



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ANÁLISIS DE LOS CAMPOS DE VIENTO EN EL CARIBE
COLOMBIANO DURANTE LA TEMPORADA SECA PRINCIPAL,
MEDIANTE SIMULACIONES CON EL MODELO WRF Y DATOS
DEL REANÁLISIS ERA5**

Autores

Carlos Mario Doria Martínez

Samir David Velasquez Lara

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2020



Análisis de los campos de viento en el Caribe colombiano durante la temporada seca principal, mediante simulaciones con el modelo WRF y datos del reanálisis ERA5

Carlos Mario Doria Martínez

Samir David Velasquez Lara

Trabajo de grado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Asesor

Eisinhower Rincón Vargas, Magister en Ingeniería Ambiental

Co- Asesor:

Vladimir Toro Valencia, Doctor en Oceanografía Física

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental.
Medellín, Colombia
2020

AGRADECIMIENTOS

Le agradecemos.

A Dios por permitirnos tener salud y fortaleza a lo largo de esta etapa tan importante de nuestras vidas y ayudarnos a mantener constancia para superar cada obstáculo, aprender de cada error y terminar este proceso.

A nuestras familias por apoyarnos incondicionalmente durante toda nuestra etapa de formación como profesionales, por el esfuerzo realizado por cada uno de ellos y por confiar en nosotros desde el primer momento en que decidimos iniciar este proyecto de vida.

Al profesor Einsinhower Rincón por sus asesorías, aportes, recomendaciones y apoyo constante durante la ejecución de nuestro trabajo. Al profesor Vladimir Toro por su entrega, acompañamiento y por permitirnos participar del proceso investigativo dentro del semillero SEMOCEA y vincularnos al proyecto "Investigación para la estabilización del proceso de erosión costera en las costas del mar de Antioquia".

A todos los profesores que hicieron parte de este proceso y que desde el primer día nos brindaron sus conocimientos para forjar en nosotros personas y profesionales íntegros.

A todos nuestros compañeros que de alguna manera fortalecieron nuestras capacidades con su tolerancia, conocimiento y ayuda ante todos los desafíos que enfrentamos en este importante proceso que estamos culminando.

Resumen

Se realizó un análisis de los campos de vientos en el Caribe colombiano durante los meses de enero y febrero utilizando datos simulados por el modelo WRF durante los años 2008 a 2017 con una resolución espacial de 10 km generados cada 3 horas, al igual que datos del reanálisis ERA5 para el mismo periodo de tiempo y una resolución espacial de 0.25°. Para identificar el comportamiento de los campos de vientos se generaron mapas de contornos de velocidades y vectores de vientos en el nivel más cercano a la superficie que permiten establecer que en el Caribe la velocidad promedio del viento es mayor durante enero, pero los picos de velocidades máximas más altas se presentan durante el mes de febrero. La dirección del viento predominantemente se da en sentido Este – Oeste en el océano con excepción de la zona ubicada por debajo de los 10.5 °N donde predomina el sentido Norte – Sur. El comportamiento del ciclo diurno en el océano muestra tanto en ERA5 como en WRF que las velocidades más altas se presentan entre las 22:00 y 01:00 Local Time (LT), mientras que las velocidades más bajas se presentan generalmente a las 13:00 LT. El ciclo diurno del viento en el continente, presenta magnitudes bajas durante la mañana y un aumento progresivo a partir de las 13:00 LT con magnitudes mayores entre las 14:00 y 19:00 LT. Se encontró que el modelo WRF se ajusta a los datos de ERA5 con algunas subestimaciones y sobrestimaciones leves que dependen tanto de la ubicación espacial (océano – continente) como de la hora del día. El análisis de la estructura vertical demostró que ambas fuentes de información representan de forma correcta el comportamiento de la componente zonal del viento y el índice de la Corriente Superficial de Chorro del Caribe (CLLJ, por sus siglas en inglés). Se encontró que durante eventos El Niño, la magnitud de la velocidad del viento en el Caribe se reduce con respecto a los años neutros. Para el caso de los eventos La Niña el modelo WRF subestimo la magnitud de la velocidad del viento presentando valores más altos durante los años neutros. Se pudo identificar que la zona cercana a los golfos de Urabá y Morrosquillo y la costa de Panamá presentan un comportamiento diferente durante las fases del ENSO siendo las velocidades más altas durante la fase EL Niño. Se realizó la validación de los datos con mediciones de estaciones meteorológicas ubicadas cerca a la costa encontrando que tanto las simulaciones de WRF como los datos de ERA5 siguen las tendencias de los registros de las observaciones. En todos los casos analizados se encontró que ERA5 sobreestima los valores de la velocidad media diaria, mientras que el modelo WRF presenta magnitudes más cercanas a los valores medidos con algunas sobreestimaciones y subestimaciones menores, sin embargo, los datos de ERA5 presentan un mayor grado de correlación con los datos observados.

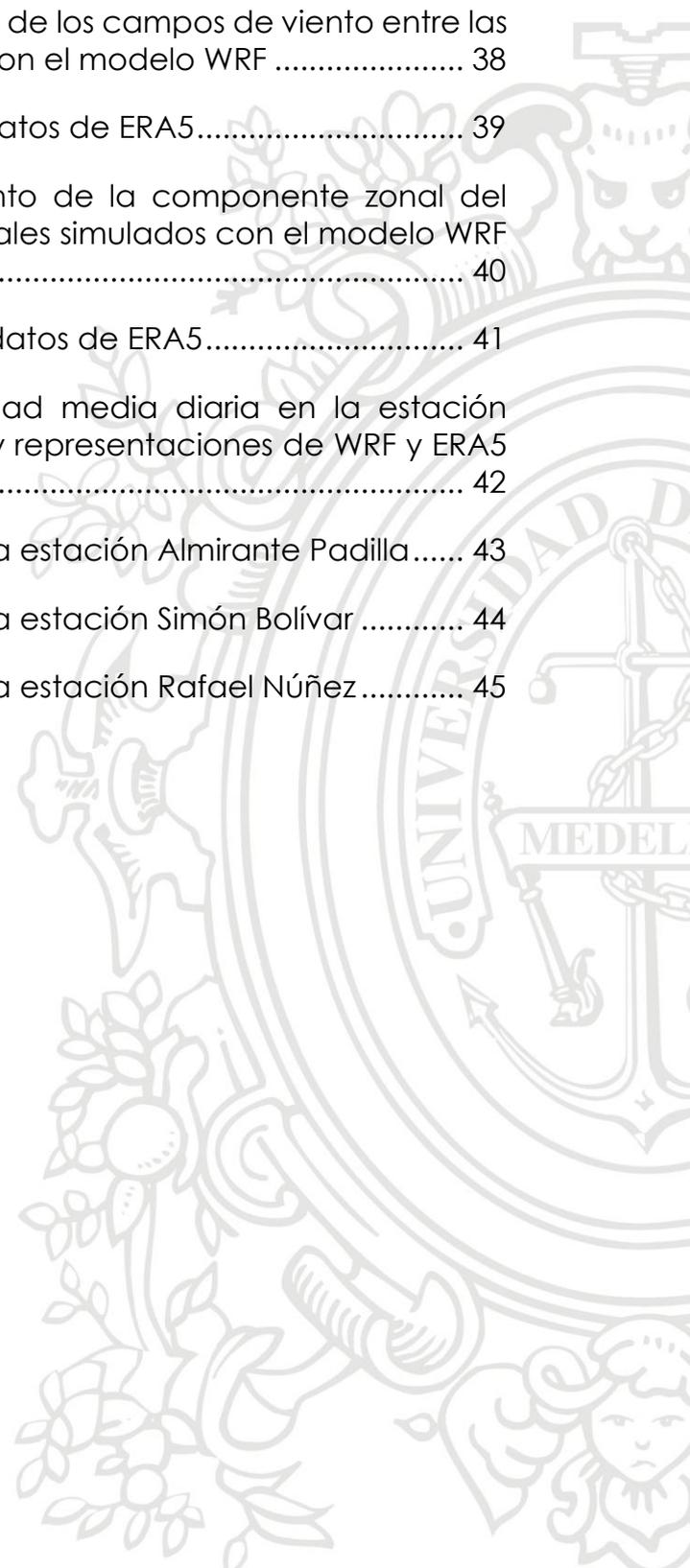
Contenido

1. Introducción.	10
2. Objetivos.	13
2.1 Objetivo general.....	13
2.2 Objetivos específicos.	13
3. Marco Teórico	14
4. Metodología.....	18
4.1 Área de estudio	18
4.2 Datos.....	18
4.3 Métodos.....	20
5. Resultados y análisis	22
5.1 Análisis de ciclos diurnos	22
5.1.1 Representación con el modelo WRF a resolución de 10 km	22
5.1.2 Representación y comparación de campos de vientos WRF – ERA5	25
5.1.3 Diferencias espaciales entre las representaciones WRF – ERA5	27
5.2 Análisis de la estructura vertical del viento.....	30
5.2.1 Representación del perfil vertical de la componente zonal con WRF y ERA5.....	30
5.2.2 Representación del perfil vertical de la componente meridional con WRF y ERA5.	32
5.2.3 Comportamiento de la componente Zonal.....	32
5.3 Influencias de las fases del ENSO en los vientos del caribe	34
5.3.1 Comportamiento del viento durante años EN	34
5.3.2 Comportamiento del viento durante años LN y neutros.....	36
5.3.4 Análisis de las diferencias entre EN, LN y años neutros.	38
5.4. Validación de la información	41
5.4.1. Estación Galerazamba.....	42
5.4.2. Estación aeropuerto Almirante Padilla, Riohacha.	43
5.4.3. Estación aeropuerto Simón Bolívar, Santa Marta.	44
5.4.4. Estación aeropuerto Rafael Núñez, Cartagena.....	45
6. Conclusiones.....	47
7. Trabajos futuros.....	49
8. Referencias Bibliográficas.	50
Anexos.....	53

Lista de figuras

Figura 1. Índice ONI entre 1950 – 2019. Los valores de los años en rojo y azul representan eventos El Niño y La Niña fuertes o muy fuertes respectivamente. (NOAA, 2019).....	16
Figura 2. Área de estudio. Los puntos rojos señalan la ubicación de las estaciones del IDEAM utilizadas en el proceso de validación y los recuadros amarillos las zonas utilizadas para representar el ciclo diurno al interior del continente.	18
Figura 3. Ciclo diurno promedio multianual de los campos de vientos simulados por WRF durante el mes de enero.	22
Figura 4. Comportamiento diurno de las velocidades máximas, medias y mínimas simuladas por el modelo WRF durante los meses de enero y febrero, en toda el área de estudio.....	23
Figura 5. Igual que la figura 3, pero para febrero	25
Figura 6. Comportamiento diurno de las velocidades máximas (A), medias teniendo en cuenta la región continental (B), medias marítimas (C) y mínimas marítimas (D) durante los meses de enero y febrero.....	26
Figura 7. Diferencias de las representaciones del ciclo diurno promedio multianual mes de enero. (WRF – ERA5).....	28
Figura 8. Igual que la figura 7, pero para febrero	29
Figura 9. Comportamiento diurno promedio para los meses enero y febrero de las velocidades máximas y medias en las regiones 1 y 2 con las simulaciones de WRF y datos de ERA5.	30
Figura 10. Perfil vertical de la componente zonal a 75°W. (A,C) salidas del modelo WRF (B,D) datos de reanálisis ERA5. El recuadro de color negro señala el área donde se presenta el núcleo de la CLLJ.	31
Figura 11. Igual que la Figura 9, pero para la componente meridional a 12.5°N	33
Figura 12. Perfiles verticales de la componente zonal durante los meses de enero y febrero a 70 – 75 y 80 °W con WRF.....	33
Figura 13. Campos de viento simulados con el modelo WRF a resolución original durante eventos EN	34
Figura 14. Igual que la figura 13, pero con los datos de ERA5.....	35

Figura 15. Comportamiento de la velocidad máxima del viento durante años con influencia de eventos EN.....	36
Figura 16. Diferencias en el comportamiento de los campos de viento entre las fases del ENSO y años neutrales simulados con el modelo WRF	38
Figura 17. Igual que la figura 16 pero para datos de ERA5.....	39
Figura 18. Diferencias en el comportamiento de la componente zonal del viento entre las fases del ENSO y años neutrales simulados con el modelo WRF	40
Figura 19. Igual que la figura 18, pero para datos de ERA5.....	41
Figura 20. Comportamiento de la velocidad media diaria en la estación Galerazamba para mediciones del IDEAM y representaciones de WRF y ERA5	42
Figura 21. Igual que la figura 20, pero para la estación Almirante Padilla.....	43
Figura 22. Igual que la figura 20, pero para la estación Simón Bolívar	44
Figura 23. Igual que la figura 20, pero para la estación Rafael Núñez.....	45



Lista de tablas

Tabla 1. Estaciones del IDEAM utilizadas como referencia para validar los datos de velocidad media diaria del viento.....	21
Tabla 2. Magnitudes máximas de la componente zonal (m/s) en sentido Este-Oeste durante años neutros (2013 - 2014) y años LN (2008 – 2011).....	37
Tabla 3. Coordenadas de los puntos de obtención de información para la validación de los datos con la información de las estaciones del IDEAM.....	42
Tabla 4. Coeficiente de correlación, desviación estándar y error cuadrático medio de las representaciones de WRF y ERA5 respecto a mediciones del IDEAM para la estación Galerazamba.	43
Tabla 5. Igual que la tabla 4, pero para la estación Almirante Padilla	44
Tabla 6. Igual que la tabla 4, pero para la estación Simón Bolívar.....	45
Tabla 7. Igual que la tabla 4, pero para la estación Rafael Núñez.....	46

Lista de anexos

Anexo 1. Ciclo diurno promedio multianual de los campos de vientos ERA5 durante el mes de enero.....	53
Anexo 2. Ciclo diurno promedio multianual de los campos de vientos ERA5 durante el mes de febrero.	54
Anexo 3. Ciclo diurno promedio multianual de los campos de vientos WRF interpolado a 0.25° durante el mes de enero.....	55
Anexo 4. Ciclo diurno promedio multianual de los campos de vientos WRF interpolado a 0.25° durante el mes de febrero	56
Anexo 5. Campos de vientos durante eventos EN con WRF 10 km.	57
Anexo 6. Campos de vientos durante eventos EN con ERA5.....	57
Anexo 7. Campos de vientos durante eventos LN con WRF 10 km.....	58
Anexo 8. Campos de vientos durante eventos LN con ERA5.....	58
Anexo 9. Campos de vientos durante años neutros con WRF 10 km.	59
Anexo 10. Campos de vientos durante años neutros con ERA5.	59
Anexo 11. Componente zonal y meridional del viento durante EN WRF 10 km	60
Anexo 12. Componente zonal y meridional del viento durante LN WRF 10 km	61
Anexo 13. Componente zonal y meridional del viento durante años neutros WRF 10 km	62
Anexo 14. Componente zonal y meridional del viento durante EN ERA5	63
Anexo 15. Componente zonal y meridional del viento durante LN ERA5	64
Anexo 16. Componente zonal y meridional del viento durante años neutros ERA5.....	65

1. Introducción.

El viento es una variable atmosférica influenciada principalmente por el calentamiento radiativo diferencial de distintas superficies. Su intensidad en los niveles cercanos a la superficie se ve afectada por la rugosidad que esta presenta, por los cambios de presión y por fenómenos atmosféricos de mayor escala. En las zonas tropicales, especialmente en el Caribe colombiano el comportamiento de los vientos presenta una variabilidad intra-anual dominada por los vientos alisios, el movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y la ocurrencia de las fases del El Niño – Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), entre otros. El régimen climático que se presenta en el norte de Suramérica y el Caribe genera durante el año una temporada donde predominan condiciones secas, principalmente en el trimestre diciembre, enero y febrero (DEF) en la cual se tienen los registros de mayor magnitud de la velocidad del viento.

La variabilidad climática en Colombia y el Caribe, está altamente influenciada por la CLLJ (Bernal *et al*, 2010; Serna *et al*, 2018). Esta corriente es un fenómeno de meso escala que presenta variaciones tanto horarias como estacionales, por lo que interviene de forma directa en fenómenos como el comportamiento de las corrientes oceánicas superficiales de la cuenca Colombia (Bernal *et al*, 2010; INVEMAR, 2017), eventos de surgencia (Sarmiento-Devia *et al*, 2013) y la intensidad del oleaje (Daniel *et al*, 2015). También se ha demostrado que durante la temporada seca DEF se presenta la mayor intensidad de los vientos en el Caribe con velocidades medias que oscilan entre los 10 y 15 m/s (Ruiz & Bernal 2009). De acuerdo con Serna *et al*, (2018) durante la ocurrencia de eventos El Niño la CLLJ se debilita durante la temporada seca, lo que puede estar relacionado con una mayor reducción de las lluvias en el país.

Los vientos en el Caribe se han estudiado ampliamente en las últimas dos décadas utilizando diferentes tipos de fuentes de información. En Colombia, la información climática disponible para la realización de investigaciones y estudios de ingeniería a escala local es limitada. Debido a ello, históricamente los vientos se han analizado a partir de tres fuentes de información: boyas y plataformas; modelos numéricos e información satelital, siendo estas dos últimas las de mayor creciente uso (Ruiz & Bernal, 2009).

La fuente de información más utilizada para estudios atmosféricos en la cuenca Colombia han sido los reanálisis climáticos, esta técnica hace referencia a la aplicación conjunta de información medida y modelada, que permite la asimilación de datos para la creación de un conjunto de datos climáticos de alta resolución espacial y temporal (Rueda-Bayona *et al*, 2016). Ruiz & Bernal (2009) utilizando los datos del reanálisis NCEP/NCAR estudian la

variabilidad estacional e interanual espacio temporal del viento en el Mar Caribe colombiano, comparando estos datos con mediciones *in situ* del viento. Poveda y Mesa (1999) utilizan estos datos para analizar la dinámica de tres corrientes de chorro sobre Colombia. La corriente de chorro del Chocó en el Pacífico, una corriente de chorro sobre el Ecuador a una altura entre 600 y 700 hPa y la CLLJ.

Dadas las limitaciones de la resolución de la información climática global y regional disponible (tamaño de la red ~ 100 km), la modelación regional del clima puede ser útil para respaldar las tareas de pronóstico estacional y para la evaluación de los posibles impactos regionales del cambio climático (Martínez *et al*, 2018). De igual forma puede proporcionar nuevos elementos para analizar los procesos atmosféricos relacionados con la dinámica del viento en la zona de interés. El modelo Weather Research and Forecasting (WRF) es una de las herramientas más utilizadas para la simulación de las variables climáticas en el país, ha sido utilizado para reducir la escala espacial del reanálisis ERA-Interim (Posada *et al*, 2018) para estudiar el comportamiento del viento y la precipitación en los valles interandinos. (Hernandez 2012) determina los patrones de circulación del viento en el valle de Aburrá. Arroyo (2019) utiliza las simulaciones para determinar el comportamiento del ciclo de brisas diurnas en el golfo de Urabá. En todos los casos la resolución de las simulaciones es más fina y representa de mejor manera las características y la variabilidad del viento de acuerdo a las condiciones locales de cada región.

En este trabajo se presenta el análisis de los campos de vientos en el Caribe colombiano durante los meses de enero y febrero (EF) a partir de las simulaciones realizadas con el modelo WRF y datos del reanálisis ERA5 que son fuentes de información de mayor resolución espacial que las utilizadas hasta el momento en este tipo de investigaciones. El área de estudios se ubica en la cuenca Colombia y territorios continentales del norte de país en el periodo comprendido entre 2008 y 2017. Para ello la información de reanálisis y simulaciones con el WRF se compararon con mediciones *in situ*. Mediante promedios mensuales que representan la variación diaria de los campos de vientos en el nivel más cercano a la superficie y se obtienen las diferencias entre las representaciones de cada una de las fuentes de información. El análisis de la estructura vertical del viento se enfoca principalmente en determinar la capacidad de WRF y ERA5 de identificar el índice que establece la presencia de la CLLJ. Las diferencias del comportamiento del viento entre las fases del ENSO se establecen a partir de la diferencia de magnitud y dirección entre los años identificados con la ocurrencia de eventos El Niño, La Niña y años donde predominan las condiciones neutras. Finalmente se presenta una validación de los datos del modelo y el reanálisis comparando el comportamiento de la velocidad media diaria utilizando mediciones

obtenidas de estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Esta investigación tiene como novedad el uso de fuentes de información y datos de vanguardia que pueden ofrecer nuevos y mejores resultados sobre la caracterización y el comportamiento de los vientos en el Caribe colombiano. Es una investigación pionera en la región en cuanto al uso de información modelada de alta resolución y la implementación de datos de reanálisis más reciente a los anteriormente utilizados. Los resultados presentados son útiles para comprender de mejor manera los procesos locales y regionales de diferentes variables atmosféricas que se ven influenciadas por el viento. A raíz de esto, se pueden analizar zonas específicas que muestran comportamientos diferenciados con respecto a todo el Caribe, entre ellos el golfo de Morrosquillo, el golfo de Urabá y el núcleo de altas velocidades ubicados frente a la bahía de Santa Marta, la interacción entre las corrientes de bajo nivel y la relación entre el comportamiento del viento y otras variables oceánicas y atmosféricas durante periodos de tiempo más extensos.

