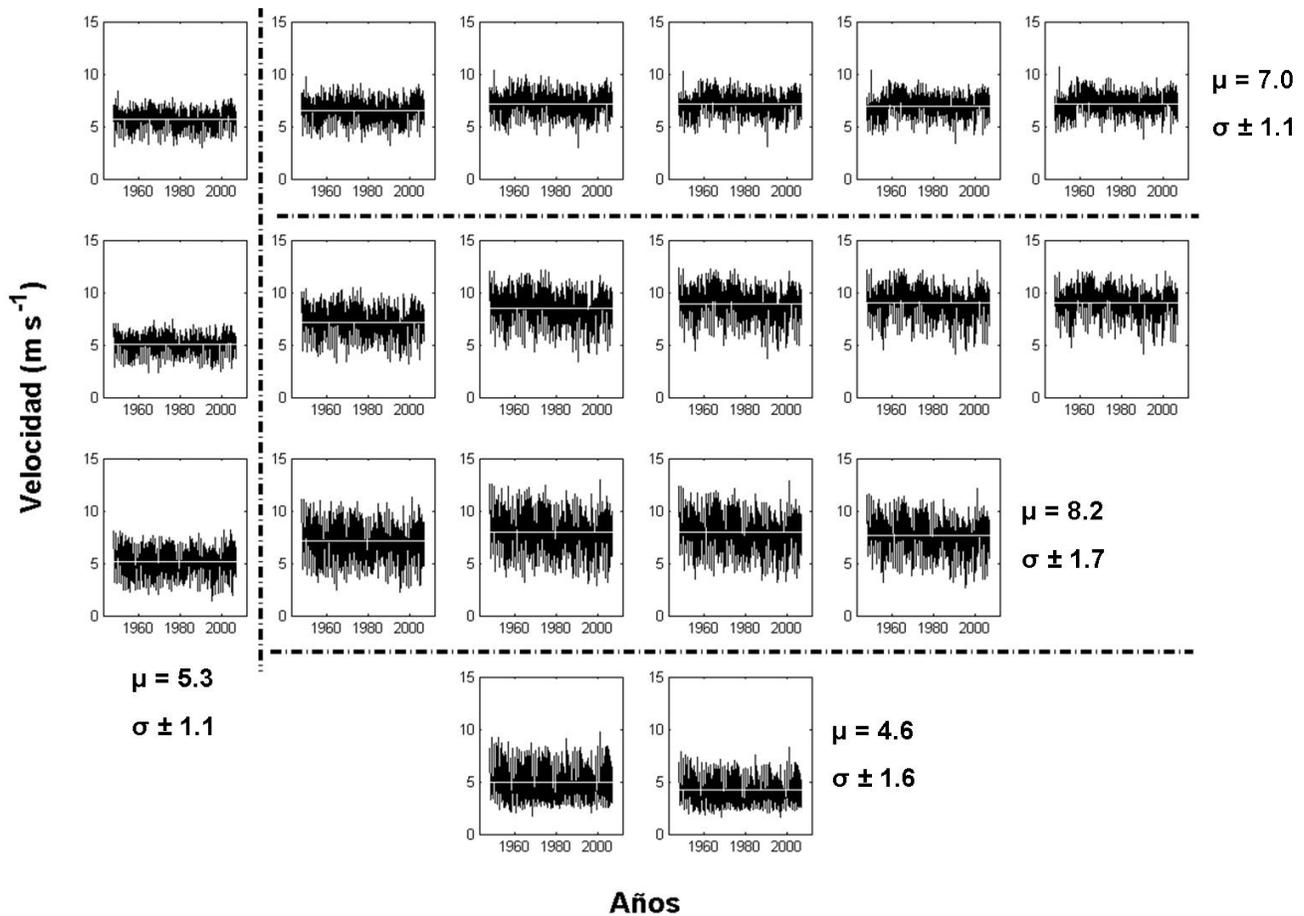


Figura 4. Distribución espacial de las series de tiempo de la velocidad del viento sobre la cuenca Colombia (valor medio resaltado). μ y σ corresponden al promedio y a la desviación estándar por región en m s⁻¹.

El promedio mensual de la velocidad del viento evidenció la presencia del chorro tropical superficial del Caribe y su variabilidad estacional (Fig. 5). El chorro se intensifica (en velocidad y cobertura espacial) en DEF con velocidades mayores a 8 m s^{-1} y disminuye en SON con velocidades cercanas a 6 m s^{-1} . Las mayores velocidades ($\geq 11 \text{ m s}^{-1}$) se presentan en el trimestre JJA cuando la componente zonal del chorro es dominante y el núcleo reduce su cobertura espacial. Los ciclos anuales de la velocidad del viento sobre la cuenca (no mostrados) son bimodales, mostrando la variabilidad trimestral indicada

anteriormente. En la región central los ciclos anuales son más amplios que en las otras regiones (5 m s^{-1}) y los vientos medios mensuales durante el verano (JJA) son más fuertes que durante la época seca principal (DEF). En la región sur (esquina Urabá-Morrosquillo) los vientos durante el verano son menos intensos que durante la época seca principal, mientras que en la región norte y occidental la intensidad de los vientos en las dos épocas secas es similar. La menor amplitud del ciclo anual (2 m s^{-1}) ocurre en la región occidental (San Andrés y Providencia).