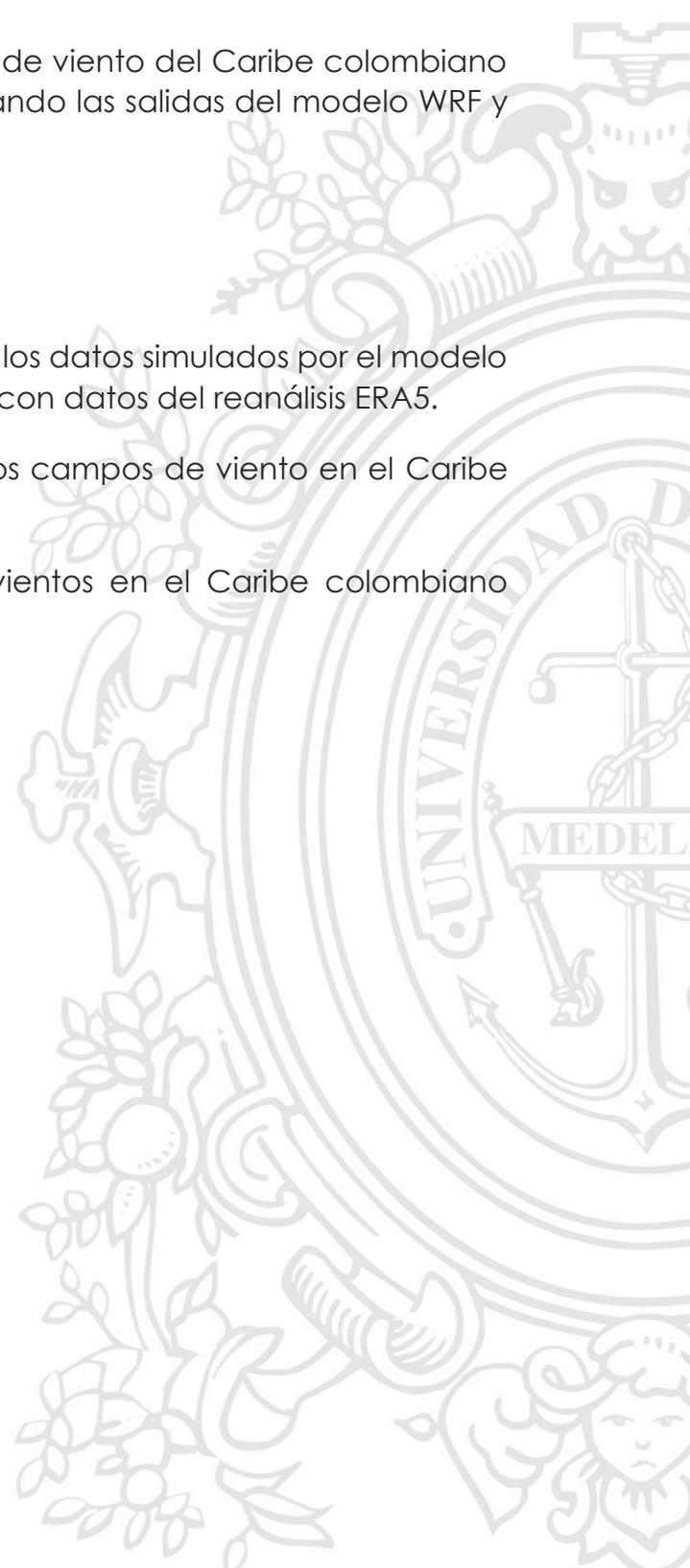
2. Objetivos.

2.1 Objetivo general.

Analizar el comportamiento de los campos de viento del Caribe colombiano durante los meses de enero y febrero, utilizando las salidas del modelo WRF y datos del reanálisis ERA5

2.2 Objetivos específicos.

- Comparar espacial y temporalmente los datos simulados por el modelo WRF durante la temporada seca (EF) con datos del reanálisis ERA5.
- Determinar la estructura vertical de los campos de viento en el Caribe colombiano.
- Estudiar el comportamiento de los vientos en el Caribe colombiano durante eventos El ENSO.



3. Marco Teórico

El viento es una variable atmosférica que da cuenta del movimiento natural del aire, se genera por gradientes de presión causados por el calentamiento radiativo diferencial de la superficie terrestre. Debido a esto se generan zonas de baja presión donde el aire es más cálido y puede expandirse y zonas de alta presión donde el aire es más frío y se comprime. Con el fin de alcanzar un balance atmosférico entre las diferencias de presión, el aire fluye generalmente, desde los centros de alta a los de baja presión, presentando variaciones significativas en el tiempo y en el espacio. Esto se refiere específicamente al movimiento horizontal de las parcelas de aire, puesto que los movimientos verticales, limitados por el espesor de la Capa Límite Planetaria se deben principalmente a procesos convectivos. El viento es una magnitud vectorial, que se caracteriza por tener velocidad y dirección variables, con un desplazamiento determinado por la acción de diferentes fuerzas sobre las parcelas de aire, especialmente, por las diferencias de presión. La velocidad se define como la magnitud que determina la fuerza del vector y la dirección del viento determina la orientación del vector, es decir desde donde se origina o la dirección desde la que este sopla (IDEAM, 2017). El vector viento se puede descomponer en dos componentes, en sentido Este – Oeste (componente zonal representada con la letra U) y en sentido Norte – Sur (componente zonal representada con la letra V) que representan el movimiento del viento a través de los paralelos (longitud) y los meridianos (latitud) respectivamente.

El viento es una variable climática responsable de los procesos de transporte de materia y flujo de energía a través de la atmósfera, su intensidad y variabilidad depende de las características de los diferentes sistemas con los que interactúa. El sistema océano-atmósfera es controlado esencialmente por la radiación solar; en las zonas tropicales debido a la mayor cantidad de radiación recibida las aguas superficiales de los océanos son más cálidas y la atmósfera tiene mayor espesor que en los polos y las zonas templadas, lo que induce la dinámica de la atmósfera y el océano, afectando el sistema climático global (Ruiz & Bernal, 2009; Ruiz, 2011). La acción del viento sobre el océano permite la transferencia de momentum produciendo corrientes y olas, de igual forma esta acción también se relaciona con otras variables oceánicas como la temperatura superficial y el nivel del mar (Ruiz & Bernal 2009).

El Caribe colombiano hace parte del océano Atlántico tropical, lo que permite recibir radiación solar de manera constante durante todo el año. La variabilidad climática en esta zona está dominada por fenómenos climáticos regionales y globales como los vientos alisios, la ZCIT y el ENSO, entre otros. Estos fenómenos se modulan en el comportamiento y las características de los campos de vientos en esta región. La variabilidad del viento se manifiesta

también con los cambios de presión y temperatura que se presentan en el perfil atmosférico. En los niveles más cercanos a la superficie la componente zonal del viento es en sentido Este a Oeste (negativo) con mayor intensidad debido a la presencia de la corriente de bajo nivel del Caribe (Ruiz, 2011; Andrade & Barton, 2013) y la componente meridional tiene un compartimiento predominante en sentido Norte – Sur (negativo) con mayor intensidad hacia sureste del Caribe colombiano en la zona del golfo de Morrosquillo y el golfo de Urabá (Andrade & Barton, 2013).

En el perfil atmosférico se encuentra zonas donde predominan vientos fuertes y persistentes denominados chorros atmosféricos o corrientes de chorro, ubicados a diferentes niveles de altura, en distintas épocas climáticas y en diversas regiones del mundo. En el Caribe colombiano ha sido identificada la CLLJ (Ruiz & Bernal, 2009). La CLLJ se presenta durante todo el año sobre el mar Caribe en una región comprendida entre los 12.5 - 17.5 °N y los 80 – 70 °W y tiene un máximo de viento zonal del este alrededor de los 925 hPa (Wang, 2007; Amador, 2008). Debido a esta influencia el viento en el Caribe presenta un comportamiento bimodal con mayores velocidades durante las temporadas secas (DEF – JJA) cuando la componente zonal presenta un fortalecimiento en el núcleo de la corriente, mientras que en las temporadas de lluvias (MAM - SON) la componente zonal se debilita y se fortalece la meridional ocasionando velocidades de menor magnitud en los vientos (Poveda & Mesa, 1999; Wang, 2007; Amador, 2008, Ruiz & Bernal, 2009).

La CLLJ está influenciada por los cambios de temperatura superficial del mar que se genera ante la ocurrencia de alguna de las fases del ENSO que, aunque se desarrolla en el Pacífico tropical también influye en la temperatura superficial del Mar Caribe. Autores como Ruiz (2011) establecen una correlación positiva entre el ENSO y anomalías en la temperatura superficial del mar en el océano Atlántico con un rezago de entre 4 y 6 meses. Este fenómeno es causante de variaciones anuales del viento sobre la Cuenca Colombia presentando cambios en la velocidad durante las fases del ENSO dependiendo de la época del año, que pueden aumentar o disminuir en cada una de las fases, mientras que los cambios de dirección solo se presentan durante eventos de fase La Niña (Ruiz & Bernal, 2009). En este mismo sentido Poveda & Mesa (1999) y León (2011), estiman que las fases del ENSO y las transiciones entre ellas alteran el comportamiento de los vientos en el trópico y las corrientes de chorro de bajo nivel, afectando especialmente los patrones de precipitación en el norte de Suramérica.

Generalmente las fases del ENSO (El Niño, La Niña) se presentan de manera intercalada con rangos variables y diferentes intensidades. Una de las maneras de identificar las fases del ENSO o de su ausencia es el Oceanic Niño Index (ONI) elaborado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, Figura 1). De acuerdo con este índice la presencia o

ausencia del ENSO se presenta por una variación de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura superficial en el océano pacifico tropical durante un periodo de 3 meses, los valores negativos hacen referencias a eventos La Niña y los positivos a eventos El Niño y el intervalo comprendido entre estos valores permite caracterizarlo como años neutrales.

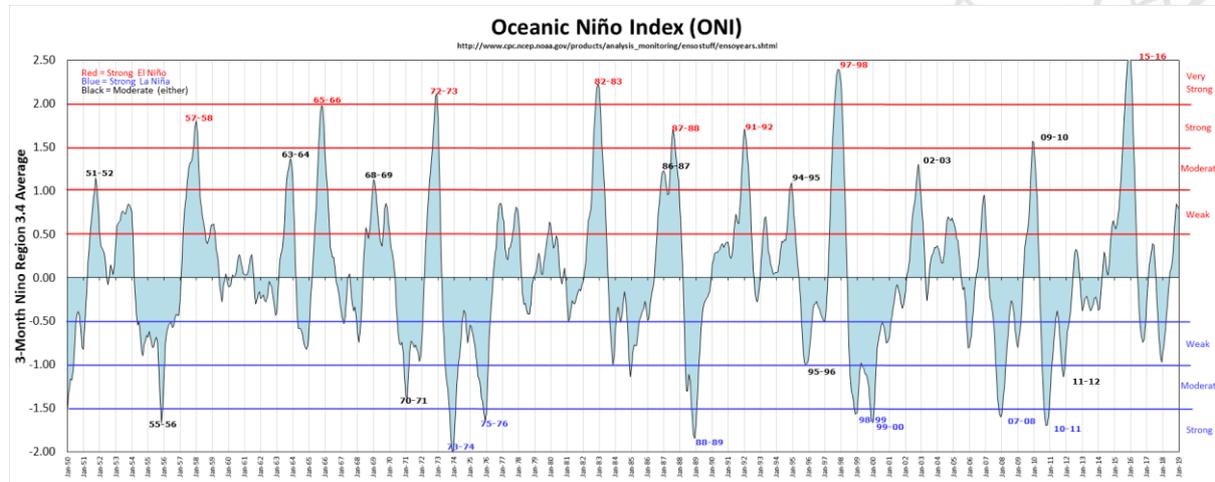
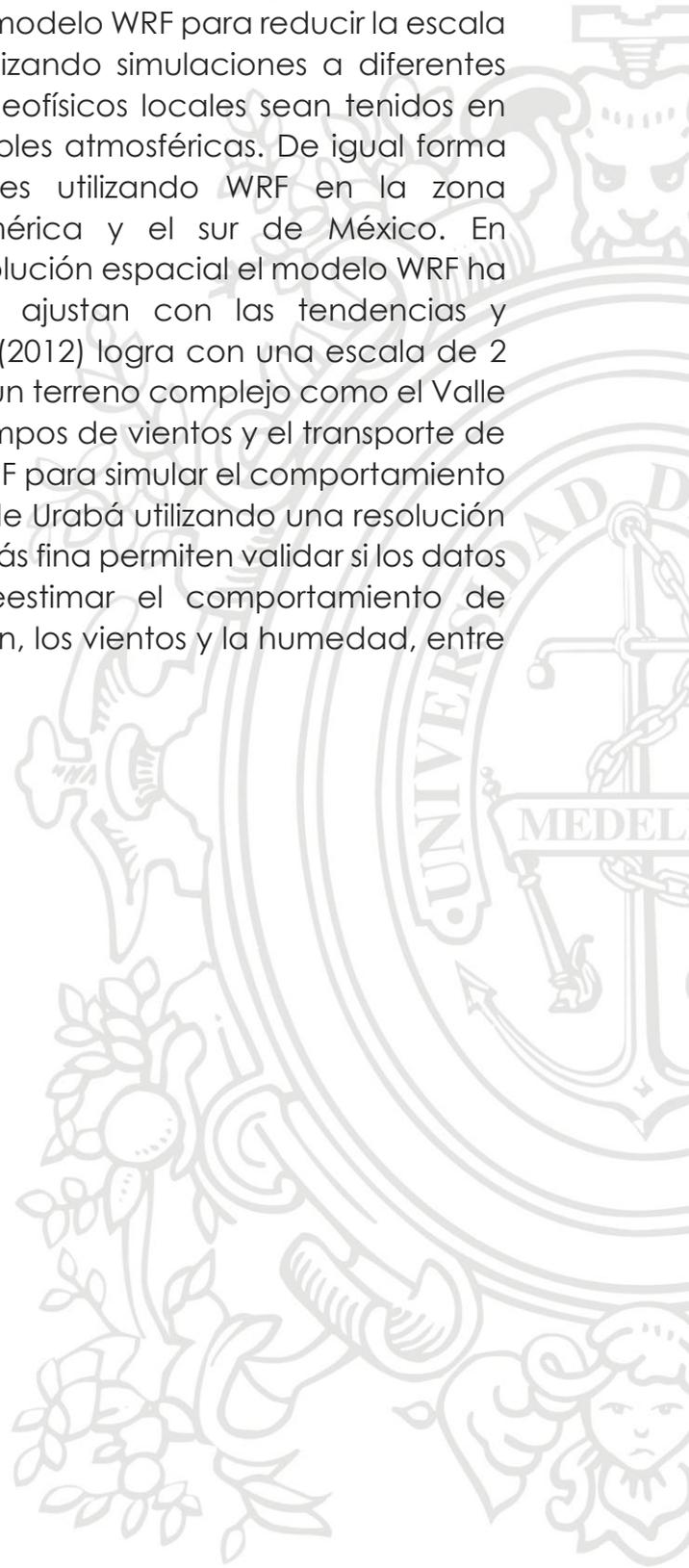


Figura 1. Índice ONI entre 1950 – 2019. Los valores de los años en rojo y azul representan eventos El Niño y La Niña fuertes o muy fuertes respectivamente. (NOAA, 2019).

Las investigaciones realizadas en el Caribe con datos medidos *in situ* como las de Bastidas *et al* (2016) y Daniel *et al* (2015), permiten identificar y caracterizar fenómenos y comportamientos de los vientos en zonas puntuales del Caribe, mientras que estudios relacionados con fuentes como los datos de reanálisis han sido utilizadas por diversos autores para analizar el comportamiento del viento a escala regional. Las investigaciones con datos de reanálisis como ERA-linterim, ERA-40 y NCEP/NCAR han permitido representar muchas de las particularidades del viento en el Caribe entre las que se destacan la ubicación y comportamiento del CLLJ (Wang, 2007; Amador, 2008), la variabilidad intra-anual e interanual (Ruiz & Bernal, 2009; Sarmiento-Devia *et al*, 2013) y las variaciones asociadas a las fases del ENSO (Ruiz, 2011; Serna *et al*, 2018).

De otro lado, la modelación numérica del clima se puede considerar como un punto medio que permite utilizar datos de ambas fuentes para ofrecer información que pueda suplir los problemas de disponibilidad a la que se enfrentan los investigadores en este campo de estudio. De acuerdo con Posada-Marin *et al* (2018) los modelos climáticos regionales se ven influenciados por fenómenos a gran escala que son determinantes en la validez de las representaciones de los eventos modelados es por eso que el modelado regional del clima en el Caribe colombiano requiere tener en cuenta las múltiples escalas de convección y transporte de humedad atmosférica que se presenta en los trópicos, al igual que el efecto de las cadenas montañosas tropicales sobre la circulación (Martínez *et al*, 2018).

El modelo WRF ha venido siendo utilizado ampliamente en los últimos años, entre otras razones, por su capacidad de ser configurado con condiciones locales y refinar datos de otras fuentes de resoluciones más gruesas. En este sentido, Posada-Marín *et al* (2018) utilizan el modelo WRF para reducir la escala dinámica de los datos de ERA-Interim realizando simulaciones a diferentes escalas de tal forma que los parámetros geofísicos locales sean tenidos en cuenta en el comportamiento de las variables atmosféricas. De igual forma Martínez *et al* (2018) realiza simulaciones utilizando WRF en la zona comprendida entre el norte de sur América y el sur de México. En investigaciones donde se requieren alta resolución espacial el modelo WRF ha demostrado que los datos simulados se ajustan con las tendencias y magnitudes de las mediciones, Hernandez (2012) logra con una escala de 2 km simular la influencia de la topografía en un terreno complejo como el Valle de Aburrá en el comportamiento de los campos de vientos y el transporte de partículas. Arroyo (2019) utiliza el modelo WRF para simular el comportamiento del ciclo diurno de las brisas sobre el golfo de Urabá utilizando una resolución de 3.3 km. Las simulaciones en una escala más fina permiten validar si los datos de reanálisis pueden subestimar o sobreestimar el comportamiento de variables atmosféricas como la precipitación, los vientos y la humedad, entre otros.



4. Metodología.

4.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada entre las latitudes 7° - 17° N y los meridianos 70° - 83° W (Figura 2). Esta delimitación abarca gran parte de la cuenca Colombia y territorios continentales e insulares del Caribe colombiano. La región 1 ubicada en las coordenadas $8 - 8.5^{\circ}$ N y $76.75 - 75.75^{\circ}$ W y la región 2 entre las coordenadas $8 - 10.5^{\circ}$ N y $73 - 75^{\circ}$ W hacen referencia a las áreas utilizadas para las estimaciones del comportamiento de los vientos al interior del continente.



Figura 2. Área de estudio. Los puntos rojos señalan la ubicación de las estaciones del IDEAM utilizadas en el proceso de validación y los recuadros amarillos las zonas utilizadas para representar el ciclo diurno al interior del continente.

4.2 Datos

El modelo Weather Research and Forecasting (WRF) es un sistema numérico de predicción meteorológica de mesoescala de última generación diseñado tanto para la investigación atmosférica como para aplicaciones de pronóstico operativo. El modelo sirve una amplia gama de aplicaciones

meteorológicas en escalas desde decenas de metros hasta miles de kilómetros. Este modelo viene siendo desarrollado desde finales de la década de 1990 principalmente por el National Center for Atmospheric Research (NCAR) y la NOAA (representada por el National Centers for Environmental Prediction (NCEP)). WRF es un modelo que utiliza coordenadas sigma no hidrostático, totalmente compresible y que sigue el terreno, que puede ser configurado para obtener campos de viento, presión, temperatura y humedad (UCAR, 2019).

En esta investigación se utilizaron salidas del modelo WRF, implementado por la componente de modelación numérica de la atmósfera para el proyecto "Investigación para estabilización del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia". El ejercicio de modelación se realizó utilizando tres dominios anidados con resoluciones de 30, 10 y 3.3 kilómetros. Los análisis se realizaron para el dominio de 10 kilómetros que simuló las componentes del viento para los meses de enero y febrero durante los años 2008 a 2017, con un tamaño de paso de 3 horas y 37 niveles sigma en la vertical desde la superficie hasta aproximadamente 50 hPa.

De otro lado, los reanálisis climáticos combinan observaciones pasadas con modelos para generar series temporales consistentes de múltiples variables climáticas. Los reanálisis se encuentran entre los conjuntos de datos más utilizados en las ciencias geofísicas. Proporcionan una descripción completa del clima observado a medida que ha evolucionado durante las últimas décadas, en cuadrículas 3D a intervalos sub-diarios. ERA5 es el reanálisis más reciente generado por el ECMWF, que proporciona datos por hora sobre muchos parámetros atmosféricos, terrestres y del estado del mar con una resolución horizontal de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ y 37 niveles verticales de presión que van desde los 1000 hasta 1 hPa. Esta nueva generación de datos reemplaza la base de datos de ERA-Interim que dejó de producirse en agosto de 2019 y que junto con los reanálisis del NCEP/NCAR han sido las fuentes más utilizadas para el estudio del viento en el Caribe, las cuales tienen resoluciones más gruesas que la de ERA5, de $1^\circ \times 1^\circ$ y $2^\circ \times 2^\circ$ de tamaño de celda en la horizontal respectivamente. (ECMWF, 2019).

Para la comparación con las salidas del modelo WRF se analizaron datos de la componente zonal y meridional del viento para el mismo periodo de tiempo con un paso temporal de 3 horas, descargados desde (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels-monthly-means?tab=form>).

4.3 Métodos

Las salidas originales del modelo WRF constan de archivos generados para cada día con ocho registros diarios generados cada tres horas de las componentes del viento para los meses de enero y febrero de los años 2008 a 2017, los cuales fueron promediados para obtener el comportamiento mensual de los campos de vientos. Con el fin de poder comparar estos datos con los de ERA5 se hace un redimensionamiento de los datos para igualar la resolución espacial de ambas representaciones, transformando la cuadrícula original de 10 km de WRF a una de 0.25° mediante interpolación bilineal. En los campos de vientos se hizo una representación de la magnitud de la velocidad (V) y de la dirección del viento (θ) a partir de la componente zonal (u) y meridional (v) utilizando las ecuaciones 1 y 2 respectivamente (Pérez *et al.* 2018), (Delgado *et al.*, 1994):

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \text{ (Ecuación 1)} \quad \theta = \tan^{-1} v/u \text{ (Ecuación 2)}$$

La estructura vertical de los vientos en el Caribe colombiano se analizó mediante secciones transversales que representaban el comportamiento de la componente zonal (U) y meridional (V). De acuerdo con diferentes autores como Wang (2007), Amador (2008) y Morales (2017) el CLLJ es el factor más importante en el comportamiento de los vientos en el Caribe colombiano y se puede identificar entre los 12.5 - 17.5 N, 80 - 70 W con un núcleo de mayor magnitud a una altura cercana a los 925 hPa. La identificación del CLLJ de acuerdo con Wang (2007) se refleja en los valores negativos de la componente zonal del viento en esta región. En esta investigación se generan perfiles verticales de contornos que representan ambas componentes, haciendo un énfasis especial sobre el comportamiento de la componente zonal en los primeros niveles verticales desde 1000 hPa hasta 550 hPa, tanto con los datos del modelo WRF como con los datos de reanálisis de ERA5 durante los meses de enero y febrero, determinando que ambas fuentes pueden representar la presencia del CLLJ.