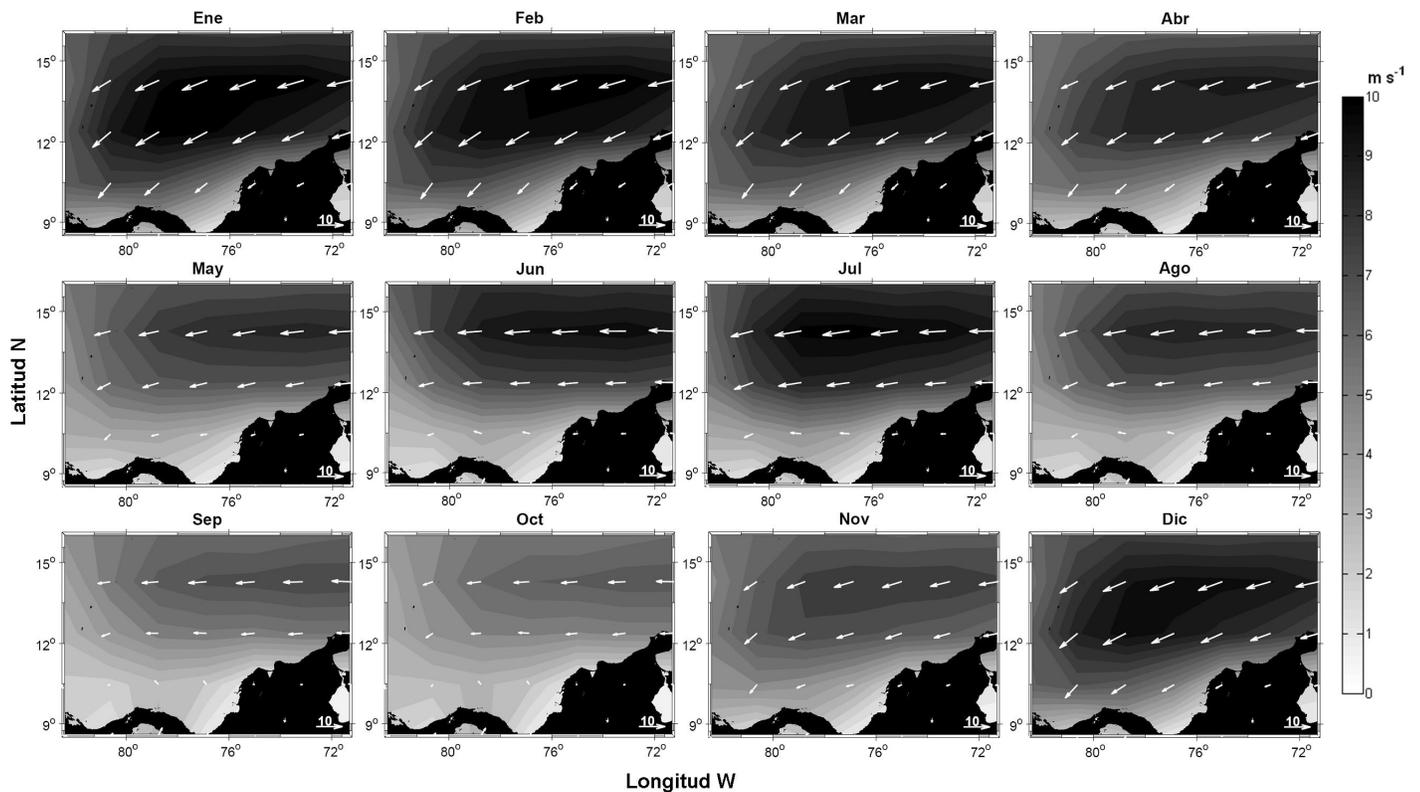


Figura 5. Ciclo anual de la velocidad media del viento sobre la cuenca Colombia.

En la Figura 6 se presentan las rosas de viento para DEF y MAM. Para estos trimestres se diferenciaron tres regiones. DEF (Fig. 6a): región sur-occidental con un dominio entre 85 y 100% de vientos del noreste (velocidad $3.6 - 11.1 \text{ m s}^{-1}$); región central con 25 a 97% de vientos del noreste, y 8 a 98% de vientos del este, ambos con velocidades entre 5.7 y mayores a 11.1 m s^{-1} ; y región norte con vientos del este entre 25 y 97% del tiempo (velocidad $5.7 - 11.1 \text{ m s}^{-1}$), y vientos del noreste entre 5 y 78%

(velocidad $3.6 - 8.8 \text{ m s}^{-1}$). MAM (Fig. 6b): región sur con vientos del noreste entre 58 y 100% (velocidad $2.1 -$ mayores a 11.1 m s^{-1}), y vientos del este entre 8 y 42% (velocidad $2.1 - 8.8 \text{ m s}^{-1}$); región central con dominio de vientos del este entre 48 y 100% (velocidad $3.6 -$ mayores a 11.1 m s^{-1}); y región norte con vientos del este en un 80 y 100% (velocidad $3.6 - 8.8 \text{ m s}^{-1}$).