De acuerdo con el índice ONI (figura 1), durante el periodo de análisis se presentaron eventos El Niño (EN) con variación de la temperatura superficial del océano superior de 1.5 °C en los años 2010 y 2016 correspondiente a eventos de magnitud fuerte y muy fuerte respectivamente. Los eventos La Niña (LN) con variaciones por debajo de -1 °C se presentaron durante los años 2008, 2011 y 2012 siendo los eventos de 2008 y 2011 de magnitud fuerte y el de 2012 moderado. Las condiciones neutrales más representativas se dan durante 2013 y 2014. Se realizaron gráficos de contornos de promedios diarios mensuales en los que se representan el aumento o disminución de los vientos durante las épocas EN y LN con respecto a los años neutros para los datos de

WRF y ERA5 encontrando una variabilidad en la representación que hace cada una de estas fuentes de los vientos durante las fases del ENSO.

Para validar la información del modelo WRF y los datos de ERA5 se realizó un análisis empleando las métricas estadísticas de coeficiente correlación (R) (ecuación 3), error cuadrático medio (RSME) (ecuación 4) y desviación estándar (SD) (ecuación 5); utilizando como datos de referencia la información de mediciones *in situ* de cuatro estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ubicadas en la zona de estudio y detalladas en la tabla 1, empleando las siguientes ecuaciones.

$$R = \frac{\sum_{k=1}^N (O_k - \underline{O}) - (M_k - \underline{M})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (O_k - \underline{O})^2 \sum_{k=1}^N (M_k - \underline{M})^2}}$$

Ecuación 3

$$RSME' = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (M_k - O_k)^2}$$

Ecuación 4

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (M_k - \underline{M})^2}$$

Ecuación 5

Donde O (datos IDEAM) y M (datos WRF y ERA5) representan valores observados y modelados en un momento o punto determinado (el índice k identifica el tiempo o el espacio según el caso), y N indica el tamaño de la muestra.

Tabla 1. Estaciones del IDEAM utilizadas como referencia para validar los datos de velocidad media diaria del viento

Código	Nombre Estación	Latitud	Longitud	Altura (msnm)
14015010	Galerazamba	10.79	-75.26	20
15065180	Aeropuerto Almirante Padilla	11.53	-72.92	4
15015050	Aeropuerto Simón Bolívar	11.13	-74.23	4
14015080	Aeropuerto Rafael Núñez	10.45	-75.52	2

5. Resultados y análisis

5.1 Análisis de ciclos diurnos

5.1.1 Representación con el modelo WRF a resolución de 10 km

El ciclo diurno promedio multianual del viento superficial en el Caribe colombiano durante el mes de enero (Figura 3). Permite identificar un núcleo con velocidades más intensas alrededor de los 74 – 75 °W y los 11 – 12 °N, frente a la Ciénaga Grande de Santa Marta. Este núcleo actúa como epicentro del comportamiento de la magnitud de la velocidad reduciéndose en todas las direcciones a medida que se aleja de esta región, este resultado concuerda con lo manifestado por Bastidas *et al* (2016) que mediante datos satelitales encuentra un punto de alta variabilidad en el viento a unos 30 kilómetros de la bahía de Santa Marta.

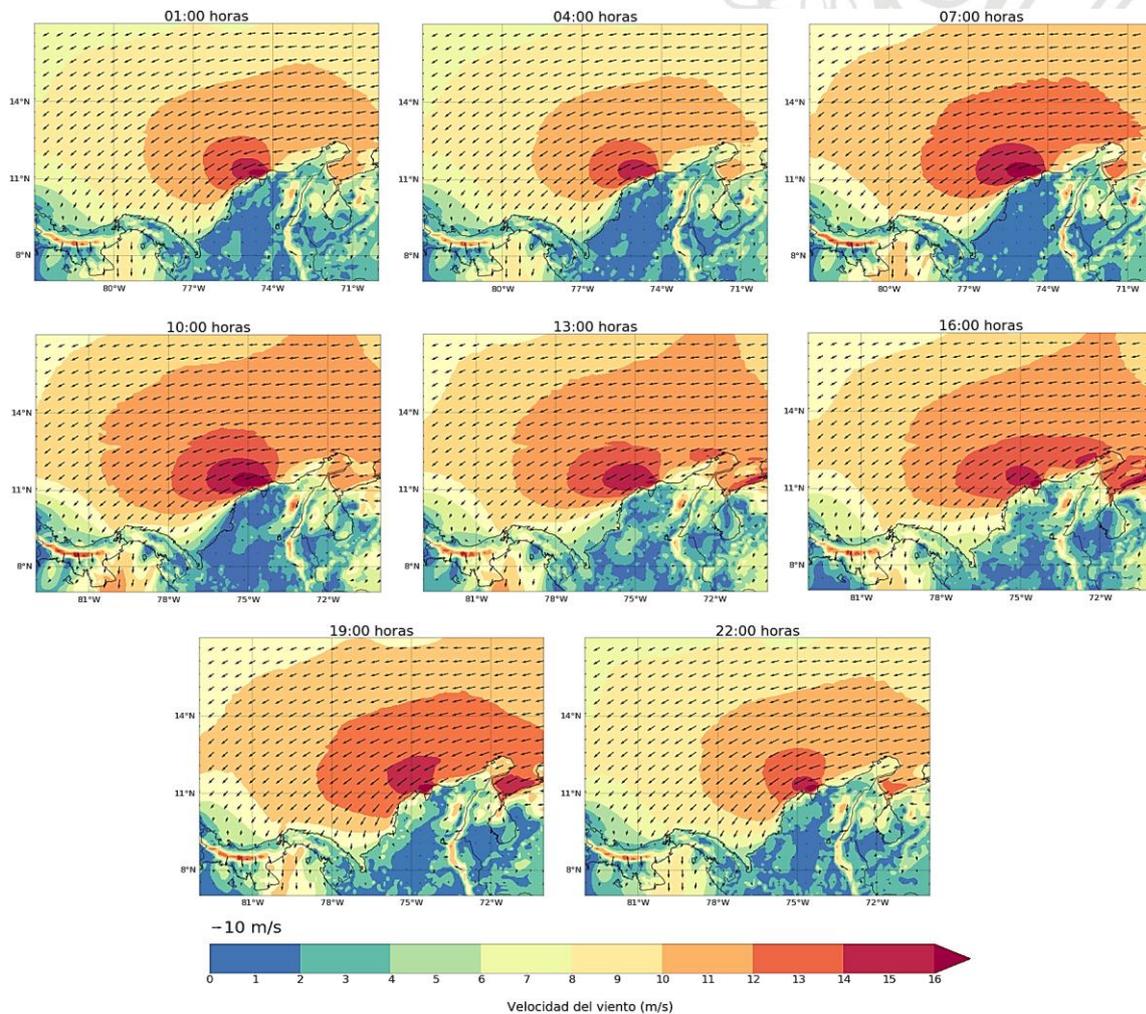


Figura 3. Ciclo diurno promedio multianual de los campos de vientos simulados por WRF durante el mes de enero.

Durante las últimas horas de la noche y las primeras horas de la madrugada (intervalo de 22:00 – 01:00 LT) el núcleo de altas velocidades se contrae, pero se encuentran los valores de velocidades más altos. A partir de las 07:00 LT el núcleo se comienza expandir, pero las velocidades máximas se reducen, este comportamiento se puede identificar también en las velocidades medias. En la figura 4 se puede evidenciar que hacia el mediodía se presentan valores bajos en las magnitudes de las velocidades medias y máximas con valores más altos se durante las primeras horas de la madrugada y en especial en las últimas horas de la noche, tanto en el mes de enero como durante febrero. Por el contrario, el comportamiento de las velocidades mínimas es menos regular presentando valores altos y bajos a diferentes horas del día. Los resultados de las velocidades promedio y mínimas presentados en la figura 4 (B y C) tienen en cuenta los vientos tanto en el océano como en el continente, por lo que sus valores son menores a los que normalmente se reportan en otras investigaciones. El análisis de estas magnitudes en territorio netamente marítimo se presenta en el numeral 5.1.2.

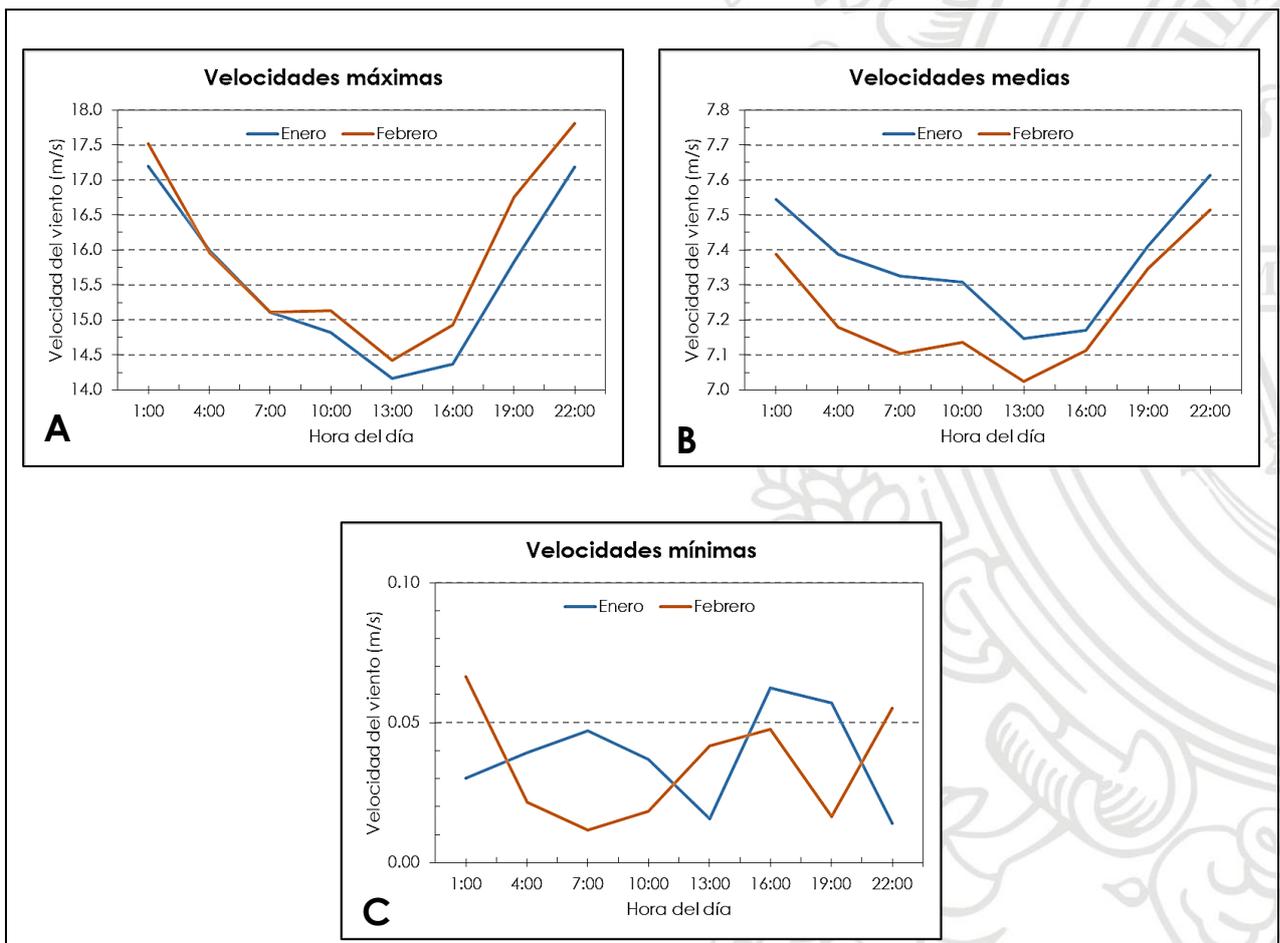


Figura 4. Comportamiento diurno de las velocidades máximas, medias y mínimas simuladas por el modelo WRF durante los meses de enero y febrero, en toda el área de estudio

La dirección del viento durante el día no presenta mayores variaciones durante el mes de enero, predominando los vientos en sentido Este – Oeste (figura 3). Resultados similares han sido obtenidos por Ruiz & Bernal (2009) y Sarmiento-Devia *et al* (2013), pero en ambos casos las velocidades del viento reportadas por ellos son de menor magnitud. Si bien esta diferencia podría estar relacionada con una sobrestimación de la velocidad del viento por parte del modelo, es más probable que se deba a la diferencia de resolución de los datos utilizados, ya que como se demuestra más adelante los datos del reanálisis de ERA5 también reflejan velocidades de mayor magnitud (figura 6). Después de los 75 °W los vientos cercanos a la costa cambian su dirección y se dirigen de forma paralela a la línea continental. En el suroeste del Caribe colombiano por debajo de los 10.5 °N, en la zona comprendida entre el golfo de Morrosquillo, el golfo de Urabá y las costas de Panamá se presenta la mayor dispersión en la dirección del viento el cual cambia de dirección noreste a noroeste, resultados que se ajustan a lo reportado por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar, 2017).

La característica del modelo WRF de seguir la superficie permite identificar zonas continentales donde la magnitud del viento es considerable a nivel de superficie. Las zonas más destacadas corresponden a la Sierra Nevada de Santa Marta y a la Serranía del Perijá en las que se pueden evidenciar velocidades del viento superiores a los 10 m/s y cambios de dirección en diferentes sentidos desde las zonas altas hacia las más bajas. De igual forma se identifican magnitudes del viento más bajas en el centro del continente que en las costas y los respectivos cambios de dirección debido a la rugosidad de la superficie y los gradientes térmicos.

Durante el mes de febrero (figura 5), el ciclo diario del viento no presenta variaciones significativas en cuanto a cambios en la velocidad y la dirección del viento. Sin embargo, se evidencia un desplazamiento hacia el noreste del núcleo de mayor intensidad, el cual durante las horas de la tarde abarca el mar cercano a las costas de la península de La Guajira. Debido a este desplazamiento se registran velocidades de menor magnitud entre el oeste del Caribe y las costas de Centroamérica. Durante este mes la velocidad máxima del viento durante el día es mayor que durante enero, resultados que concuerdan con diferentes investigaciones y los informes del IDEAM sobre el comportamiento de los vientos en el Caribe.

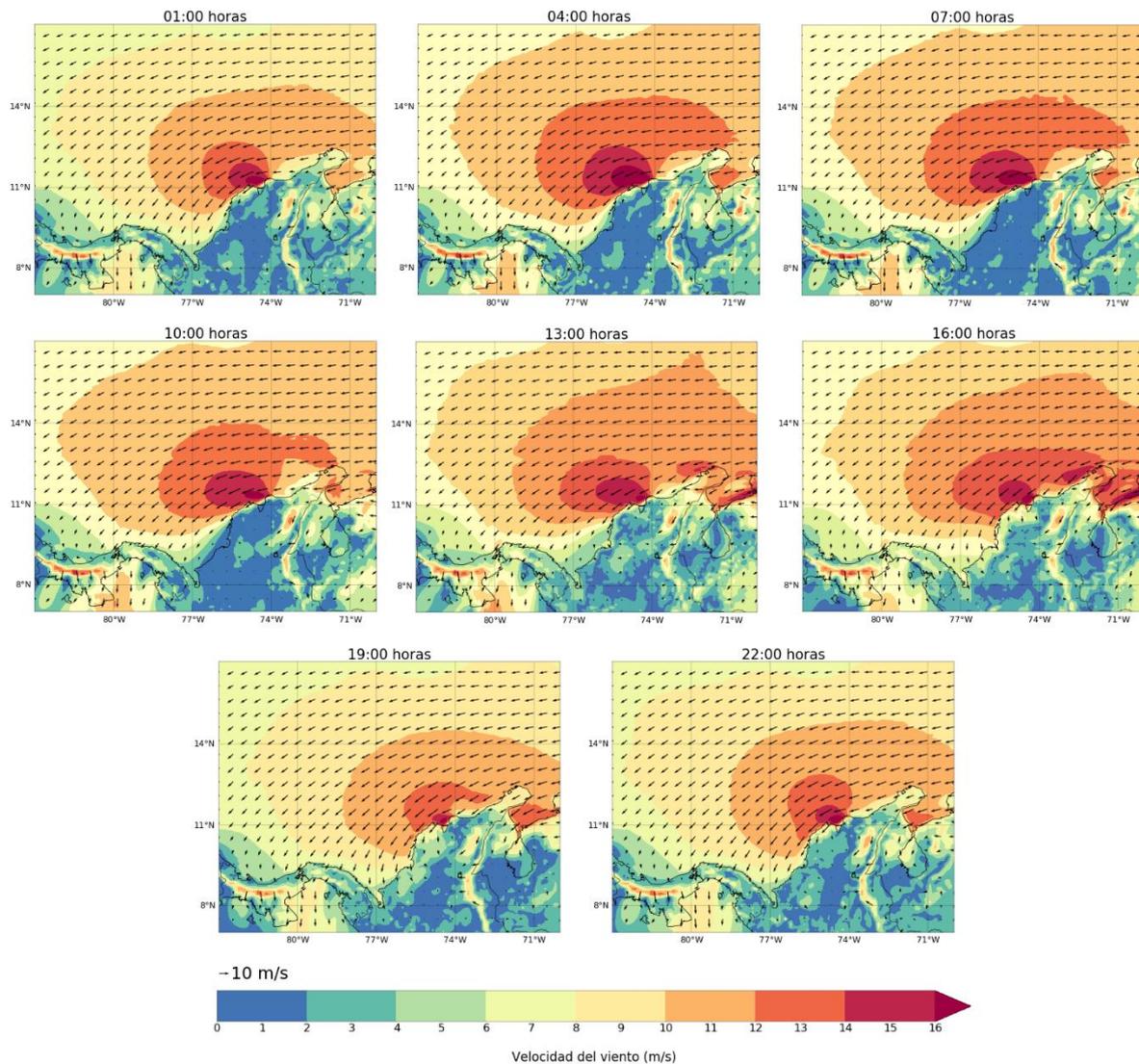


Figura 5. Igual que la figura 3, pero para febrero

5.1.2 Representación y comparación de campos de vientos WRF – ERA5

En términos generales las representaciones del modelo y del reanálisis son consistentes y similares entre ellas. En cuanto al comportamiento de las velocidades máximas durante el día (figura 6 A) se puede evidenciar que tanto ERA5 como WRF mantienen el mismo comportamiento, sin embargo los datos de reanálisis muestran valores ligeramente mayores de velocidad durante el mes de enero, excepto en los extremos del ciclo donde ambos registran la mayor velocidad del viento durante el mes de febrero, siendo de 16,64 m/s para ERA5 a las 22:00 LT y de 16,62 m/s para los datos interpolados de WRF a las 01:00 LT, los cuales se encuentra por debajo del valor máximo promedio encontrado de 17,52 m/s a las 01:00 LT del mes de febrero en los datos del modelo WRF a la resolución de 10 km.

El comportamiento de las velocidades promedio durante el ciclo diurno presenta algunas variaciones entre lo que muestran las dos fuentes de información. Cuando se tiene en cuenta toda el área de estudio, las velocidades promedio están por debajo de los 8 m/s durante todo el día. En este caso tanto ERA5 como WRF reflejan resultados donde la velocidad promedio es mayor durante el mes de enero con valores máximos de 7.53 y 7.73 m/s ambas a las 22:00 horas y menor en febrero donde estos picos de velocidad se reducen a 7.43 y 7.48 respectivamente. Las curvas que representan el ciclo diurno de los datos de ERA5 en la figura 6-B permiten identificar dos valles de bajas velocidades a las 7:00 y 13:00 horas, siendo el de las horas de la mañana el de menor magnitud durante ambos meses. Por el contrario, los datos de WRF representan un ciclo diurno con variaciones menos abruptas y sigue presentando la magnitud de velocidad más baja a las 13:00 horas para los dos meses. En todos los casos las velocidades máximas se siguen registrando a las 22:00 horas LT

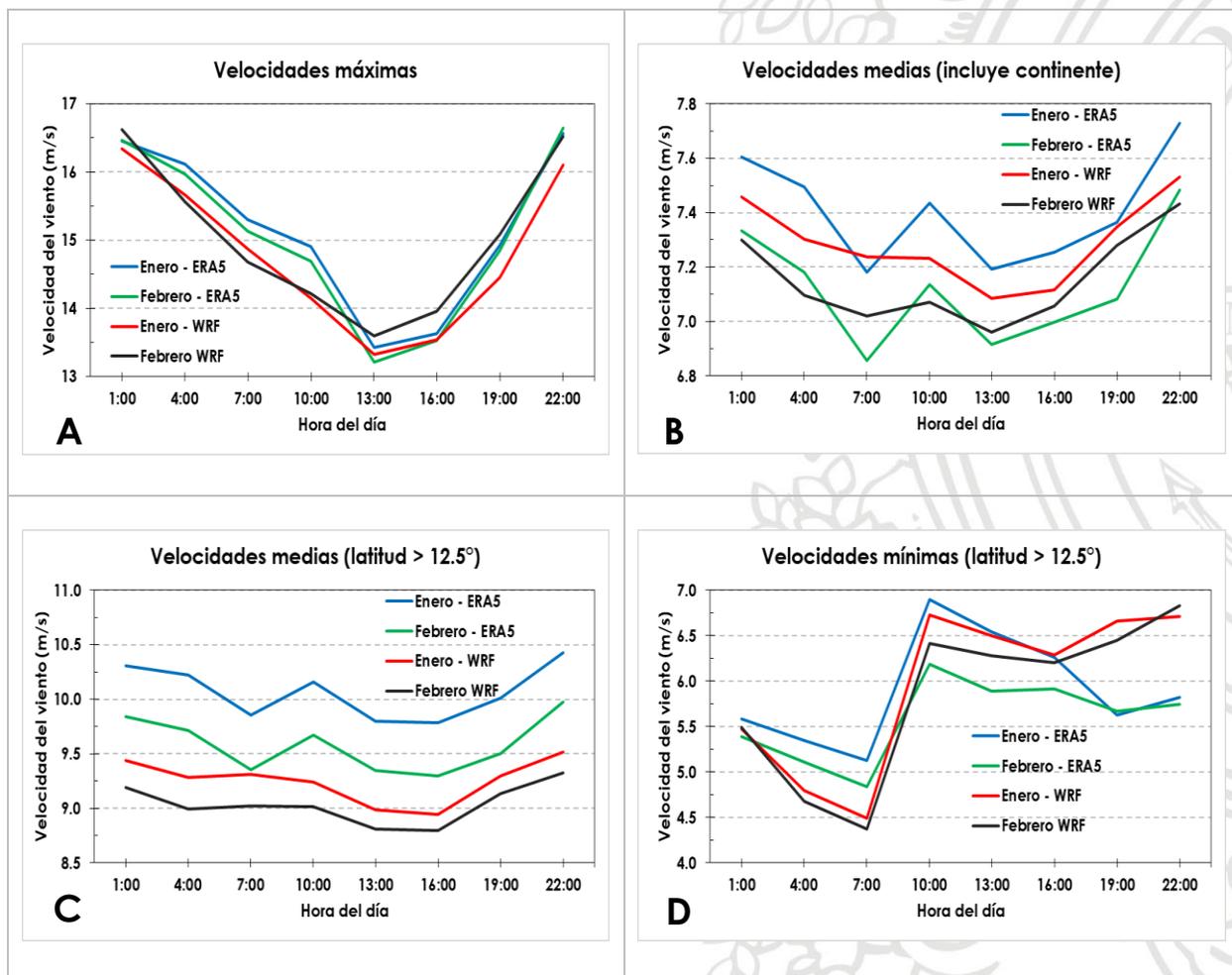


Figura 6. Comportamiento diurno de las velocidades máximas (A), medias teniendo en cuenta la región continental (B), medias marítimas (C) y mínimas marítimas (D) durante los meses de enero y febrero

Cuando se analiza solo la zona por arriba de los 12.5° N, es decir, sin tener en cuenta los vientos en el continente y la zona circundante a los golfos, la magnitud de las velocidades promedio toma valores superiores a los 8.5 m/s. La figura 6-C muestra que en este caso ambos grupos de datos siguen coincidiendo en que la velocidad promedio es mayor en todo el recorrido del ciclo diurno durante el mes de enero. Pero a diferencia de lo que muestra la figura 6-B, en este caso los valores del mes de febrero de ERA5 son mayores que los registrados en enero por el modelo WRF. Esta representación también permite establecer que en el océano las velocidades promedio más bajas se presentan entre las 13:00 y las 16:00 horas tanto en enero como en febrero.

El comportamiento de las velocidades mínimas del viento por encima de los 12.5° N (figura 6-D), difiere completamente de las tendencias que muestran las velocidades máximas y media. Los resultados del comportamiento diurno promedio tanto con WRF como con ERA5, muestran que en enero y febrero se presenta un pico de velocidad mínima a las 10:00 horas, que para el caso de ERA5 es el mayor valor registrado con 6.90 y 6.19 m/s para enero y febrero respectivamente, este mismo comportamiento lo refleja WRF para el mes de enero con una velocidad de 6.72 m/s a esa misma hora. Por el contrario la representación de WRF para el mes de febrero sigue conservando el comportamiento de las demás curvas de las velocidades máximas y medias, con una velocidad más elevada a las 22:00 horas, que en este caso es de mayor magnitud que la de enero al estar por encima de los 6.83 m/s.

La figura 6-D permite encontrar un cambio en la representación del ciclo diurno por parte de las dos fuentes de información en cuanto al comportamiento de la velocidad mínima del viento, puesto que, en todos los casos anteriores, a pesar de las diferencias en los valores de las magnitudes de las velocidades, tanto WRF como ERA5 crecían o decrecían prácticamente en los mismos periodos de tiempo. Sin embargo, en esta grafica se evidencia que a partir de las 16:00 horas hay un cambio de comportamiento ya que mientras los registros de WRF vuelven a aumentar los de ERA5 siguen disminuyendo.

5.1.3 Diferencias espaciales entre las representaciones WRF – ERA5

Se realizó la diferencia entre los campos de magnitud de la velocidad de WRF y ERA5, por lo tanto, valores positivos indican valores mayores de WRF, negativos valores altos de ERA5 y valores cercanos a cero, valores similares entre los dos. En la representación espacial del ciclo diurno presentadas en las figuras 7 y 8 (enero y febrero respectivamente) indican una subestimación de los datos del modelo WRF con respecto a los datos de ERA en el mar del Caribe colombiano, especialmente entre las 7:00 y las 13:00 LT que son más intensas durante enero. Estas diferencias se evidencian claramente en las figuras 6-B y

6-C en las cuales durante esas horas las magnitudes de velocidad de ERA5 se elevan, mientras que las de WRF tienen un comportamiento con cambios muy leves. El modelo hace una sobrestimación de los datos de ERA5 hacia el oeste del Caribe, pero las mayores diferencias se evidencian a lo largo de la línea costera y en el continente sobre las zonas de mayor altura como la sierra nevada de Santa Marta y la serranía del Perijá. Es precisamente en estas zonas al interior del continente donde también se hacen evidentes las diferencias en los cambios de dirección de los datos simulados con respecto al reanálisis de ERA5. Para el mes de febrero se puede evidenciar un desplazamiento en sentido Este – Oeste de las diferencias en las representaciones y una reducción de su magnitud entre los campos de vientos representados con WRF con respecto a los representados con ERA5.

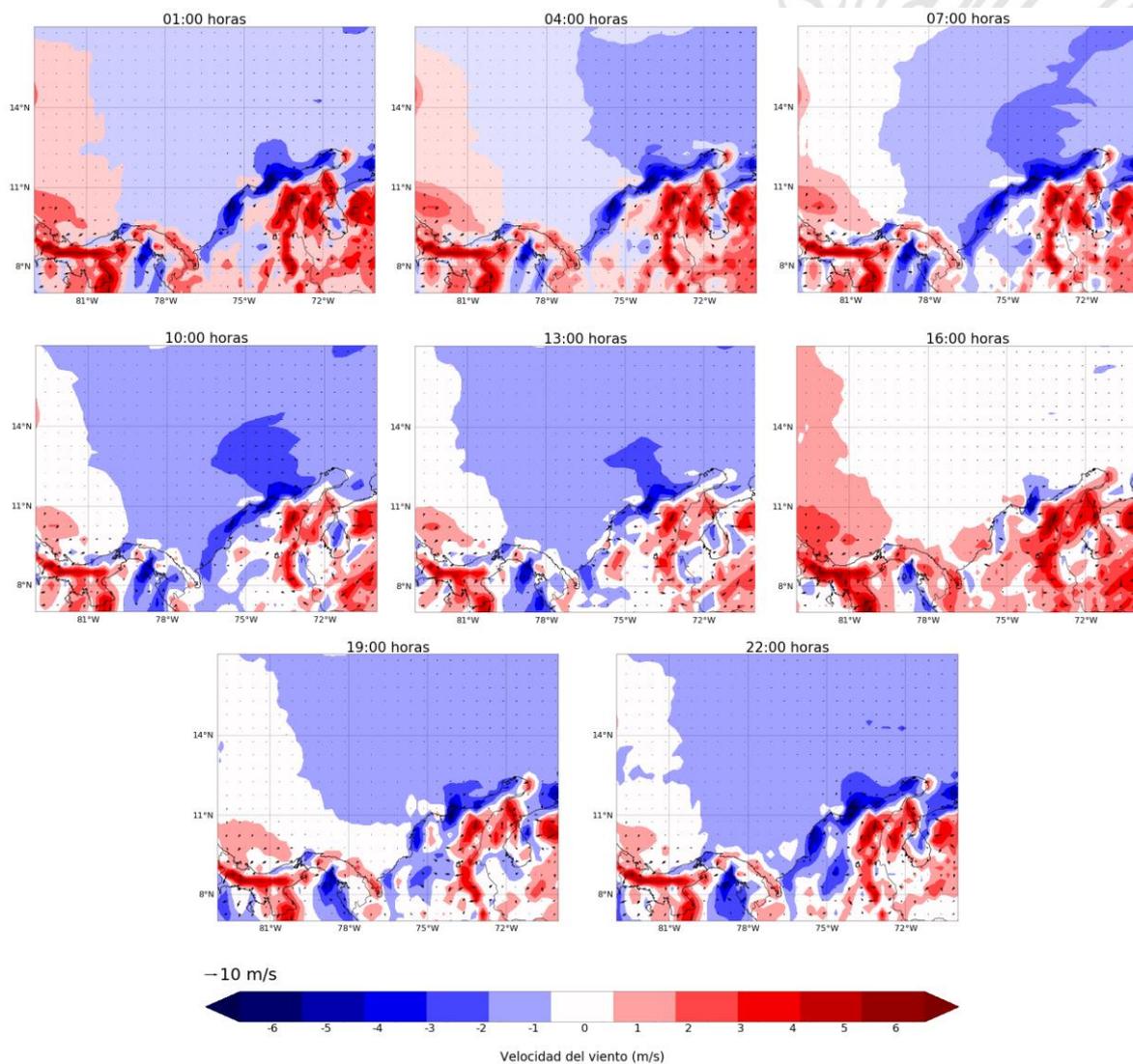


Figura 7. Diferencias de las representaciones del ciclo diario promedio multianual mes de enero. (WRF – ERA5)

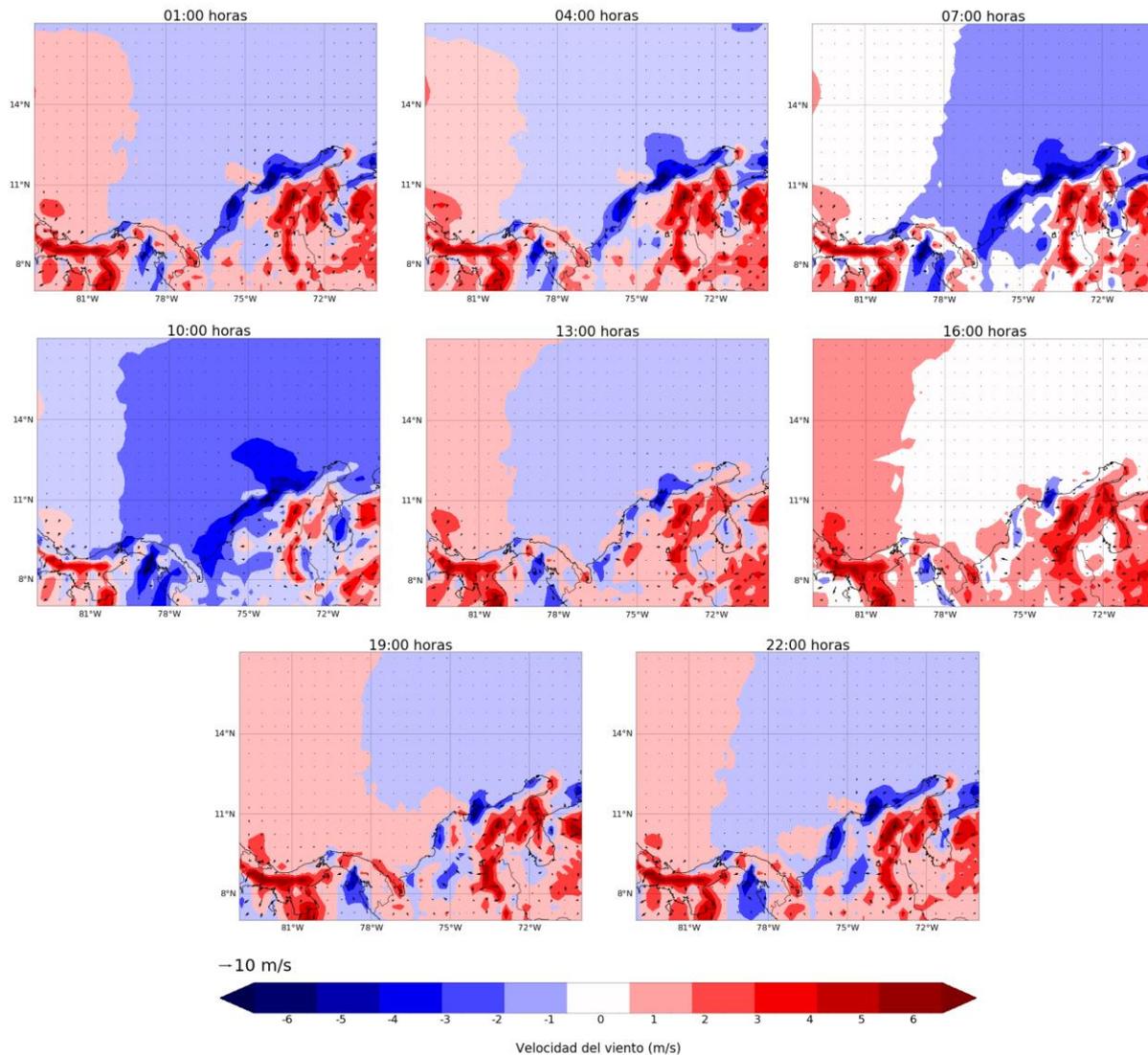


Figura 8. Igual que la figura 7, pero para febrero

La variación del ciclo diurno en las zonas costeras y el continente presentadas en la figura 9, permite evidenciar que el comportamiento de los vientos en el continente durante el día es diferente que en el océano. Las representaciones que hacen WRF y ERA5 de la magnitud de la velocidad del viento en las regiones 1 y 2 de la figura 2 presentan valores similares tanto en enero como en febrero en los cuales las diferencias entre estas fuentes de información se encuentran por debajo de 1.5 m/s para las velocidades máximas e inferior a 0.5 m/s para las velocidades medias. En este caso, ambas fuentes de información coinciden en presentar las velocidades de menor intensidad en horas de la mañana especialmente entre las 07:00 y 10:00 LT. A partir de las 13:00 LT, la intensidad de la velocidad del viento registra un aumento de gran magnitud. En el caso de velocidades máximas se presenta la magnitud más intensa a las 16:00 LT para ERA5 y a las 19:00 LT para WRF. Las velocidades medias presentan menor variabilidad y el pico máximo de la velocidad en

ambos casos se presenta a las 19:00 LT. En todos los casos el modelo WRF tiende a subestimar levemente los datos del reanálisis durante la tarde y a sobreestimarlos durante la mañana, sin embargo, las diferencias de velocidad no son significativas.

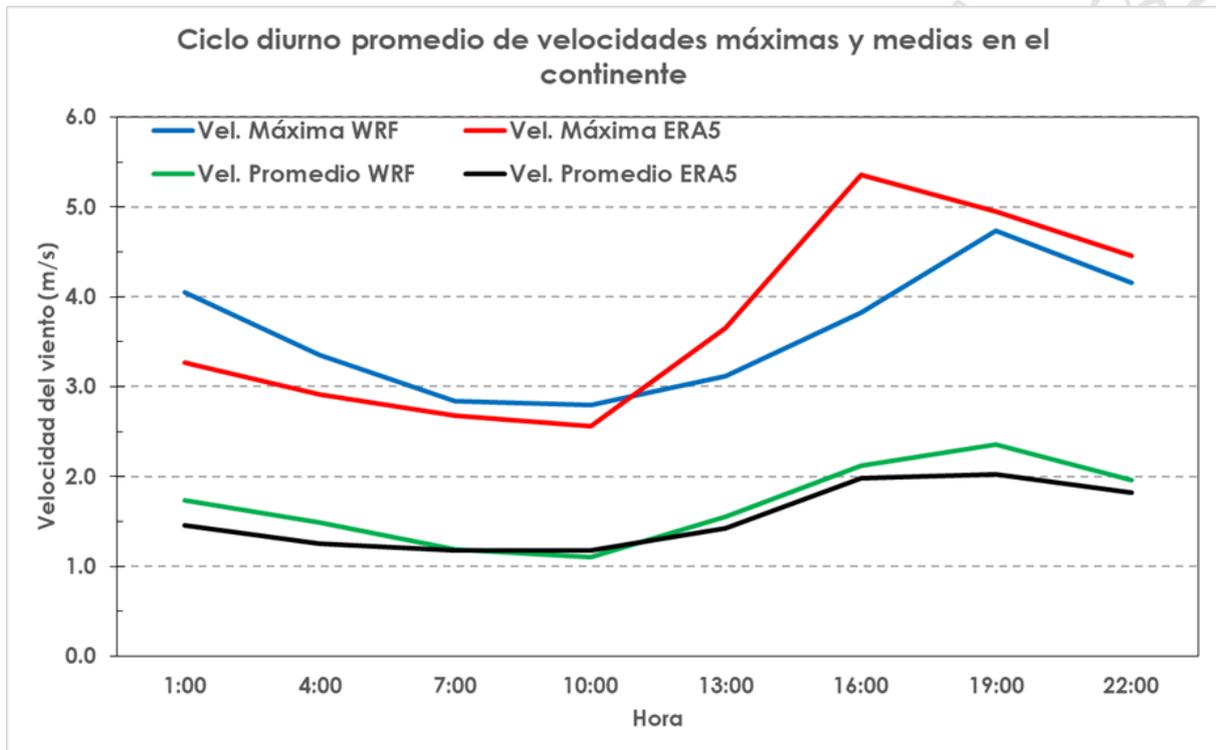


Figura 9. Comportamiento diurno promedio para los meses enero y febrero de las velocidades máximas y medias en las regiones 1 y 2 con las simulaciones de WRF y datos de ERA5.

5.2 Análisis de la estructura vertical del viento.

5.2.1 Representación del perfil vertical de la componente zonal con WRF y ERA5.

La estructura vertical observada en la Figura 10, muestra un comportamiento similar de la componente zonal del viento para los meses de enero y febrero durante el periodo comprendido entre el año 2008 – 2017 alrededor de los 75 °W y entre 1000 hPa y 550 hPa, tanto para WRF como para ERA5. En general sobre la región de estudio se observan valores negativos que de acuerdo con Serna *et al.*, (2018) caracterizan la CLLJ e indican que los vientos en sentido este – oeste, con mayor intensidad sobre el Mar Caribe hacia los 12°N y con menor intensidad sobre el continente hacia los 11°N debido a la rugosidad de la superficie. Además, se logra identificar entre 1000 y 925 hPa (correspondiente a los niveles sigma 0 hasta 6 en WRF y niveles de presión

desde 0 hasta 4 en ERA5) y las latitudes 12 – 16°N aproximadamente, magnitudes de la velocidad que oscilan entre los 12 y 18 m/s, con un núcleo hacia los 12.5°N.

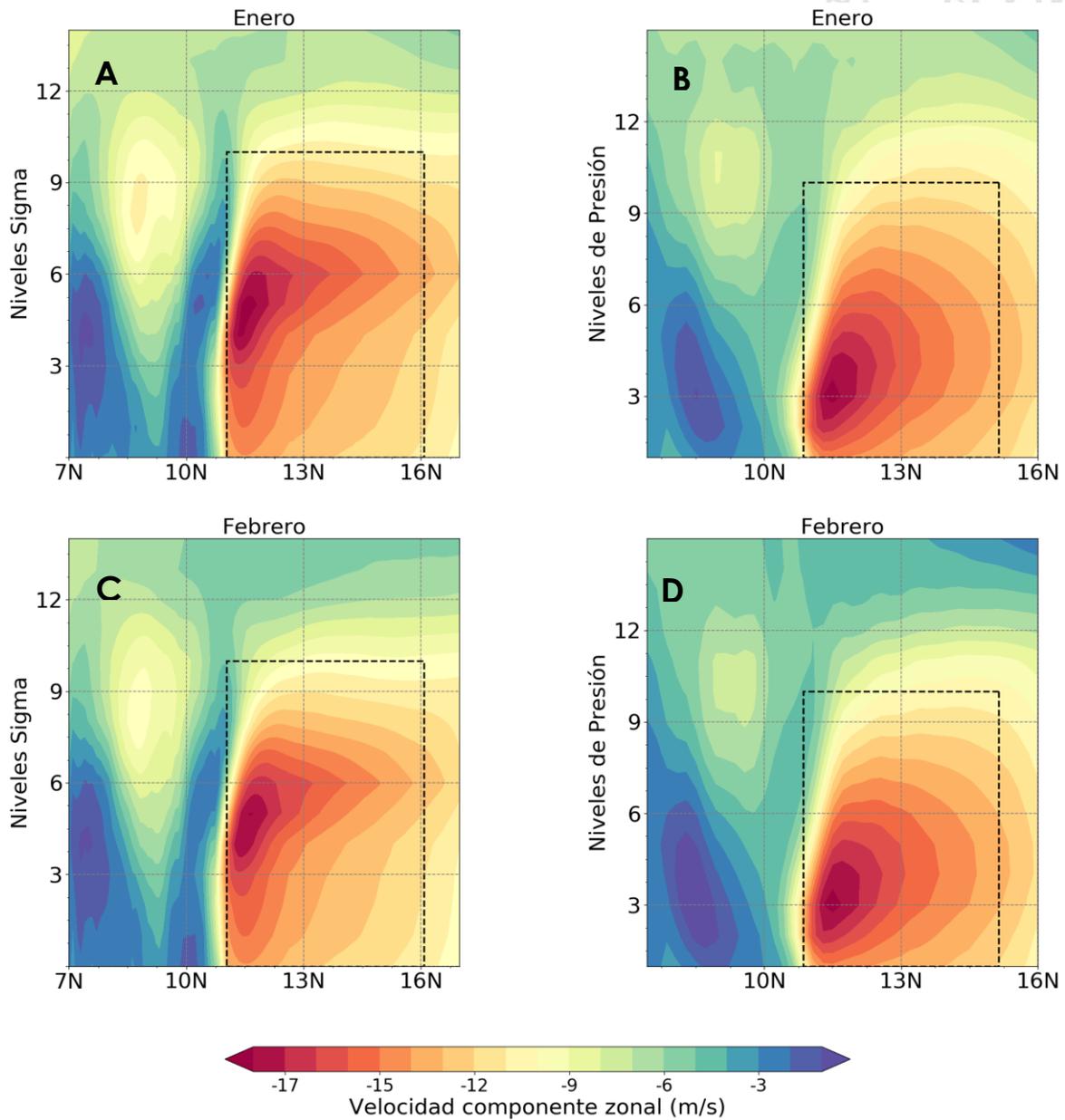


Figura 10. Perfil vertical de la componente zonal a 75°W. (A,C) salidas del modelo WRF (B,D) datos de reanálisis ERA5. El recuadro de color negro señala el área donde se presenta el núcleo de la CLLJ.