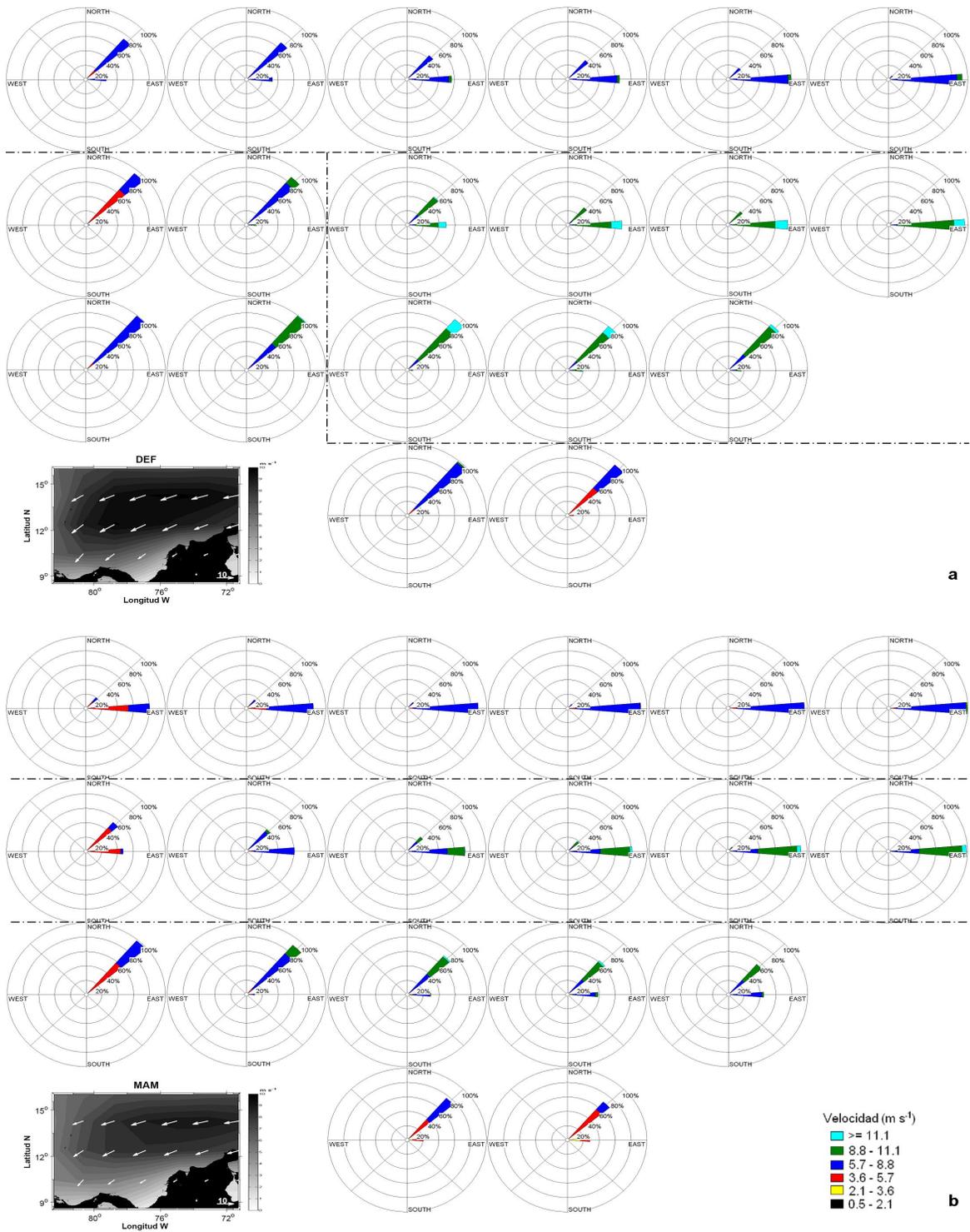


Figura 6. Distribución de las frecuencias por dirección del viento sobre la cuenca Colombia para (a) Diciembre- Febrero y (b) Marzo -Mayo.

Las direcciones e intensidades de los vientos para JJA (Fig. 7a) mostraron tres regiones donde domina la dirección del este en más del 70% pero con velocidades diferentes y una zona puntual al occidente con dirección dominante del noreste. La región sur

presentó velocidades entre 2.1 y 5.7 m s⁻¹; la región central entre 3.6 m s⁻¹ y mayores a 11.1 m s⁻¹; la región norte entre 3.6 y 11.1 m s⁻¹; y la localidad puntual occidental entre 2.1 y 8.8 m s⁻¹. Para el trimestre SON (Fig. 7b) se encontraron cuatro regiones: sur

con frecuencias tanto del este y como del sureste entre 37 y 40% (velocidad 2.1 - 5.7 m s⁻¹); occidental con vientos del noreste entre 40 y 80% del tiempo (velocidad 2.1 - 8.8 m s⁻¹); central

con dominio de vientos del este entre 78 y 98% (velocidad 3.6 - 11.1 m s⁻¹); y la región norte dominada por vientos del este entre 59 y 97% (velocidad 3.6 - 8.8 m s⁻¹).

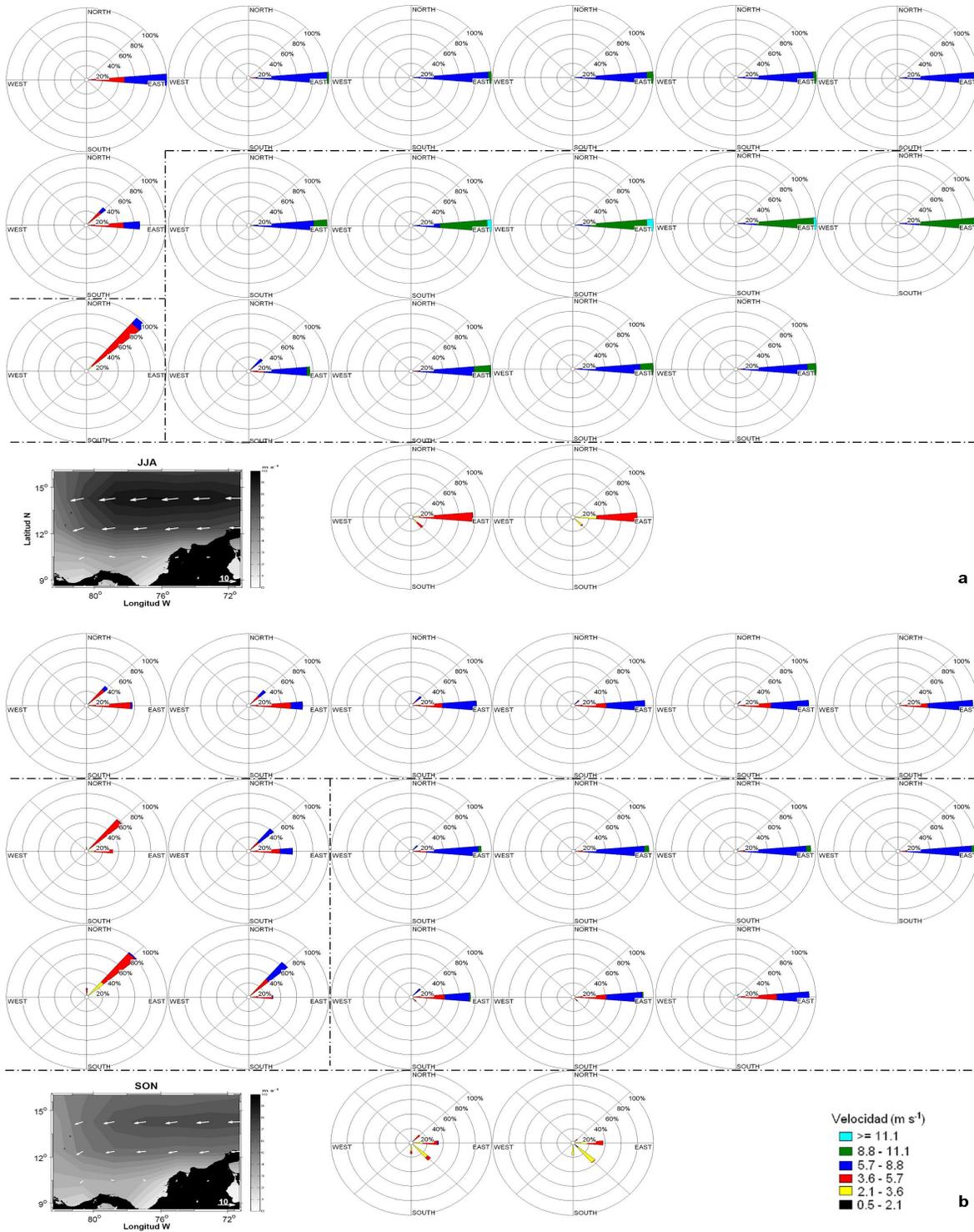


Figura 7. Distribución de las frecuencias por dirección del viento sobre la cuenca Colombia para (a) Junio-Agosto y (b) Septiembre-Noviembre.

La distribución espacial de la velocidad media del viento por trimestres durante los eventos ENSO se presenta en la Figura 8. Se encontró que el ciclo anual de los vientos sobre la cuenca Colombia cambia con este evento macroclimático. Durante los trimestres DEF y MAM la velocidad del núcleo del chorro es

menor durante eventos El Niño y mayor durante eventos La Niña respecto a la media, mientras que para los periodos JJA y SON ocurre lo contrario (intensificación de la velocidad en periodos El Niño y disminución en periodos La Niña).