5.2.2 Representación del perfil vertical de la componente meridional con WRF y ERA5.

Se realizó un corte del perfil de velocidades a los 12.5°N y se compararon los resultados de WRF y ERA5 para los meses de enero y febrero con el fin de comparar estos resultados con los obtenidos por Wang, 2007. La estructura vertical de la componente meridional del viento, generada a partir de datos de salida del modelo WRF y datos de reanálisis de ERA5 que se muestran en la figura 11, permiten ver numerosas similitudes entre los meses de enero y febrero. Durante ambos meses los vientos son predominantemente negativos en los primeros niveles en la vertical, lo que indica desplazamientos en sentido norte – sur. La magnitud de la velocidad es relativamente baja siendo del orden de 6 m/s e incrementan hacia las zonas cercanas a los 74 °W por la acción del CLLJ que de acuerdo con investigadores como Pareja *et al*, (2013), Serna *et al*, (2018) y Poveda *et al* (2014), se intensifica en velocidad y cobertura espacial en la temporada seca principal que corresponde a los meses de diciembre-enero-febrero. (DEF).

En consideración de los resultados obtenidos a partir de los datos del modelo WRF y datos de reanálisis de ERA5 y apoyados en la figura 6, durante los meses de enero y febrero, el comportamiento de la velocidad representado con ambas fuentes de información denota resultados similares.

5.2.3 Comportamiento de la componente Zonal.

Debido a la similitud entre los valores de magnitud mostrados por WRF y ERA5, se analizó la componente zonal de WRF en tres longitudes diferentes, con el fin de estudiar la estructura espacial de la CLLJ. La Figura 12 se muestra para los meses de enero y febrero cortes latitudinales de la componente zonal del viento en las coordenadas 70, 75 y 80 °W. Se observan vientos predominantemente provenientes del este con variaciones en magnitud y cobertura. Entre los 11-16 °N y los niveles sigma 0 y sigma 9, la magnitud de la velocidad de la componente zonal a los 70°W oscila entre -8 y -14 m/s, a los 75 °W tiene valores de -9 y -17 m/s, y en los 80 °W las velocidades oscilan en el intervalo -7 y -11 m/s con máximos situados entre los niveles sigma 5 y 9. Los resultados sugieren que la CLLJ disminuye su intensidad conforme se desplaza hacia el oeste de los 75°W donde se encuentra el núcleo de mayor intensidad.

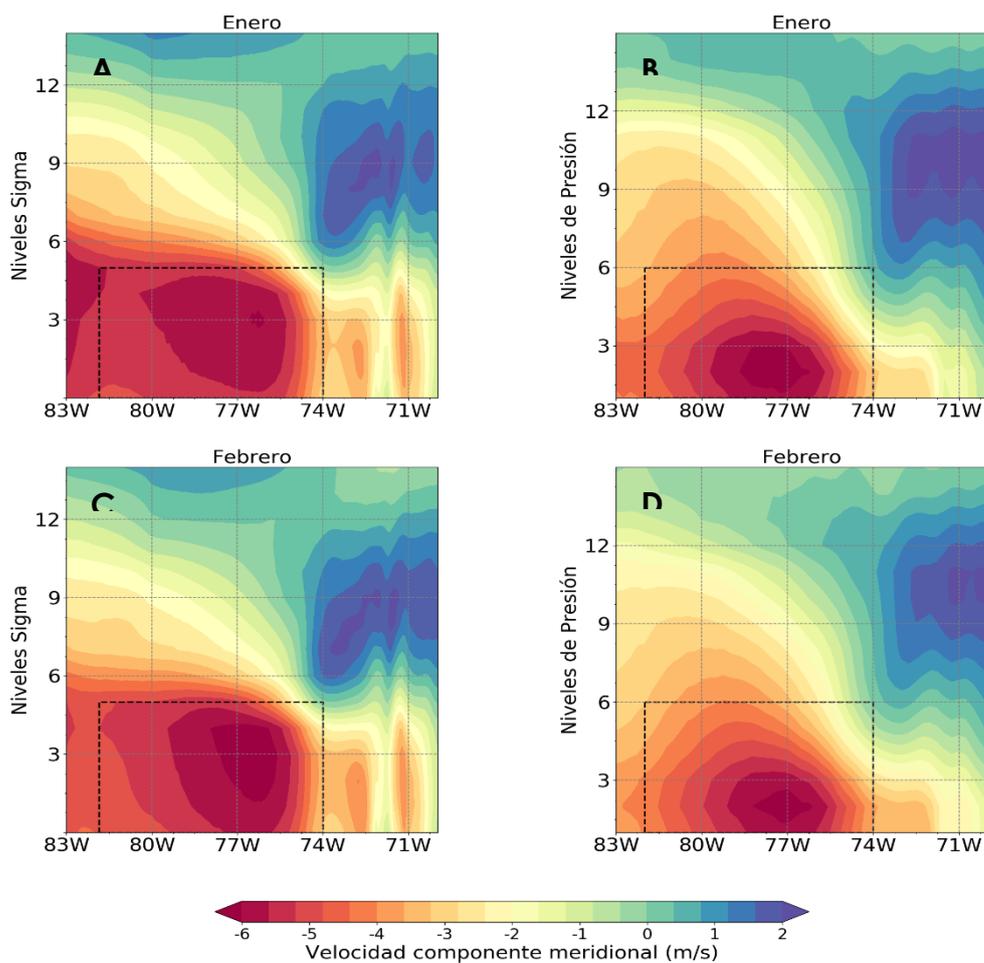


Figura 11. Igual que la Figura 9, pero para la componente meridional a 12.5°N

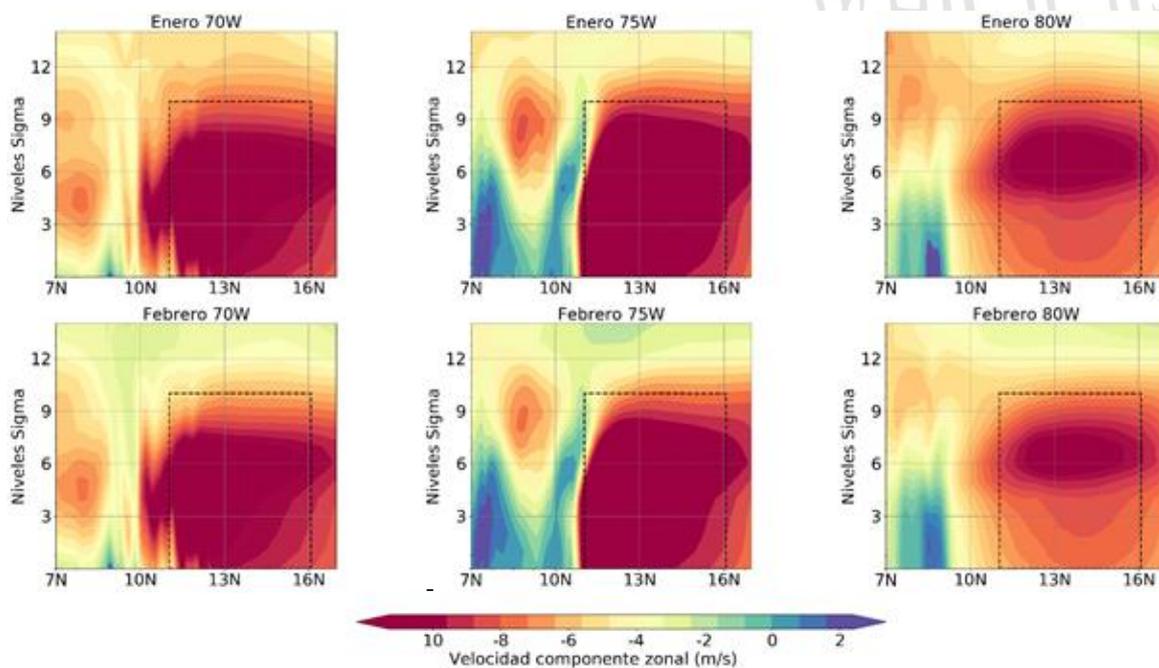


Figura 12. Perfiles verticales de la componente zonal durante los meses de enero y febrero a 70 – 75 y 80 °W con WRF

5.3 Influencias de las fases del ENSO en los vientos del Caribe

De acuerdo con la figura 1 durante el periodo de 2008 a 2017 se han presentado eventos El Niño (EN) y La Niña (LN) de diferentes magnitudes al igual que años considerados neutros. En los resultados presentados a continuación se tomaron como referencias de análisis los años 2008 y 2011 como años LN, 2010 y 2016 como años EN y los años 2013 y 2014 como años neutros.

5.3.1 Comportamiento del viento durante años EN

Durante los años en que se presenta la fase EN se presentan magnitudes promedio y velocidades máximas menores que la media multianual durante ambos meses, los campos de viento de las simulaciones del WRF (figura 13) permiten encontrar registro de velocidades en el nivel más cercano a la superficie superiores a los 17 m/s durante el mes de febrero en el núcleo ubicado frente a la bahía de Santa Marta. En el suroeste del Caribe se presentan los mayores cambios de dirección y las magnitudes más bajas.

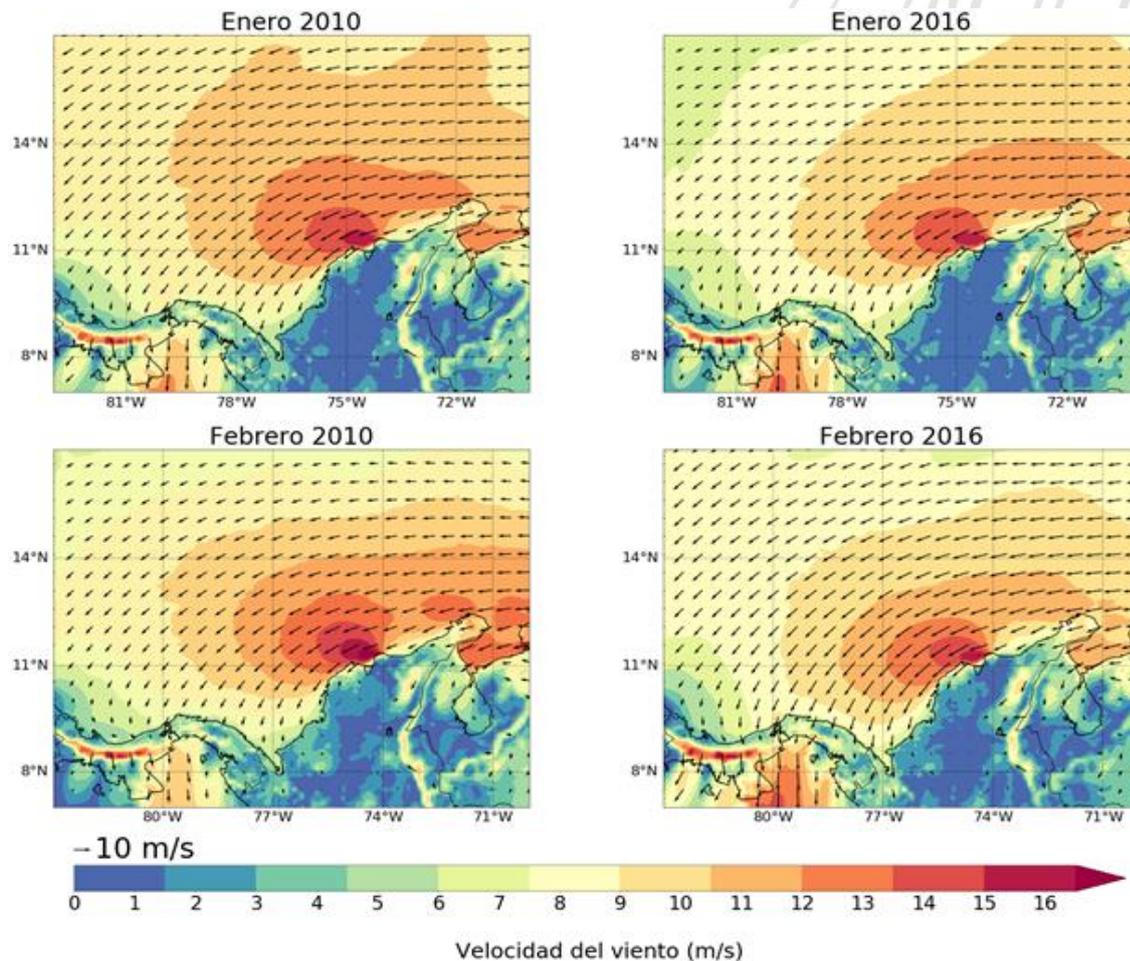


Figura 13. Campos de viento simulados con el modelo WRF a resolución original durante eventos EN

ERA5 presenta un comportamiento similar en la representación del viento durante la fase EN (figura 14) sin embargo no alcanza las velocidades pico que logra representar el modelo WRF en zonas muy pequeñas para su resolución espacial, pero el comportamiento promedio tanto en velocidad como dirección son similares. Sin embargo, en la línea costera y en especial entre el golfo de Morrosquillo y el norte Urabá permite identificar un cambio de sentido en la dirección del viento que es más evidente durante el año 2016 el cual durante enero y febrero el viento en esa zona ingresa al continente con mayor velocidad y en dirección Suroeste – Este.

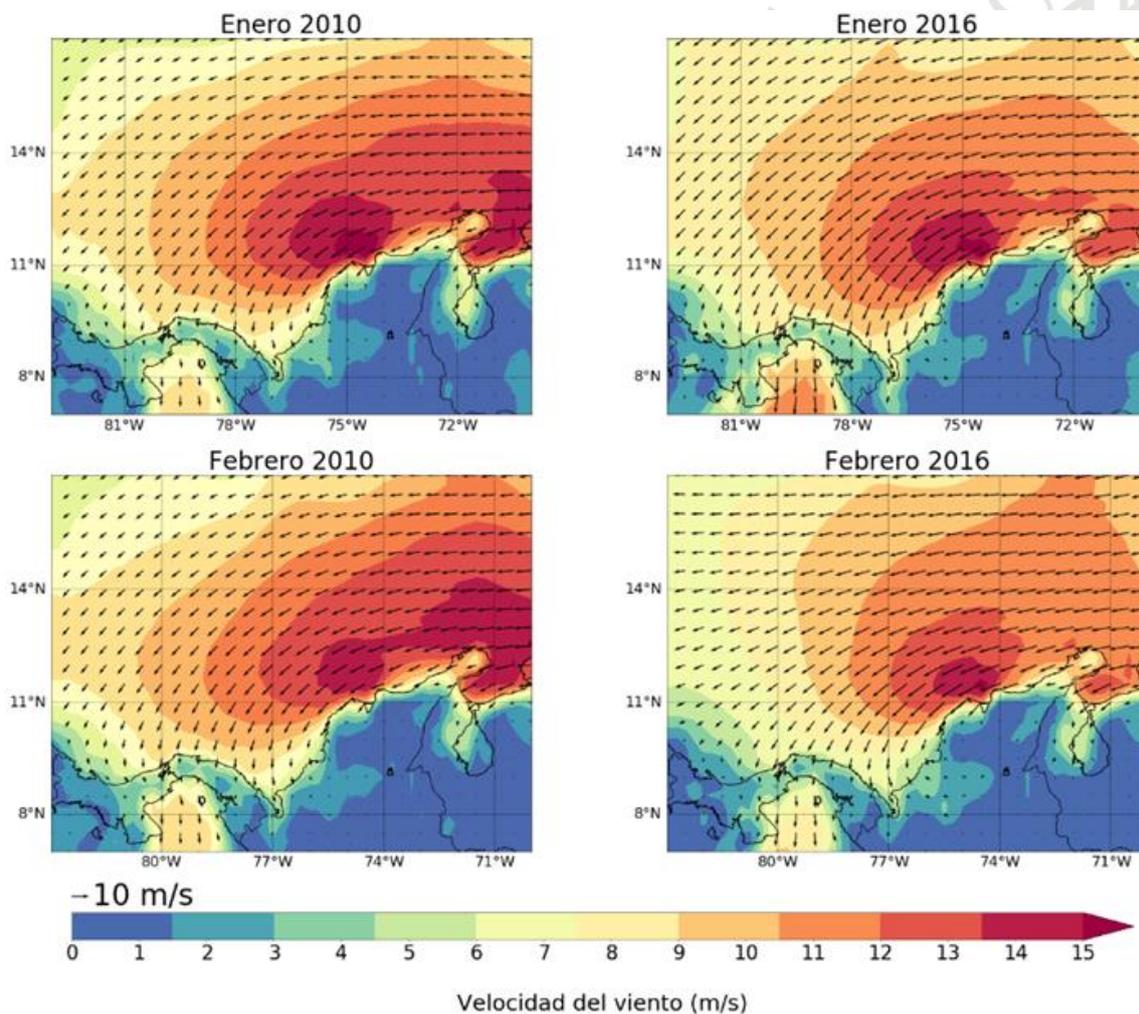


Figura 14. Igual que la figura 13, pero con los datos de ERA5

El comportamiento de las velocidades máximas muestra que los datos de la simulación del modelo presentan una mayor variabilidad intra e interanual, en la figura 15 se puede observar que mientras los datos de ERA5 muestra variaciones menores a 1 m/s entre un mes y otro y tiene una tendencia en la que las velocidades durante enero son ligeramente mayores que durante febrero de los eventos EN analizados. Por el contrario, WRF tanto en su resolución original como en los datos interpolados presenta una variación

entre el fenómeno del año 2010 y el del 2016 con valores de velocidad máxima más alta durante enero y luego en febrero, respectivamente.

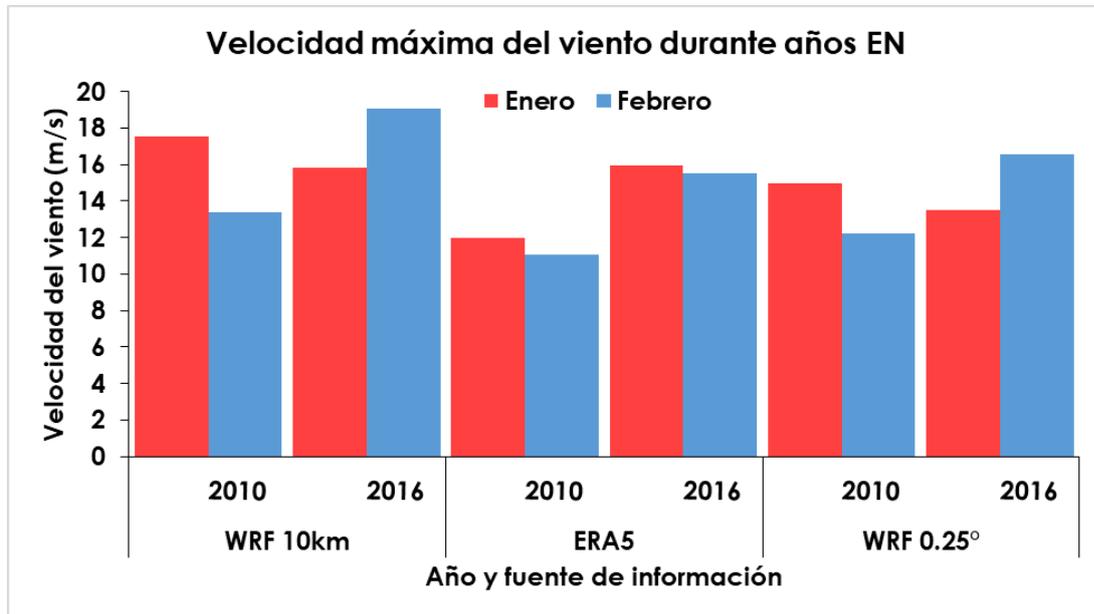


Figura 15. Comportamiento de la velocidad máxima del viento durante años con influencia de eventos EN

Durante los años EN la cobertura espacial del núcleo de mayor intensidad de la componente zonal se reduce especialmente durante los meses de enero, lo que concuerda con lo expresado por diversos investigadores como Amador (2008), Wang (2007) y Serna *et al.* (2018), entre otros. Sin embargo, durante el mes de febrero de cada uno de los años analizados se evidencia un mayor fortalecimiento de la componente meridional en dirección Norte – Sur, especialmente en la región suroeste lo que explica el cambio de dirección del viento más pronunciado en inmediaciones de los golfos de Urabá y Morrosquillo, entre los 12 y 8 ° N lo que explica la curvatura de la dirección del viento en esta región de acuerdo con lo encontrado por Andrade & Barton (2013).

5.3.2 Comportamiento del viento durante años LN y neutros.

El comportamiento de los vientos durante los eventos LN analizados muestra una mayor cobertura espacial de los vientos de magnitudes mayores, especialmente durante los meses de enero. Los patrones en el cambio de dirección del viento no son significativos. Tanto los datos de las simulaciones del modelo WRF como los de ERA5 evidencian comportamientos similares entre ambas a pesar de la diferencia de resolución espacial. Las componentes

del viento durante LN permiten evidenciar que la componente zonal se intensifica en gran parte del Caribe. Mientras que la componente meridional es más débil en el norte y centro del Caribe, pero se fortalece en la suroeste con un punto de origen marcado en el núcleo de mayores velocidades al igual que sucede durante eventos EN, pero en este caso la intensidad de componente en dirección Norte – Sur es menor. Las magnitudes de la componente zonal presentadas en la tabla 2 permiten establecer que todas las representaciones tienen comportamientos similares en los que la componente zonal del viento es mayor durante los meses de enero tanto en los años neutros como en los años LN, confirmando las similitudes entre ambas fuentes de información. En los casos analizados se evidencia también un fortalecimiento mayor durante los años con condiciones neutras con respecto a los influenciado por la fase LN.