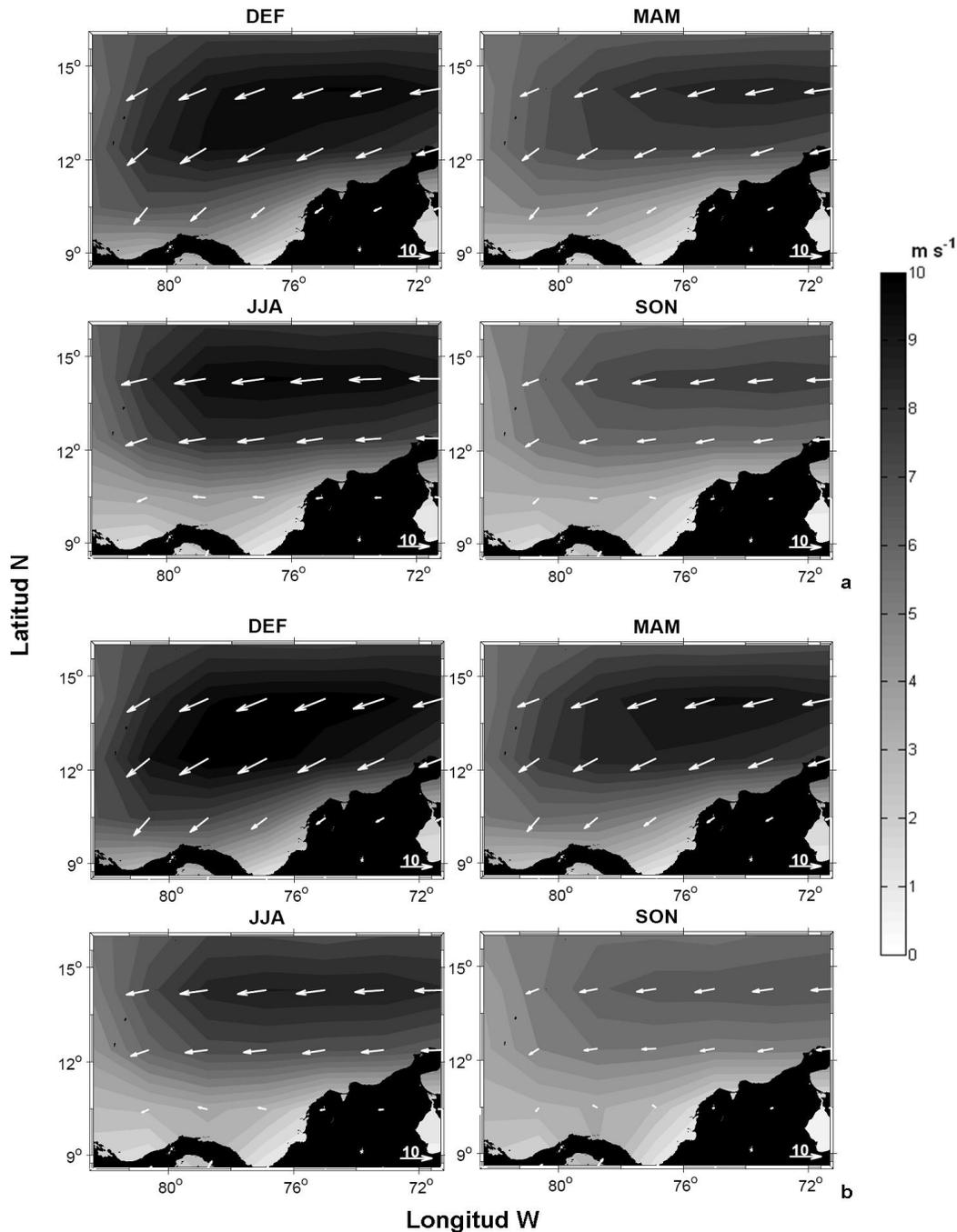


Figura 8. Distribución espacial trimestral de la velocidad media del viento durante los eventos ENSO, (a) El Niño y (b) La Niña, sobre la cuenca Colombia.

En el análisis interanual de las rosas de viento (figuras no mostradas), se encontró que durante El Niño las direcciones no cambian, sólo en el trimestre SON se intensifica la dirección noreste en la región occidental. En los trimestres DEF y MAM, aumentan las frecuencias de vientos débiles, mientras que para JJA y SON las frecuencias que aumentan son las de vientos fuertes. Durante La Niña se presenta todo lo contrario, pero para el trimestre SON aparecen direcciones del norte y sureste que no se presentan durante los años normal y/o El Niño.

4. Discusión

La comparación de los datos de viento mensuales del reanálisis NCEP/NCAR sobre la cuenca Colombia con otras fuentes de datos de la región mostró que el reanálisis en general suaviza los campos de velocidad del viento, tal como se ha descrito antes para esta fuente de información (Magaña et al., 1999; Caires et al., 2004; Amador, 2008). También los vientos del reanálisis se ajustan mejor a los datos medidos in situ en la localidad oceánica que en la costera. En esta última mostraron dominancia las direcciones del noreste y del este, en tanto que para los datos del ICOADS, dominan vientos del noreste y del norte. La componente norte no aparece registrada en los datos de reanálisis, como tampoco lo hace la componente este en los datos del ICOADS. En cambio, para la localidad oceánica, las tres fuentes de datos mostraron vientos predominantes del este. Estas diferencias entre localidades posiblemente se deben a la influencia de la orografía local, tal como lo demuestran Leal y Lavín (2002) en la comparación del viento costero y marino de la región norte del Golfo de California, quienes reportan que el viento costero está dominado por el régimen de brisas, mientras que el viento marino no. Por tanto los datos de viento de reanálisis no serían adecuados para estudios locales en la zona costera y en la siguiente discusión se debe tener en cuenta tanto la escala trabajada (mensual) como la incertidumbre de los datos cerca de la costa.

Se encontró que los vientos superficiales sobre la cuenca Colombia delimitan espacialmente cuatro regiones: sur, occidental, central y norte. La región central, que coincide con el chorro tropical superficial del Caribe, presenta las mayores velocidades (media de 8.2 m s^{-1}) y oscilaciones ($\pm 1.7 \text{ m s}^{-1}$) del viento, ciclos anuales

más amplios (5 m s^{-1}) y direcciones dominantes del este. La región sur presenta los vientos más débiles (media de 4.6 m s^{-1}) y variables en velocidad y dirección (sin embargo, es una región costera y estos resultados no son conclusivos); aquí los vientos durante el veranillo son menos intensos que durante la época seca principal. Las regiones norte y occidental son menos variables que las anteriores ($\pm 1.1 \text{ m s}^{-1}$); en la región norte dominan vientos del este más intensos (media de 7.0 m s^{-1}) y en la occidental vientos del noreste menos intensos (media de 5.3 m s^{-1}). El ciclo anual en la región occidental presenta la menor amplitud en la cuenca (2 m s^{-1}).

El chorro tropical superficial del Caribe intensifica las velocidades y la cobertura espacial en DEF y las disminuye en SON; durante el veranillo (JJA) se registran las mayores velocidades en el núcleo ($\geq 11 \text{ m s}^{-1}$), pero la menor cobertura espacial. La variabilidad espacial del viento por trimestres climáticos mostró que durante DEF y MAM la velocidad del núcleo del chorro respecto a la media es menor durante El Niño (aumentan las frecuencias de vientos débiles) y mayor durante La Niña (aumentan las frecuencias de vientos fuertes). En DEF la cuenca Colombia está dominada por vientos del noreste y del este y no se encontraron diferencias en las direcciones entre años normales, El Niño y La Niña. En MAM gran parte de la cuenca está dominada por vientos del este y sólo la región sur presenta vientos del noreste. En los periodos JJA y SON la velocidad del núcleo del chorro se intensifica durante El Niño (aumentan las frecuencias de vientos fuertes) y disminuye durante La Niña (aumentan las frecuencias de vientos débiles), pero la dirección este del viento sigue dominando en la cuenca. En SON aparecen frecuencias del noreste y sureste que no se presentan durante años normal y/o El Niño.

Es evidente que la variabilidad espacio temporal de los vientos sobre la cuenca Colombia está dominada por la acción del chorro tropical superficial del Caribe. La variabilidad temporal de este chorro ha sido objeto de varias investigaciones (Poveda, 1998; Amador, 1998, 2008; Poveda y Mesa, 1999; Wang, 2007; Muñoz et al., 2008; Whyte et al., 2008), que coinciden con este trabajo en la descripción de su comportamiento estacional e interanual. La variabilidad estacional del chorro y su carácter semianual han sido relacionados con los gradientes meridionales de presión atmosférica y temperatura superficial del mar en la región (Muñoz

et al., 2008; Whyte et al., 2008), en una retroalimentación positiva (Wang, 2007): por un lado, estos gradientes producen el chorro y por otro el chorro produce un rotacional del viento positivo al norte del núcleo y uno negativo al sur (Andrade, 2000), los cuales tienden a calentar el norte y enfriar el sur, manteniendo el gradiente. La variabilidad semianual también ha sido relacionada con el alto de presión subtropical del Atlántico Norte o de las Azores (Wang, 2007; Muñoz et al., 2008; Amador, 2008): el alto del Atlántico Norte es más fuerte y se ubica hacia el occidente durante el trimestre JJA; en SON se debilita y se mueve hacia el este; en DEF nuevamente se desplaza al oeste y se conecta con el alto de presión de Norte América; en MAM se desarrolla el monzón norteamericano y el alto del Atlántico Norte vuelve a su posición este. El chorro tropical superficial del Caribe se refuerza cuando el alto del Atlántico Norte es más fuerte y está en posición hacia el occidente.