Las condiciones atmosféricas durante los años considerados como neutrales generalmente son más parecidas a las de los años con influencias de la fase LN del ENSO, sin embargo, se presentan variaciones importantes en algunas variables atmosféricas siendo la más estudiada de ellas la precipitación (Serna *et al*, 2018). Los campos de viento de los años 2013 y 2014 representan tales condiciones de similitud entre las dos condiciones con diferencias menos significativas en cuanto a las magnitudes de la velocidad y la dirección predominante del viento, dominada por los vientos en dirección hacia el este del CLLJ en el norte y centro del Caribe y el cambio hacia el Sur cerca de la costa en el suroeste del Caribe colombiano y las costas de Panamá que se evidencia por el comportamiento de las componentes U y V.

Tabla 2. Magnitudes máximas de la componente zonal (m/s) en sentido Este-Oeste durante años neutros (2013 - 2014) y años LN (2008 – 2011).

MES	2013	2014	2008	2011	Fuente
ENERO	-14.26	-13.63	-13.87	-12.05	WRF 10 km
	-13.49	-13.97	-13.64	-13.31	ERA5
	-13.81	-13.52	-12.65	-11.19	WRF 0.25°
FEBRERO	-13.69	-13.70	-12.77	-13.47	WRF 10 km
	-11.73	-12.34	-12.94	-12.19	ERA5
	-13.35	-13.43	-12.69	-12.81	WRF 0.25°

5.3.4 Análisis de las diferencias entre EN, LN y años neutros.

La dinámica de los vientos en el Caribe responde a la variabilidad del CLLJ y este a su vez es altamente influenciado por la ocurrencia escalonada de las fases del ENSO (Bernal *et al*, 2010). En la figura 16 se presentan las diferencias promedio para los meses de enero y febrero de los años de referencia EN (2010), LN (2011) y neutro (2013) siendo cada uno de estos años representativo en cuanto a intensidad y estabilidad de cada condición. Las figuras 16-A y 16-C muestran la diferencia en las magnitudes de la velocidad entre los años EN y neutro. En estas los contornos azules que se presentan en la zona oceánica indican que la velocidad del viento es menor durante las condiciones EN, estos resultados concuerdan con la literatura respecto al debilitamiento de los vientos en el Caribe durante fenómenos EN. Los vientos continentales en febrero, presentan un comportamiento diferente, predominando vientos más intensos durante las condiciones EN. En cuanto al comportamiento de las diferencias entre LN y condiciones neutrales (figuras 16-B y 16-D) las diferencias son menores respecto a EN, sin embargo, el modelo simula vientos de mayor intensidad durante el año neutro de referencia, sin embargo, a nivel continental durante enero se presentan valores positivos que representan una mayor intensidad del viento durante LN.

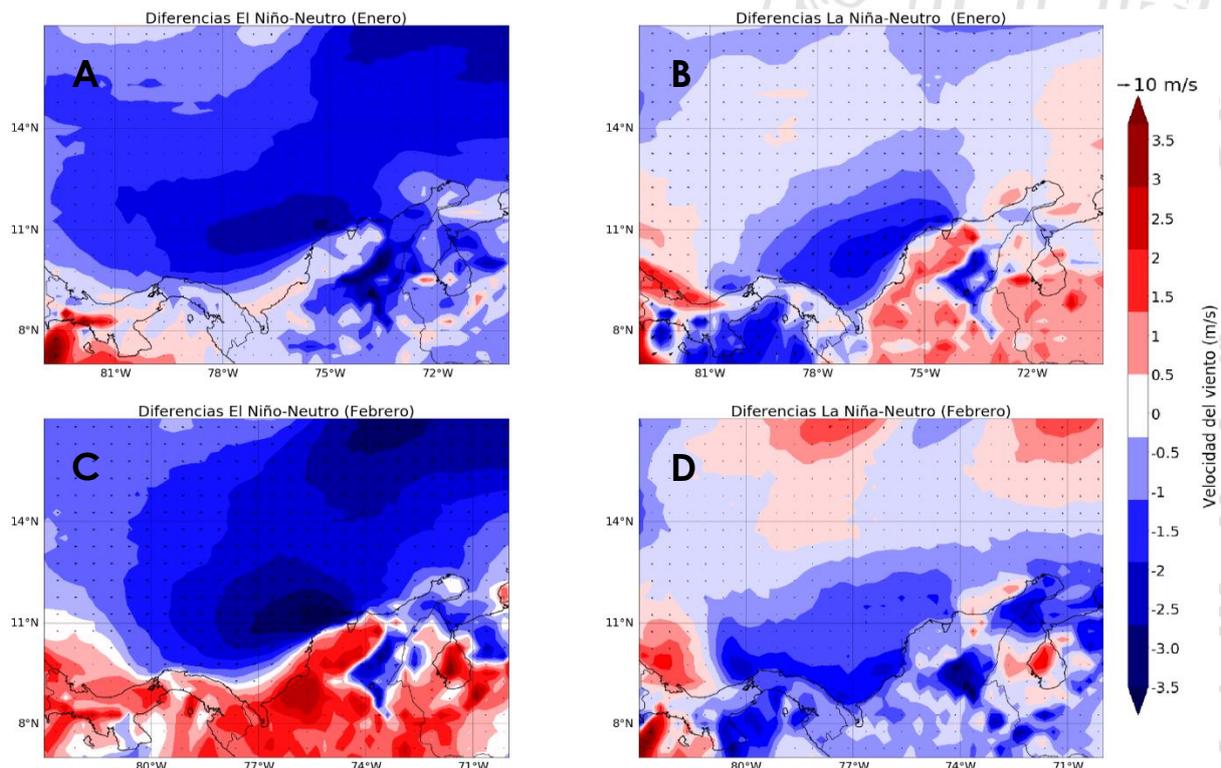


Figura 16. Diferencias en el comportamiento de los campos de viento entre las fases del ENSO y años neutrales simulados con el modelo WRF

Los resultados de las diferencias entre las fases del ENSO y condiciones neutrales simulados con el modelo WRF permiten establecer que el modelo tiende a sobrestimar la magnitud del viento respecto a ERA5, durante los años neutrales, pero es consistente en presentar velocidades más bajas durante las condiciones EN tal y como lo registran las investigaciones referenciadas. Los resultados sugieren que en general, las condiciones de LN y años neutros son similares.

Las diferencias encontradas con los datos del reanálisis ERA5 durante la fase EN del ENSO con respecto al año neutral (16-A y 16-C) presenta un comportamiento similar a las de la simulación del WRF en la región oceánica, sin embargo las condiciones a nivel continental difieren de una representación a otra, pero en ambos casos se presenta un aumento de la velocidad del viento durante EN de un mes a otro. Las mayores diferencias entre las simulaciones de WRF y ERA5 se evidencian en la representación de la magnitud de la velocidad durante los eventos LN. Como se evidencia en las figuras 17-B y 17-D donde predominan los contornos rojos en el mar Caribe indicando que los vientos durante el año LN fueron mayores que los del año neutro.

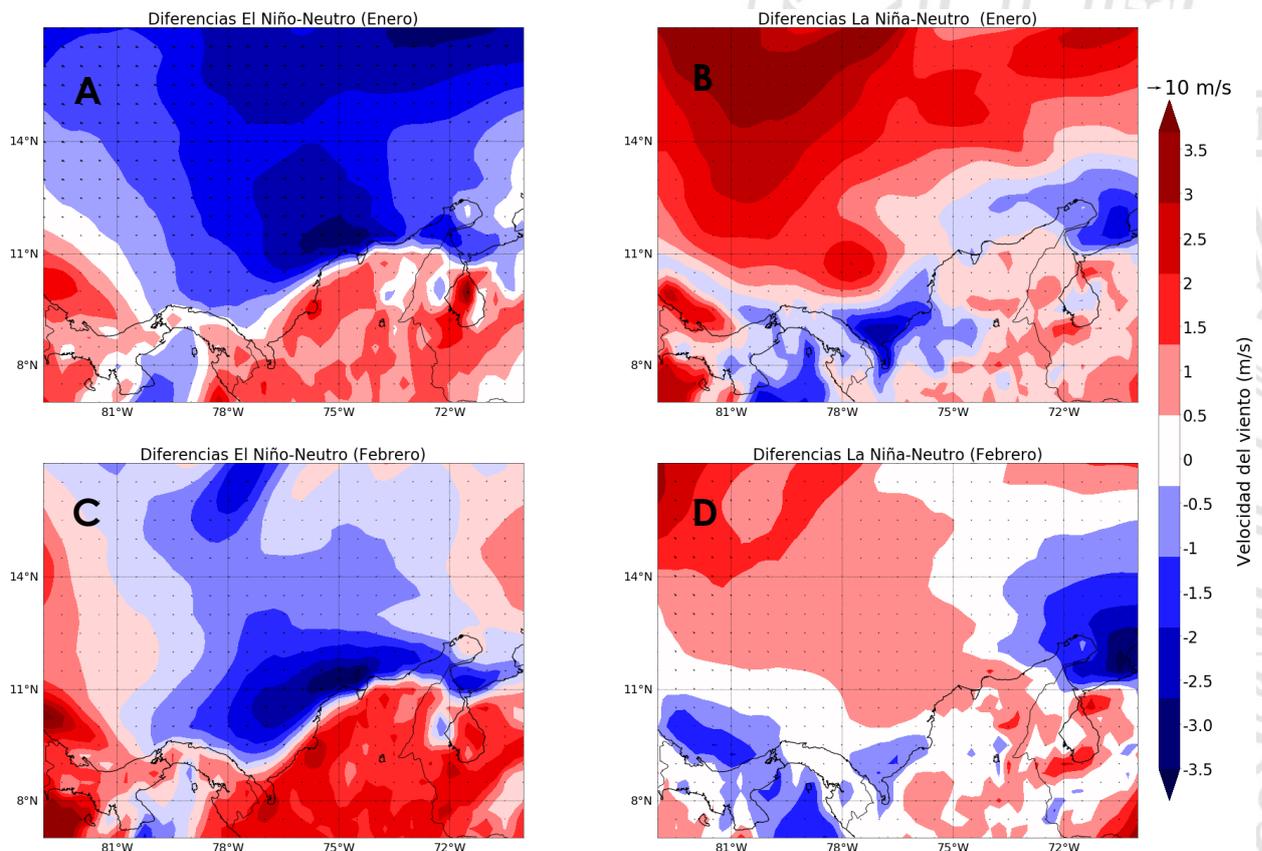


Figura 17. Igual que la figura 16 pero para datos de ERA5

En los datos de ERA5 se evidencia en la zona del golfo de Urabá tanto marítima como terrestre, así como el mar frente a las costas del departamento de Córdoba y territorios continentales cercanos un comportamiento diferente al resto del Caribe, en esta región a diferencia del resto del Caribe los vientos son mayores durante los años EN, esta particularidad puede estar relacionada con el fortalecimiento de la corriente de chorro del Chocó durante esta fase del ENSO como concluyen entre otros Poveda *et al* (2014) y Serna *et al* (2018).

El comportamiento de la componente zonal del viento que modula el comportamiento del CLLJ con valores negativos debido a su sentido predominante y que se manifiesta con mayor magnitud durante el primer trimestre del año (Ruiz, 2009; Serna *et al*, 2018) es representado por el modelo WRF con una mayor magnitud durante los años neutrales, debido a esto en los paneles de la figura 18 predominan los tonos rojos que indican vientos zonales más fuertes en el océano durante las condiciones neutras con algunas variaciones a nivel continental principalmente en las diferencias EN – neutro del mes de febrero.

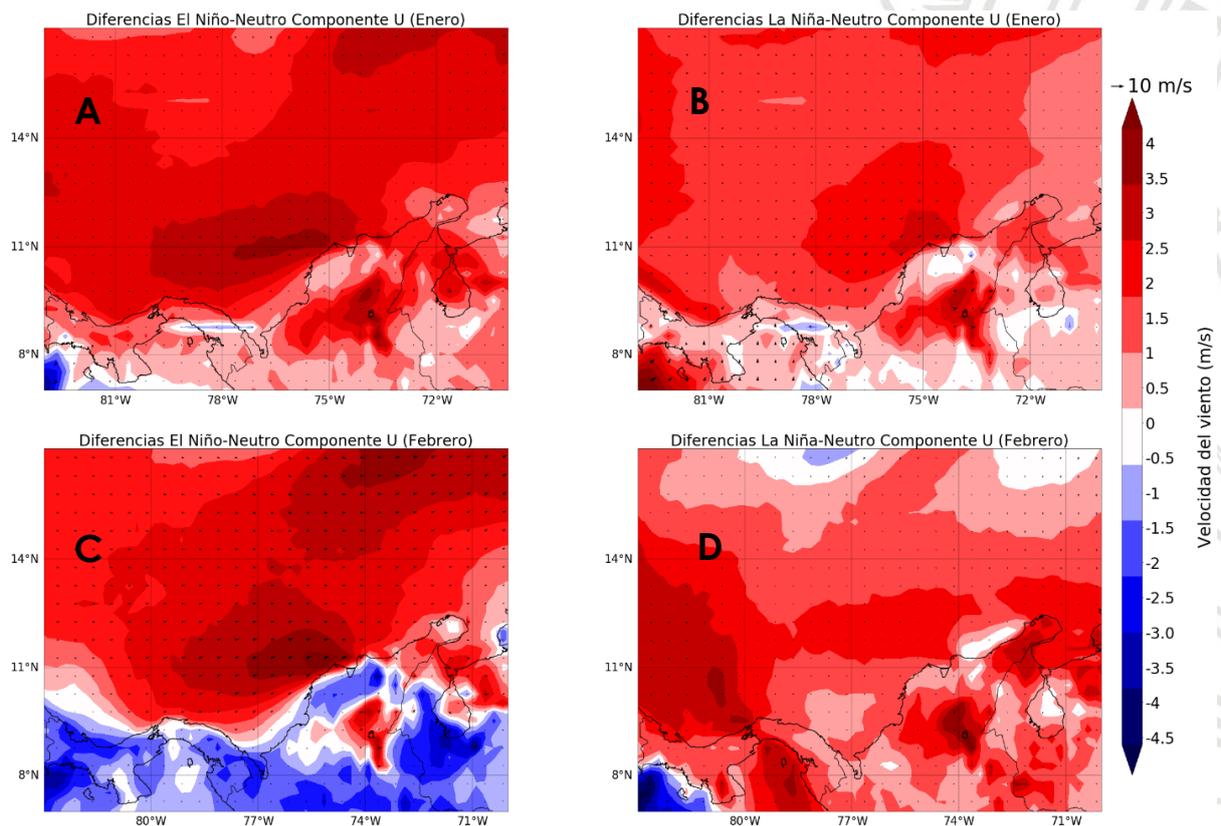


Figura 18. Diferencias en el comportamiento de la componente zonal del viento entre las fases del ENSO y años neutrales simulados con el modelo WRF

Para el caso de la representación del comportamiento de la componente U con los datos de ERA5, se confirma la diferencia presentada en las gráficas de velocidades con respecto a subestimación que hace el modelo durante la

fase LN del ENSO. Las figuras 19-A y 19-C muestran como la componente zonal del viento se debilita en el océano durante EN, pero se fortalece dentro del continente. El comportamiento de la componente meridional del viento sigue los mismos patrones tanto para las simulaciones como para el reanálisis pero con variaciones menos significativas que las presentadas en los cambios de la componente zonal.

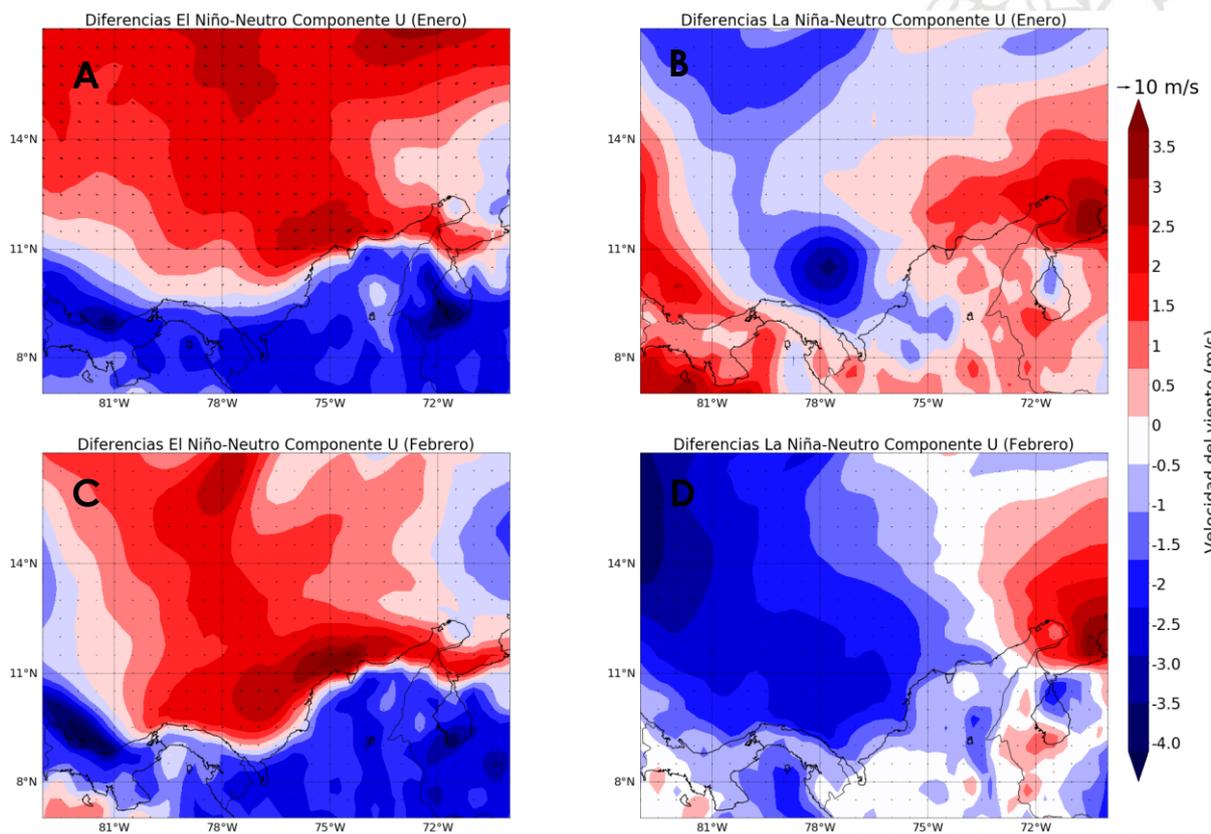


Figura 19. Igual que la figura 18, pero para datos de ERA5

5.4. Validación de la información

La validación de la información se presenta mediante el análisis del comportamiento de la velocidad media diaria promedio de las estaciones identificadas en la tabla 1, con la información obtenida de los puntos con coordenadas más cercanas a ellas extraídos de los datos del modelo WRF y ERA5. La información de la tabla 3 contiene la ubicación de los puntos de extracción de las series de tiempo utilizadas para la comparación de los datos de las fuentes de información con los datos medidos *in situ* por el IDEAM.

Tabla 3. Coordenadas de los puntos de obtención de información para la validación de los datos con la información de las estaciones del IDEAM.

Estación de referencia	Latitud WRF 10 km	Longitud WRF 10 km	Latitud WRF 0.25°	Longitud WRF 0.25°	Latitud ERA5	Longitud ERA5
Galerazamba	10.78	-75.28	10.77	-75.14	10.75	-75.25
Almirante Padilla	11.49	-73.00	11.52	-72.89	11.50	-73.00
Simón Bolívar	11.08	-74.24	11.02	-74.14	11.00	-74.25
Rafael Núñez	10.47	-75.49	10.52	-75.39	10.50	-75.50

5.4.1. Estación Galerazamba

La figura 20 muestra el comportamiento promedio de la velocidad del viento registrado por la estación meteorológica del IDEAM (línea negra) de enero y febrero. Se puede evidenciar que para esta estación los datos simulados por el modelo WRF y ERA5 siguen la misma tendencia que las mediciones. En el caso del modelo WRF tiende a subestimar los datos siendo más evidente en la representación interpolada del mes de enero. Para ambos meses la representación de ERA5 sobrestima la velocidad registrada por la estación.

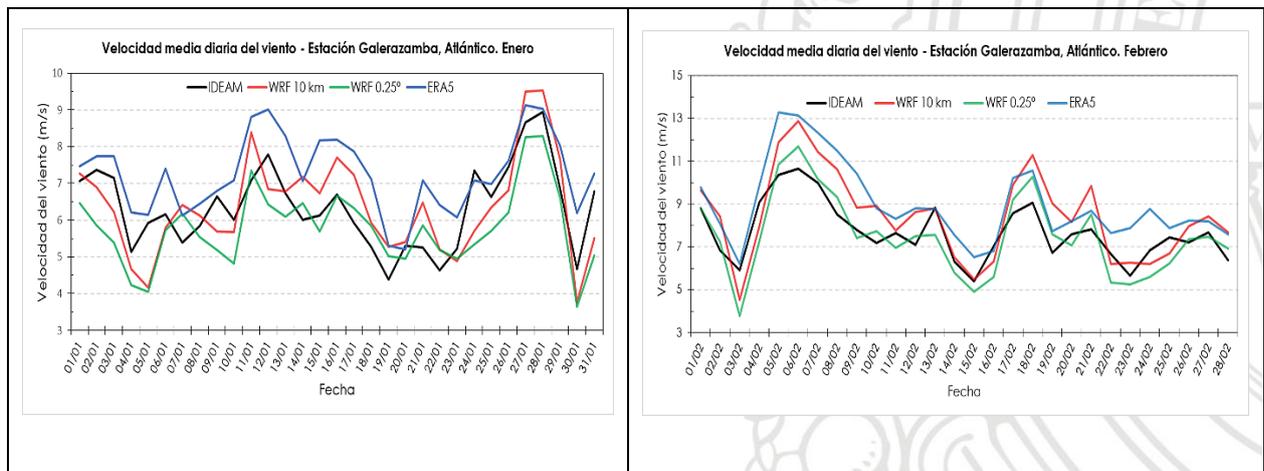


Figura 20. Comportamiento de la velocidad media diaria en la estación Galerazamba para mediciones del IDEAM y representaciones de WRF y ERA5

La validación mediante las métricas estadísticas utilizadas, presentadas en la tabla 4 permite encontrar un menor error entre las simulaciones del modelo y las mediciones *in situ*, sin embargo, los datos de reanálisis tienen una mayor correlación, es decir representan muy bien la tendencia de las mediciones aunque con valores más elevados. La desviación estándar de los datos de la estación es de 1.12 y 1.36 para enero y febrero respectivamente, siendo en este caso más consistente las simulaciones de WRF en la resolución de 0.25 ° y las de ERA5. Estos resultados son un buen indicio de la calidad y validez de los datos utilizados, aclarando que ni la configuración del modelo WRF ni los datos

descargados de la página WEB del ECMWF tiene especificaciones ajustadas a las de esta y las demás estaciones.