La variabilidad interanual del chorro tropical superficial del Caribe está controlada por el gradiente meridional de temperatura y presión sobre el nivel del mar (Muñoz et al., 2008; Whyte et al., 2008). El aumento y/o disminución de la intensidad del chorro durante eventos ENSO responde al calentamiento del Pacífico tropical y al enfriamiento del Atlántico tropical, lo cual modifica las circulaciones meridionales y zonales que llegan a los mares Intra-Americanos (Muñoz et al., 2008). Según Amador (2008) en la región central, durante El Niño los vientos son más fuertes que un año normal. Pero los resultados encontrados permiten concluir que lo anterior se cumple sólo para los periodos JJA y SON. Por tanto, es importante resaltar que hay una respuesta diferente entre las estaciones climáticas. Tal como lo indica Wang (2007), la correlación del chorro con el ENSO depende de la estación del año ya que las teleconexiones del ENSO son diferentes en DEF y JJA. Anomalías cálidas en el Pacífico tropical en DEF debilitan el chorro, pero durante JJA lo intensifican, debido a que el ENSO induce anomalías de presión en el alto del Atlántico Norte negativas en DEF y positivas en JJA. Wang (2007) también demostró que el chorro tropical superficial del Caribe varía en frecuencias más altas que el ENSO (1.25 y 2.3 años), lo que supone que no es sólo el forzamiento remoto del ENSO quien domina la variabilidad interanual del chorro.

La estacionalidad del chorro del Caribe también ha sido relacionada con la ciclogénesis en la región (Wang, 2007; Amador,

2008), la cual es máxima en SON cuando el chorro es más débil y mínima en JJA cuando el chorro presenta su máximo de velocidad. Un posible mecanismo de esta relación puede ser que los vientos del este del chorro tropical superficial del Caribe incrementan la divergencia del flujo de humedad, haciendo que se suprima la convección, decrezca la precipitación y se suprima la formación de ciclones tropicales. Si este mecanismo es llevado al comportamiento interanual, se podría explicar por qué durante años El Niño los huracanes son menos frecuentes en el Caribe, ya que durante estos eventos, en el trimestre de máxima ciclogénesis, SON, la velocidad del chorro se intensifica, disminuyendo la convección.

5. Conclusiones

Los datos del reanálisis NCEP/NCAR suavizan los campos de vientos y se ajustan mejor a los datos medidos in situ en la localidad oceánica que en la costera. En la localidad costera dominan los vientos del noreste y del este, en tanto que en la localidad oceánica predominan los vientos del este en más de un 85%. Las diferencias pueden deberse a efectos de la orografía en la zona costera, donde se observaron fluctuaciones en las direcciones de los vientos y discrepancias entre las direcciones del reanálisis y de los datos del ICOADS.

Se identificaron cuatro regiones en la cuenca Colombia según los vientos en superficie: sur (esquina Urabá-Morrosquillo), occidental (San Andrés y Providencia), central (chorro tropical superficial del Caribe), y norte. Estas regiones se distinguen en la distribución general de las frecuencias por dirección del viento para los cuatro trimestres climáticos del año, aunque existen variaciones dependiendo principalmente de la intensificación y/o disminución de la región central, dominada por el chorro tropical superficial del Caribe.

La variabilidad espacio temporal de los vientos sobre la cuenca Colombia está dominada por la acción del chorro tropical superficial del Caribe. Este se intensifica (en velocidad y cobertura espacial) en DEF y disminuye en SON. Durante el veranillo (JJA) se registran las mayores velocidades en el núcleo, pero la menor cobertura espacial (el núcleo se concentra a lo largo del eje). El

ciclo anual del chorro está asociado con los gradientes meridionales de presión atmosférica y de temperatura superficial del mar en la región, así como con el alto de presión subtropical del Atlántico Norte.

El ciclo anual de los vientos sobre la cuenca Colombia cambia con la ocurrencia de los eventos ENSO. En DEF y MAM la velocidad del núcleo del chorro respecto a la media es menor durante El Niño (aumentan las frecuencias de vientos débiles) y mayor durante La Niña (aumentan las frecuencias de vientos fuertes). En cambio, en los periodos JJA y SON la velocidad del núcleo del chorro se intensifica durante El Niño (aumentan las frecuencias de vientos fuertes) y disminuye durante La Niña (aumentan las frecuencias de vientos débiles). Esto se debe a que el chorro obedece al forzamiento conjunto de las anomalías cálidas en el Pacífico oriental tropical y de las anomalías de presión en el alto del Atlántico Norte (teleconexiones).

Agradecimientos

Esta investigación fue posible gracias al apoyo del Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología, Francisco José de Caldas (COLCIENCIAS), programa de investigación sobre la gestión del agua en Colombia, del Grupo Red de Cooperación para la Investigación del Agua en Colombia (GRECIA), del cual es parte la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, la Universidad de Antioquia y el IDEAM. Igualmente, se agradece a los proyectos NCEP/NCAR e ICOADS por proveer los datos de las componentes zonal (u) y meridional (v) del viento a 10 m de altura, datos pertenecientes a la NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, Web: <http://www.cdc.noaa.gov/>. Y al Centro Nacional de Datos de Boyas por la información de dirección y velocidad del viento de la boya Caribe central (42085).