Tabla 4. Coeficiente de correlación, desviación estándar y error cuadrático medio de las representaciones de WRF y ERA5 respecto a mediciones del IDEAM para la estación Galerazamba.

	WRF 10 km		WRF 0.25°		ERA5	
	Enero	Febrero	Enero	Febrero	Enero	Febrero
R	0.75	0.87	0.71	0.89	0.81	0.90
SD	1.33	2.03	1.05	1.88	1.04	1.84
RSME	0.88	1.25	0.99	0.88	1.13	1.48

5.4.2. Estación aeropuerto Almirante Padilla, Riohacha.

La figura 21 muestra que para esta estación los datos del modelo WRF en ambas resoluciones presentan magnitudes más cercanas a los registros. De otro lado, ERA5 tiende a sobrestimar las mediciones. En términos generales ambas fuentes de información siguen la tendencia del comportamiento de la velocidad del viento en la zona cercana a este punto de medición.

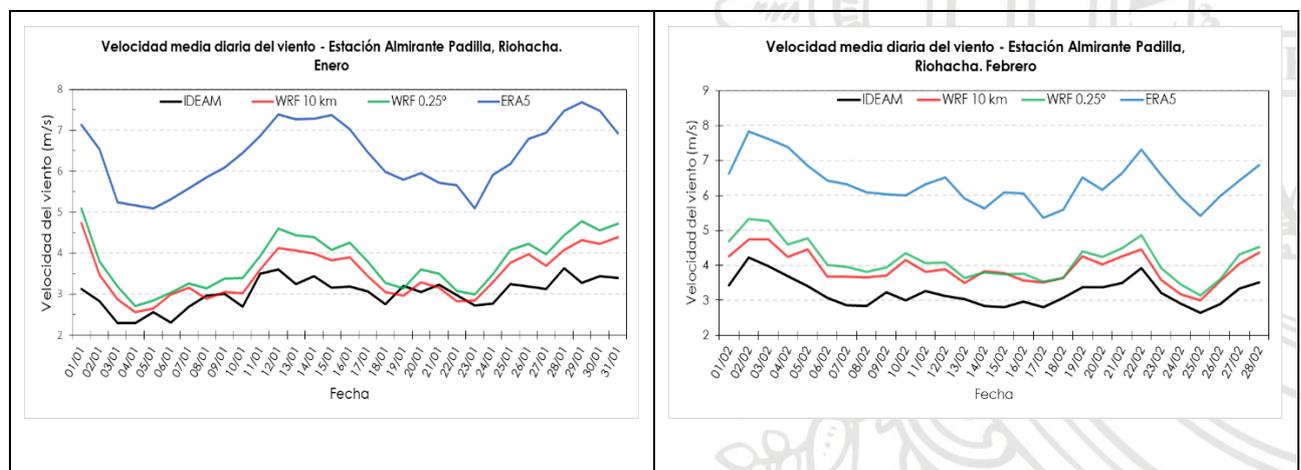


Figura 21. Igual que la figura 20, pero para la estación Almirante Padilla

Las métricas estadísticas de la tabla 5 demuestran que el modelo WRF tiene un menor grado de error en cuanto a la magnitud de los valores medidos al igual que una desviación más cercana a la que tienen las observaciones de 0.37 y 0.39 para enero y febrero respectivamente. La correlación entre todas las fuentes de información superó el 75% en todos los casos y es mucho más fuerte durante el mes de febrero.

Tabla 5. Igual que la tabla 4, pero para la estación Almirante Padilla

	WRF 10 km		WRF 0.25°		ERA5	
	Enero	Febrero	Enero	Febrero	Enero	Febrero
R	0.75	0.86	0.77	0.91	0.80	0.91
SD	0.58	0.43	0.65	0.54	0.82	0.62
RSME	0.60	0.68	0.87	0.90	3.40	3.01

5.4.3. Estación aeropuerto Simón Bolívar, Santa Marta.

Para el caso de la estación del Aeropuerto de Santa Marta (figura 22) se presenta una subestimación por parte de las simulaciones de WRF y una sobrestimación por parte de ERA5, sin embargo, se conserva la tendencia del comportamiento pero con variaciones significativas en los periodos de aumento o descenso de la velocidad registrada.

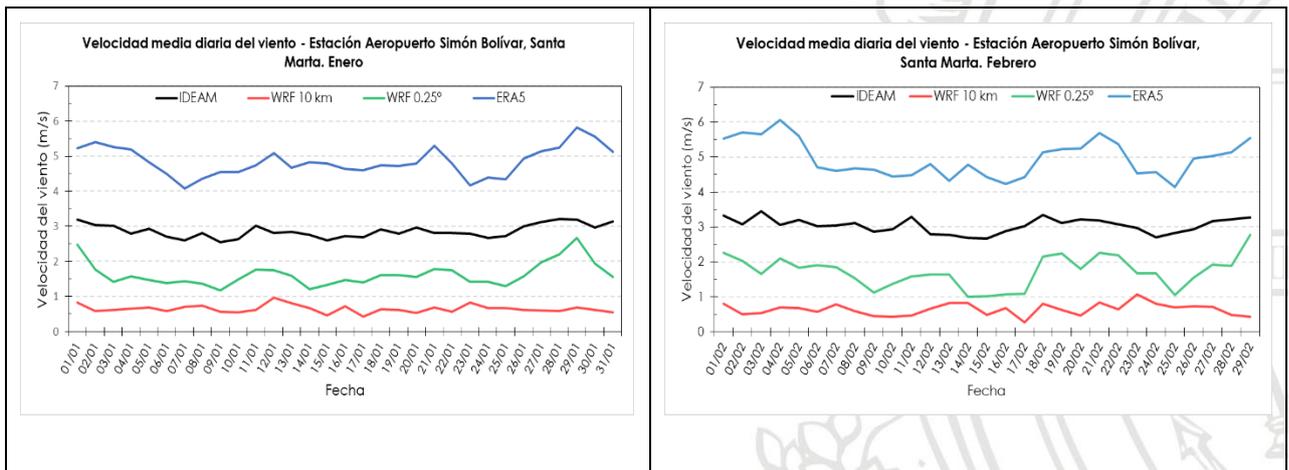


Figura 22. Igual que la figura 20, pero para la estación Simón Bolívar

La representación de resolución más fina simulada por el modelo WRF en este caso tiene una correlación débil para el mes de enero y negativa durante febrero (tabla 6), esto se debe a que durante varios días no coinciden los periodos de aumento y disminución de la velocidad que registra la estación. Sin embargo, la representación de los datos interpolados evidencia un mejor ajuste de estos datos con respecto a las observaciones. Los valores de la estimación del RSME muestran que hay una diferencia importante en cuanto al ajuste de los valores de las magnitudes y que también se presenta un mayor grado de dispersión de los datos en ERA5 y WRF 0.25° en contraste con las del IDEAM que presenta valores de 0.21 y 0.29 durante enero y febrero respectivamente.

Tabla 6. Igual que la tabla 4, pero para la estación Simón Bolívar

	WRF 10 km		WRF 0.25°		ERA5	
	Enero	Febrero	Enero	Febrero	Enero	Febrero
R	0.13	-0.18	0.69	0.64	0.69	0.60
SD	0.16	0.17	0.48	0.41	0.54	0.52
RSME	2.06	2.28	1.21	1.32	2.07	1.85

5.4.4. Estación aeropuerto Rafael Núñez, Cartagena.

Para el caso de la estación Rafael Núñez (Figura 23), durante enero se registran mayores grados de similitudes entre las curvas de las tendencias, en el caso de febrero se presenta una variabilidad muy importante, especialmente durante los últimos días del mes. Otra particularidad es la similitud que existe entre las series del modelo y los datos de reanálisis lo que permite confirmar que ambas fuentes de información presentan registros y comportamientos similares.

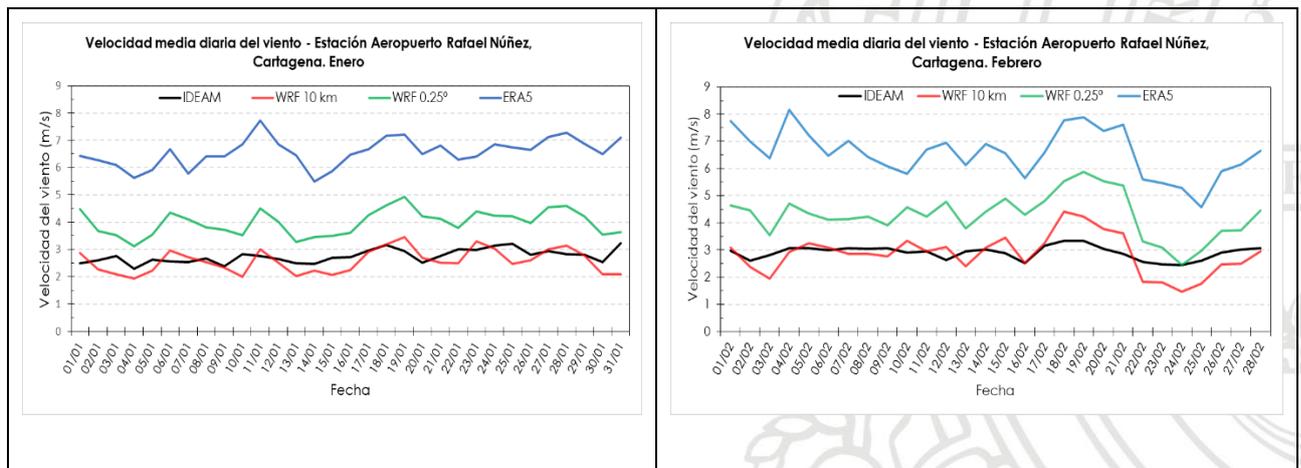


Figura 23. Igual que la figura 20, pero para la estación Rafael Núñez

En este punto de medición es donde se presenta una mayor variabilidad entre los registros de la estación y los datos de las fuentes utilizadas en esta investigación. Los datos de la tabla 7 evidencian un mejor ajuste por parte del modelo WRF en la simulación a la escala de 10 km, mientras que ERA5 logra el mayor grado de correlación. La dispersión de los datos es mucho más alta durante febrero con valores de desviación estándar superiores a 0.7, en comparación con el registro de ese mismo mes para la estación que es de 0.24, mientras que durante enero fue de 0.25.

Tabla 7. Igual que la tabla 4, pero para la estación Rafael Núñez

	WRF 10 km		WRF 0.25°		ERA5	
	Enero	Febrero	Enero	Febrero	Enero	Febrero
R	0.40	0.48	0.44	0.49	0.56	0.65
SD	0.43	0.72	0.46	0.80	0.51	0.87
RSME	0.43	0.52	1.30	1.45	3.84	3.55



6. Conclusiones.

En este estudio se realizó un análisis de las componentes del viento simuladas y observadas en el Caribe. Para ello se usaron datos simulados por el modelo WRF y datos de reanálisis de ERA5. Los resultados muestran que el modelo WRF hace una representación adecuada del comportamiento de los vientos en el Caribe colombiano.

Las comparaciones hechas para el comportamiento del ciclo diurno permiten determinar que el modelo sigue la tendencia de los datos de reanálisis, pero tiende a subestimar la magnitud de la velocidad del viento especialmente en el intervalo entre las 7:00 y 13:00 LT, siendo mayor durante el mes de enero y menor en febrero. El modelo WRF hace una sobreestimación de la velocidad del viento en la zona continental y cerca a las costas de Centroamérica, especialmente durante las horas de la noche y la madrugada.

El ciclo diurno del viento presenta un comportamiento diferenciado entre el océano y el continente, en el primero predominan las velocidades altas entre las 22:00 y 01:00 LT con valores mínimos alrededor de las 13:00 LT, mientras que en el segundo, las mayores magnitudes se dan entre las 16:00 y 19:00 LT con valores mínimos entre las 07:00 y 10:00 LT.

El modelo WRF representa con menor exactitud cambios significativos que se presentan en cortos periodos de tiempo con respecto a los datos de reanálisis de ERA5.

La estructura vertical de los vientos permite evidenciar que WRF coincide con las representaciones de ERA5, lográndose identificar la CLLJ sobre la región comprendida entre los 12 y 16 °N con magnitudes mayores sobre el océano y menores sobre la zona continental.

Las simulaciones del WRF y los datos de ERA5 representan magnitudes de la velocidad de la componente zonal del viento que alcanzan valores superiores a los 17 m/s en sentido Este – Oeste. A la altura correspondiente a los 925 hPa se identifica el núcleo de la CLLJ lo que permite establecer que ambas fuentes siguen las tendencias y mejoran las estimaciones del índice que se ha identificado con otras bases de datos.

El análisis longitudinal de la componente meridional permite concluir que a partir de los 75 °W hay un núcleo de fortalecimiento que representa una variación en dirección Norte – Sur, que se ve reflejada en el cambio de la velocidad y la dirección en la región comprendida por golfo de Morrosquillo, golfo de Urabá y costas de Panamá.

Durante las épocas El Niño se encontró que los vientos son más débiles que durante los años neutros, para esta condición el modelo WRF y ERA5 coincide en las diferencias encontradas especialmente en la zona marítima y muestra mayores diferencias en la magnitud de la velocidad durante el mes de enero y un fortalecimiento del viento durante EN especialmente en el continente.

La comparación entre eventos LN y años neutros del modelo WRF evidencia una subestimación de los datos con respecto a ERA5, presentando vientos de mayor magnitud durante los años neutros tanto en enero como en febrero. En el caso de ERA5 los vientos durante la fase LN son mayores que durante el año neutro tanto en el continente como en el océano.

La comparación entre EN, LN y años neutros demuestra que la zona cercana al golfo Urabá y golfo de Morrosquillo presenta un comportamiento diferente al del resto del Caribe dado que durante EN se presentan en esta región vientos de mayor magnitud que los registrados en los años neutros y LN.

Con los resultados encontrados en esta investigación se concluye de manera general que tanto WRF como ERA5 son fuentes de información validas y confiables para continuar con investigaciones que permitan estudiar a una mayor escala temporal los vientos en el Caribe colombiano, representando el comportamiento anual de los campos de vientos y su variabilidad frente a fenómenos atmosféricos de diferentes escalas. En el caso de ERA5 se pueden complementar los estudios utilizando otras variables oceánicas y atmosféricas como la temperatura superficial del mar, la presión, temperatura del viento, entre otras.

Con la validación de los datos se pudo establecer que el modelo WRF representa la tendencia de datos medidos en estaciones meteorológicas y que su ajuste a los valores de velocidad media del viento, registrados por el IDEAM son mejores que los presentados por ERA5, pero el reanálisis tiene una mejor correlación con las mediciones.

7. Trabajos futuros.

Teniendo en cuenta que el reanálisis ERA5 es una fuente de información reciente y poco utilizada hasta el momento y que sus datos están disponibles de manera inmediata y permanente, se puede utilizar para ampliar los conocimientos generados en esta investigación a corto plazo.

Consideramos que la siguiente fase de esta investigación, es utilizar los datos de reanálisis ERA5 para determinar el comportamiento del ciclo anual de los vientos en el Caribe, teniendo en cuenta otras variables oceánicas, atmosféricas y topográficas que permitan conocer de mejor manera como cambian los campos de vientos espacial y temporalmente con datos de mejor resolución que mejoren las estimaciones realizadas hasta el momento.

También consideramos que es importante complementar esta investigación incluyendo la variabilidad de la precipitación en el Caribe debido al comportamiento intra-anual e inter-anual de la CLLJ teniendo en cuenta como se puede ver afectada por fenómenos de mayor escala como el ENSO y el movimiento de la ZCIT.

Otra opción que consideramos es hacer un proceso de validación mucho más exhaustivo y riguroso en el que se analicen y comparen las mediciones de estaciones meteorológicas con datos más acordes a sus características, para lo cual se pueden utilizar los datos de reanálisis de las componentes U y V a 10 metros de altura que corresponde al nivel con que se mide en las estaciones. De igual forma se pueden hacer configuraciones del modelo WRF más acordes a las condiciones locales.

8. Referencias Bibliográficas.

- AMADOR, Jorge A. The Intra-Americas Sea Low-level Jet Overview and Future Research. En: Trends and Directions in Climate Research: Ann. N.Y. Acad. Sci., vol. 1146; (2008), p. 153 – 188, DOI: 10.1196/annals.1446.012.
- ANDRADE, Carlos A. BARTON, E. D. The atmospheric Low Level Jet and the surface mesoscale circulation of the Caribbean Sea. En: GEOS, vol. 29; (diciembre, 2009), p. 1 – 22.
- ARROYO, Leidys. Caracterización del ciclo de brisas diurnas en el golfo de Urabá a partir de resultados del modelo atmosférico WRF. Trabajo de investigación Ingeniería Ambiental. Medellín. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. Escuela Ambiental, (2019), 57 p.
- BASTIDAS, Marta. ORDÓÑEZ, Silvio. RICAURTE, Constanza. Eventos de intensificación y relajación del viento en la bahía de Santa Marta (Caribe colombiano): implicaciones oceanográficas. En: Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR, vol. 45, nro. 2; (2016), p. 181 – 196, ISSN 0122-9761
- BERNAL, Gladis. RUIZ-OCHOA, Mauricio. BEIER, Emilio. Variabilidad estacional e interanual océano-atmósfera en la Cuenca Colombia. En: Cuadernos del Caribe, vol. 8, nro. 14; (2010), p. 49 – 72, ISSN 2390-0555.
- DANIEL, Inger *et al.* Caracterización del régimen del viento y el oleaje en el litoral del departamento del Atlántico, Colombia. En: Boletín Científico CIOH, vol. 33; (octubre, 2015), p. 231 - 244, ISSN 0120-0542.
- DELGADO GONZÁLEZ, Oscar E.; LARIOS CASTILLO, Sergio; OCAMPO TORRES, Francisco J. Las brisas durante algunos meses de primavera y verano en el noroeste del golfo de California. En: Ciencias Marinas. vol. 20, N°3(1994); p. 421-440. ISSN: 0185-3880
- ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Reanalysis Datasets ERA5. [Consultado el 20 de noviembre de 2019]. Disponible en: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>
- HERNANDEZ, Juan C. Simulación de los campos de viento del Valle de Aburra con alta resolución espacial. Trabajo de investigación Maestría en Ingeniería. Medellín. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería, (2012), 117 p.
- IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Atlas de viento de Colombia. primera edición. Colombia: Imprenta Nacional de Colombia, 2017, 158 p. ISBN 978-958-8067-96-4.
- INVEMAR, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés. Regionalización Oceanográfica: una Visión Dinámica del Caribe. primera edición. Colombia: Ediprint S.A.S., 2017, 184 p. ISBN 978-958-8935-25-6.
- LEÓN, Gloria. Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala sobre el noroccidente de Suramérica asociada al ciclo ENOS 2009-2010 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Colombia. En: Boletín meteorológico IDEAM ENOS 2009 – 2010, (2011), p. 1 – 20.

- MARTÍNEZ, J. Alejandro *et al.* SST-related response of precipitation in northern South America according to a WRF multi-decadal simulation. En: *International Journal of Climatology*, vol. 39, nro. 4; (noviembre, 2018), p. 2136-2155, doi:10.1002/joc.5940.
- MORALES, José. ÀRIAS, Paola. MARTÍNEZ, Alejandro. Role of the Caribbean low-level jet and the Choco jet in the patterns of atmospheric moisture transport towards Central America. En: *The 1st International Electronic Conference on Hydrological Cycle (CHyCle-2017)*, vol. 1; (noviembre, 2017), p. 1 – 12. DOI: 10.3390/CHyCle-2017-04861.
- NOOA, National Oceanic and Atmospheric Administration. Climate Prediction Center. Cold & Warm Episodes by Season. [Consultado el 20 de noviembre de 2019]. Disponible en: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php.
- PAREJA, Luis *et al.* Análisis del transporte y bombeo de Ekman en el Caribe colombiano entre 1999 y 2009. En: *Boletín Científico CIOH*, nro. 31 (diciembre-2013); P. 1-224, DOI: 10.26640/22159045.248.
- PÉREZ, Ascario; ORTIZ, Juan C.; BEJARANO, Luis F.; OTERO, Luis; RESTREPO, Juan y FRANCO, Andrés. Sea breeze in the Colombian Caribbean coast. En: *Atmosphere*. Vol. 31, N° 4 (Ago-2018); P. 389-406. ISSN: 0187-6236.
- POSADA MARÍN, José *et al.* 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. En: *Climate Dynamics*, vol. 52; (agosto, 2018), p. 3609 – 3629, doi:10.1007/s00382-018-4403-0.
- POVEDA, German. JARAMILLO, Liliana; VALLEJO, Luisa. Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers. En: *Water Resources Research*, vol. 50; (enero, 2014) p. 98 –118, ISSN DOI:10.1002/2013WR014087.
- POVEDA, German. MESA, Oscar J. 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. En: *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, vol. 23 nro. 89; (diciembre, 1999) p. 517 – 528, ISSN 0370-3908.
- RUEDA-BAYONA, Juan *et al.* Identifying patterns of climate variability from principal component analysis - PCA, Fourier y k-means clustering. En: *Revista Tecnura*, vol. 20 nro. 50; (septiembre, 2016) p. 55 – 68, ISSN 0123-921X.
- RUIZ OCHOA, Mauricio A. Variabilidad de la cuenca Colombia (Mar Caribe) asociada con El Niño, Oscilación del Sur, vientos Alisios y procesos locales. Tesis Doctoral en Ingeniería y Recursos Hidráulicos; Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos (2011), 202 p.
- RUIZ OCHOA, Mauricio A. BERNAL FRANCO, Gloria. Variabilidad estacional e interanual del viento en los datos del reanálisis NCEP/NCAR en la Cuenca Colombia, mar Caribe. En: *Avances en Recursos Hidráulicos*, Nro. 20; (junio -octubre, 2009), p. 7 – 20, ISSN 0121-5701.