Bibliografía

- Alexander, M. y Scott, J., 2002. The influence of ENSO on air-sea interaction in the Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 29(14), DOI: 10.1029/2001GL014347.
- Amador, J., 1998. A climatic feature of tropical Americas: The trade wind easterly jet. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 5 (2), pp. 91-102.
- Amador, J., Alfaro, E., Lizano, O. and Magaña, O., 2006. Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69, pp. 101-142.
- Amador, J., 2008. The Intra-Americas Sea Low-level Jet: Overview and Future Research. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1), pp. 153-188, DOI: 10.1196/annals.1446.012.
- Andrade, C., 1993. Análisis de la velocidad del viento en el mar Caribe. *Boletín Científico del CIOH*, 13, pp. 33-43.
- Andrade, C., 2000. The circulation and variability of the Colombian basin in the Caribbean Sea. Thesis submitted in accordance with the requirements of the University of Wales for the Degree of Doctor of Philosophy. School of Ocean Sciences. University of Wales. 225 P.
- Bernal, G., Poveda, G., Roldán, P. y Andrade, C., 2006. Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la costa Caribe colombiana. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 30(115), pp. 195-208.
- Caires, S., Sterl, A., Bidlot, J.-R., Graham, N. and Swail, V., 2004. Intercomparison of Different Wind-Wave Reanalyses. *Journal of Climate*, 17(10), pp. 1893-1913.
- Curtis, S. and Gamble, W., 2007. Regional variations of the Caribbean mid-summer drought. *Theoretical and Applied Climatology*, 94, 25-34, DOI: 10.1007/s00704-007-0342-0.
- Gill, A., 1982. *Atmosphere-ocean dynamics*. Academic press. International Geophysics Series. San Diego. California. 662 P.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K., Ropelewski, C., Wang, J., Leetma, A., Reynolds, R., Jenne, R. and Joseph, D., 1996. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, pp. 437-471.
- Leal, J. y Lavín, M., 2002. Comparación del viento costero y marino de la región norte del Golfo de California durante el invierno de 1994. *GEOS*, 22(1), pp. 12-17.
- Magaña, V., Amador, J. and Medina, S., 1999. The mid-summer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12, pp. 1577-1588.
- Mesa, O., Poveda, G. y Carvajal, L., 1997. *Introducción al clima de Colombia*. 1era edición. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 390 p.
- McIntosh, P. and Hubbert, G., 1992. Ocean winds for marine modelling. *Australian Meteorological Magazine*, 40, pp. 61-69.

- Mora, I. y Amador, J., 2000. El ENOS, el IOS y la corriente en chorro de bajo nivel en el oeste del Caribe. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 7(1), pp. 27-39.
- Muñoz, E., Busalacchi, A., Nigam, S. and Ruiz-Barradas, A., 2008. Winter and summer structure of the Caribbean Low-Level Jet. *Journal of Climate*, 21, pp. 1260-1276.
- Peixoto, J. and Oort, A., 1992. *Physics of climate*. American Institute of Physics. New York. 520 p.
- Poveda, G. y Mesa, O., 1999. La corriente de chorro superficial del Oeste ("Del Chocó") y otras dos corrientes de chorro en Colombia: Climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 23(89), pp. 517-528.
- Poveda, G., 1998. Retroalimentación dinámica entre el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur y la hidrología colombiana. *Disertación Ph.D. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos*. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Medellín. Sección 2.3.
- Poveda, G., 2004. La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28(107), pp. 201-222.
- Poveda, G., Waylen, P. and Pulwarty, R., 2006. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234, pp. 3-27.
- Powell, M., Vickery, P. and Reinhold, T., 2003. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature*, 422, pp. 279-283.
- Pujos, M., Pagliardini, J., Steer, R., Vernet, G. y Weber, O., 1986. Influencia de la contracorriente norte colombiana para la circulación de las aguas en la plataforma continental; su acción sobre la dispersión de los efluentes en suspensión del río Magdalena. *Boletín Científico del CIOH*, 6, pp. 3-15.
- Stensrud, D., 1996. Importance of low level jets to climate: a review. *Journal of Climate*, 9, pp. 1698-1711.
- Stewart, R., 2008. *Introduction to Physical Oceanography*. Department of Oceanography. Texas A & M University. 345 P.
- Tomczak, M. y Godfrey, J., 1994. *Regional Oceanography: an introduction*. 1st Edition. Pergamon. 422 P.
- Wang, C., 2007. Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate. *Climate Dynamics*, 29, pp. 411-422, DOI: 10.1007/s00382-007-0243-z.
- Whyte, F., Taylor, M., Stephenson, T. and Campbell, J., 2008. Features of the Caribbean low level jet. *International Journal of Climatology*, 28, pp. 119-128.
- Woodruff, S., Slutz, R., Jenne, R. and Steurer, P., 1987. A comprehensive ocean-atmosphere data set. *Bulletin American Meteorological Society*, 68, pp. 1239-1250.
- Worley, S., Woodruff, S., Reynolds, R., Lubker, S. and Lott, N., 2005. ICOADS Release 2.1 data and products. *International Journal of Climatology (CLIMAR-II Special Issue)*, 25, pp. 823-842, DOI: 10.1002/joc.1166.