SARMIENTO-DEVIA, Ricardo A. *et al.* Variabilidad intra-anual del régimen climático en sectores de surgencia en el sudeste del Mar Caribe, usando ERA Interim. En: *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, vol. 48, nro. 3; (diciembre, 2013), p. 471 – 485, ISSN 0718-1957.

SERNA, Lina M. ARIAS, Paola A. VIEIRA, Sara C. Las corrientes superficiales de chorro del Chocó y el Caribe durante los eventos de El Niño y El Niño Modoki. En: *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 42, nro. 165, (octubre-diciembre, 2018), p. 410 – 421, ISSN 2382-4980.

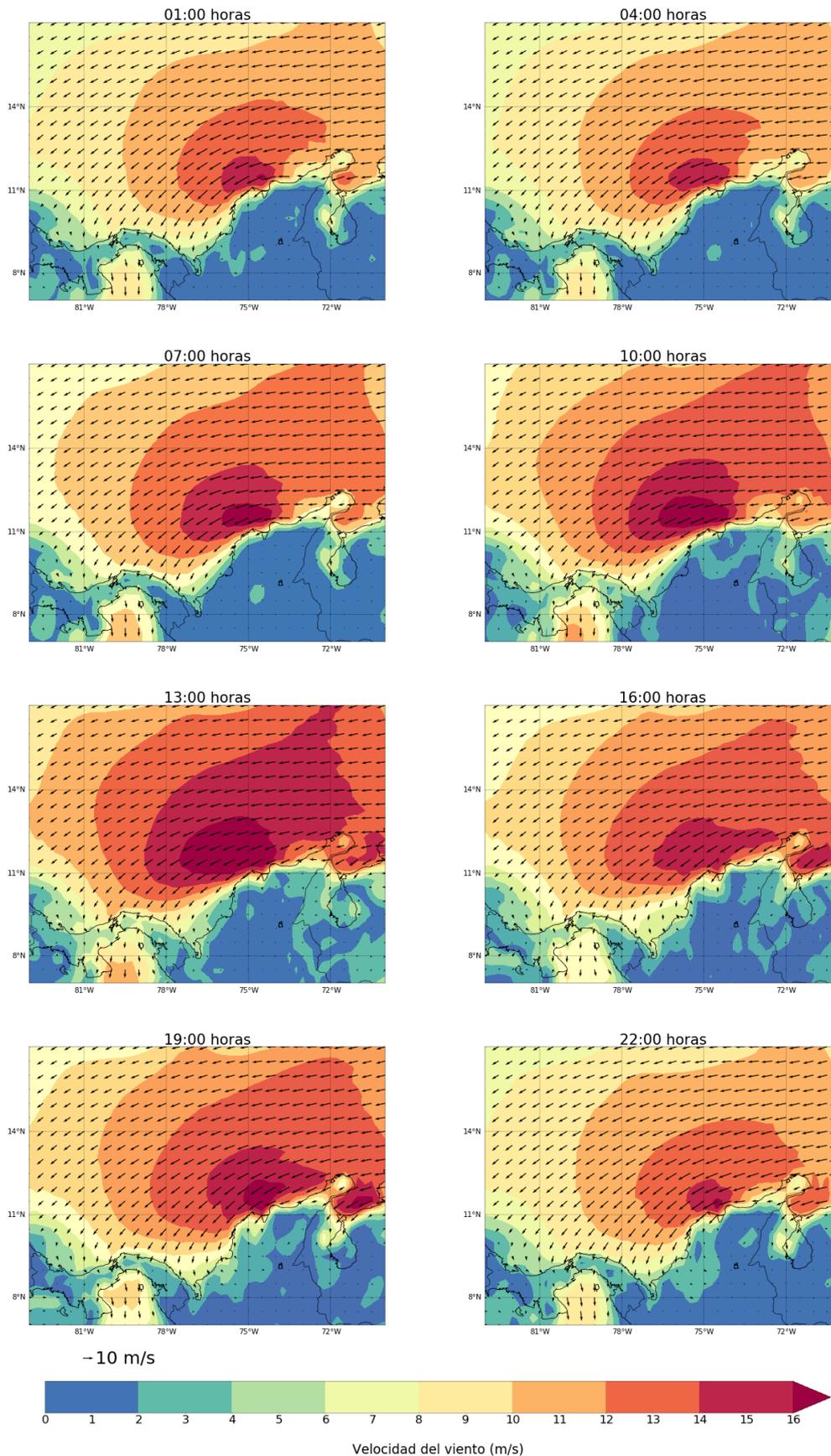
UCAR, University Corporation for Atmospheric Research. Weather Research and Forecasting Model. [Consultado el 20 de noviembre de 2019]. Disponible en: <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>.

WANG, Chunzai. Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate. En: *Climate Dynamics*, vol. 29, (septiembre, 2007), p. 411 – 422, DOI 10.1007/s00382-007-0243-z

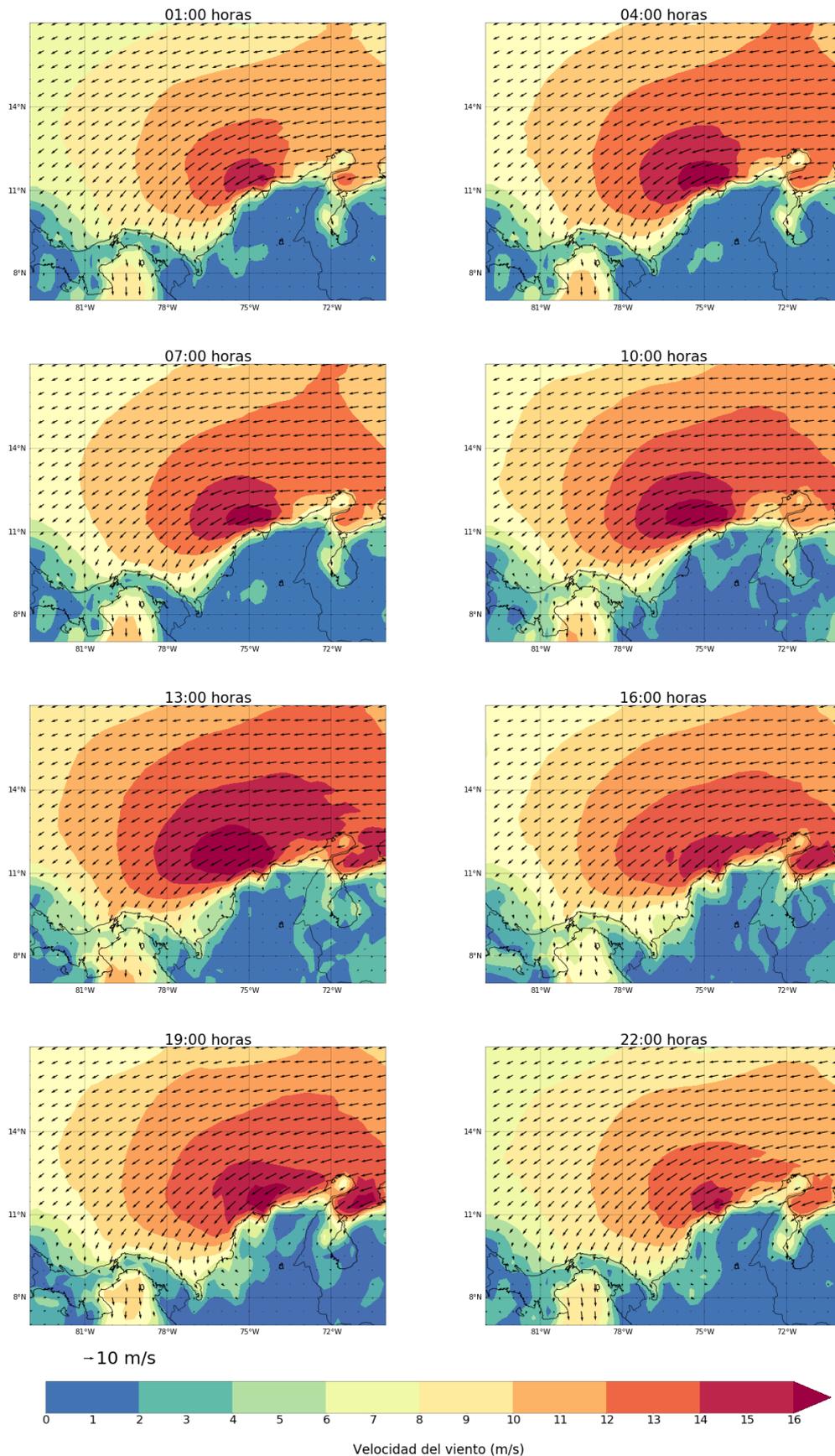


Anexos

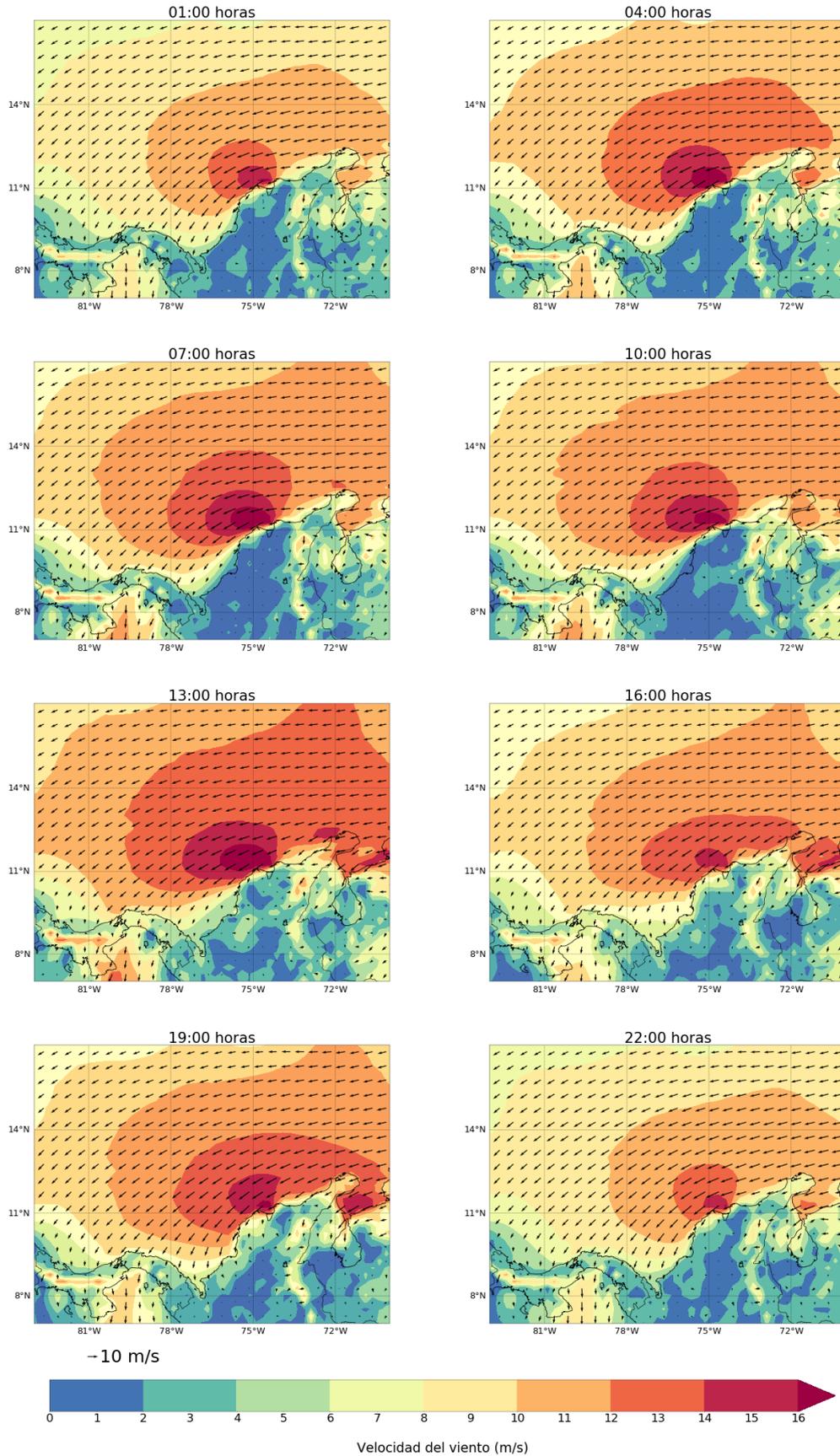
Anexo 1. Ciclo diario promedio multianual de los campos de vientos ERA5 durante el mes de enero.



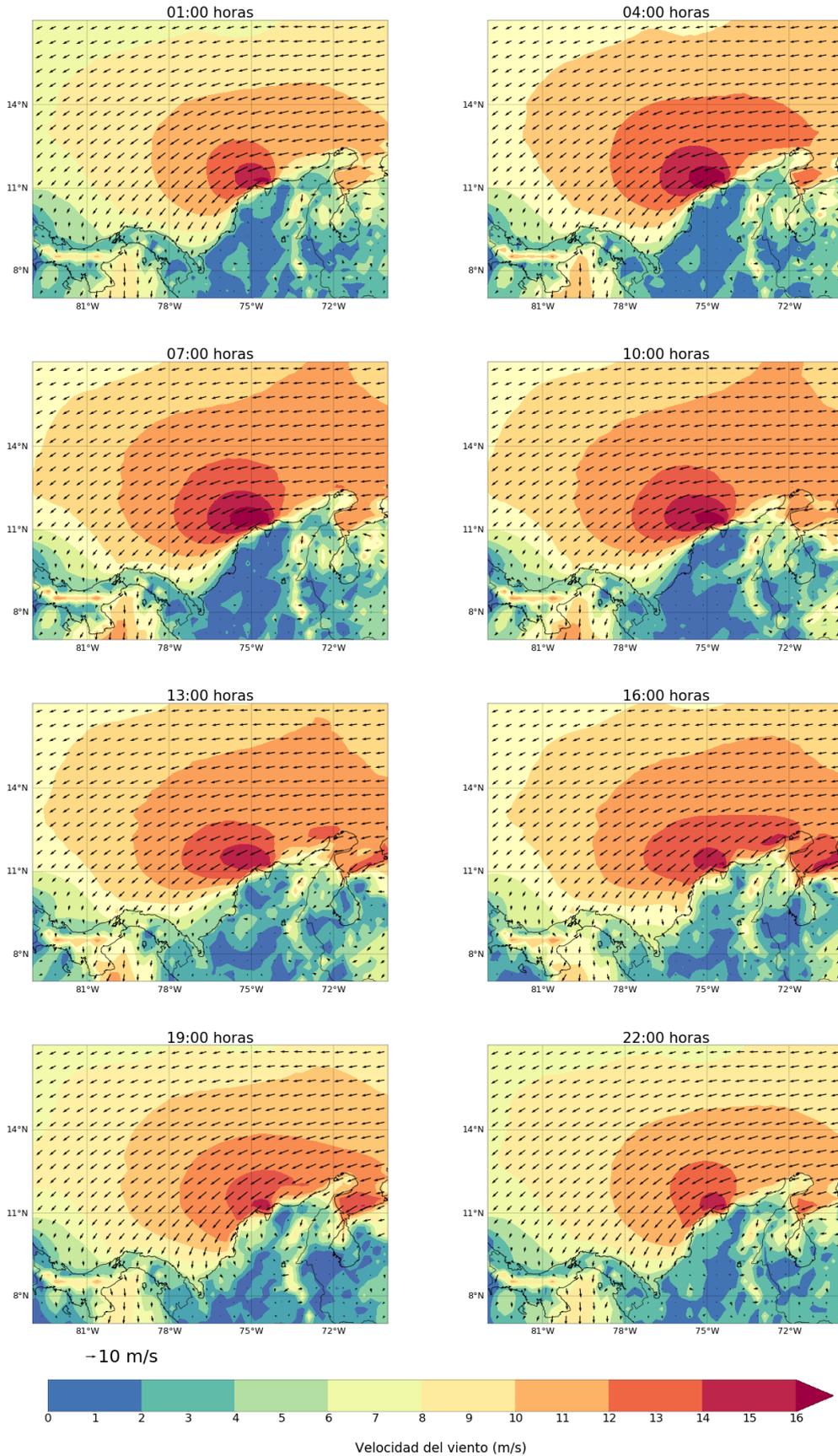
Anexo 2. Ciclo diurno promedio multianual de los campos de vientos ERA5 durante el mes de febrero.



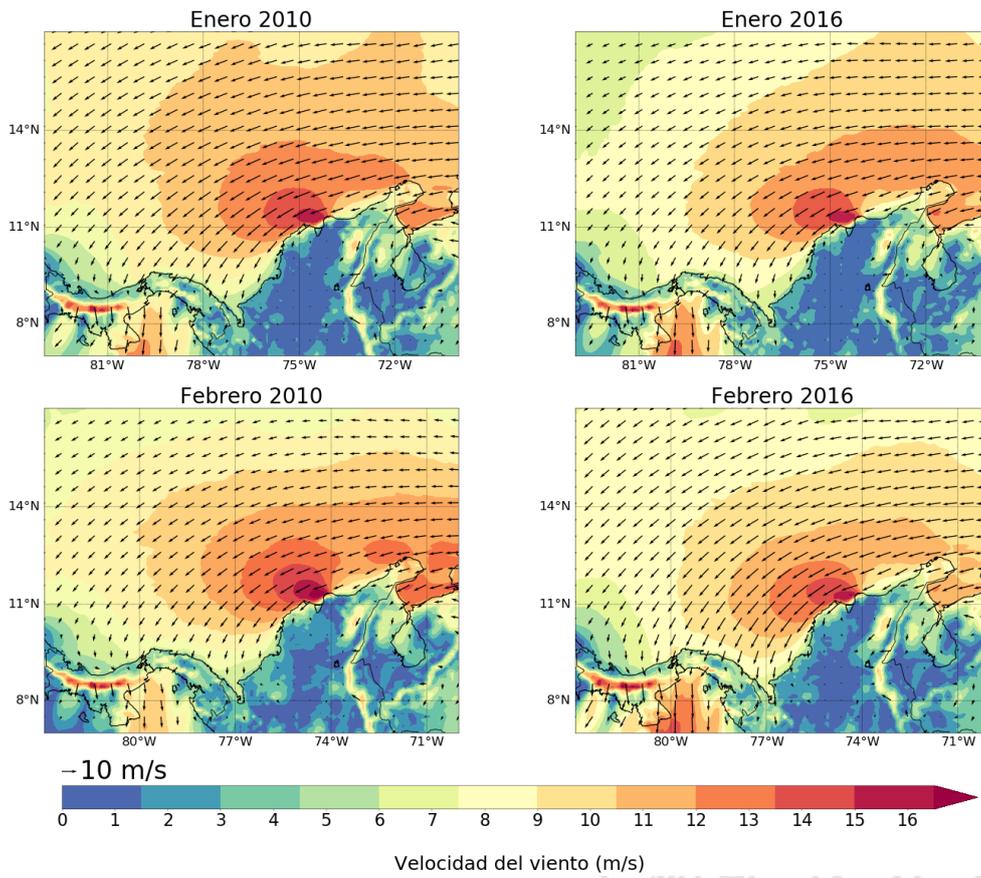
Anexo 3. Ciclo diurno promedio multianual de los campos de vientos WRF interpolado a 0.25° durante el mes de enero.



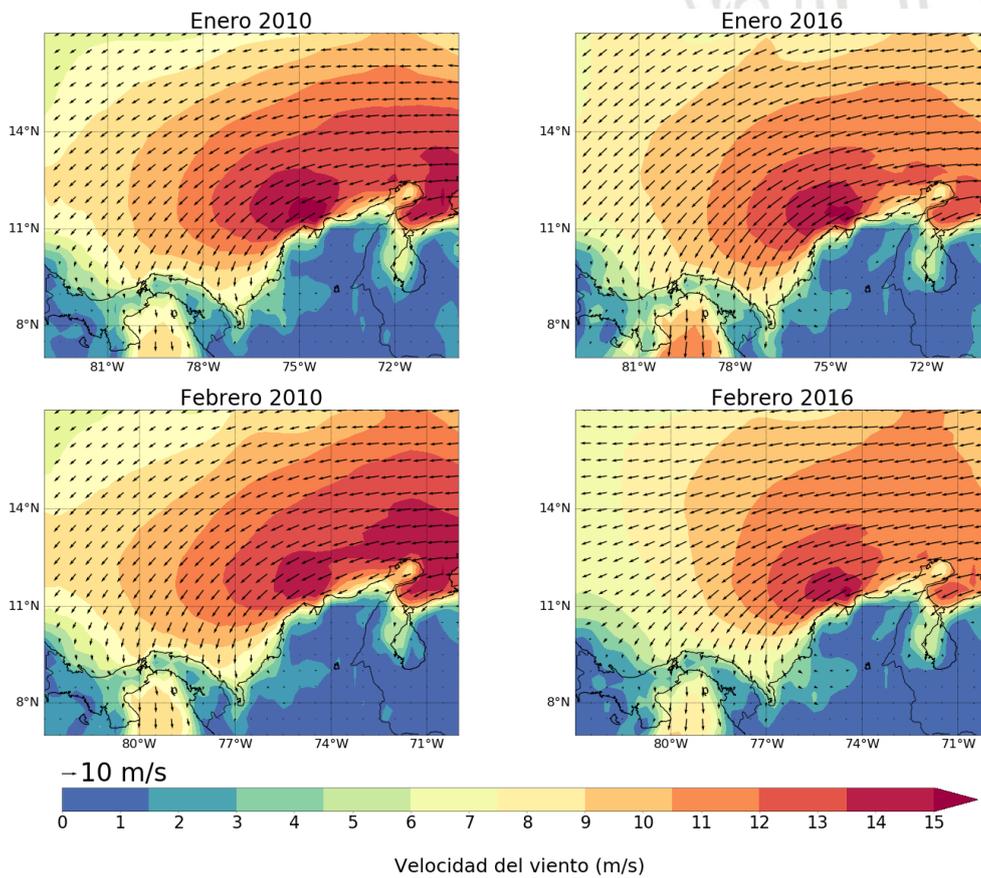
Anexo 4. Ciclo diurno promedio multianual de los campos de vientos WRF interpolado a 0.25° durante el mes de febrero



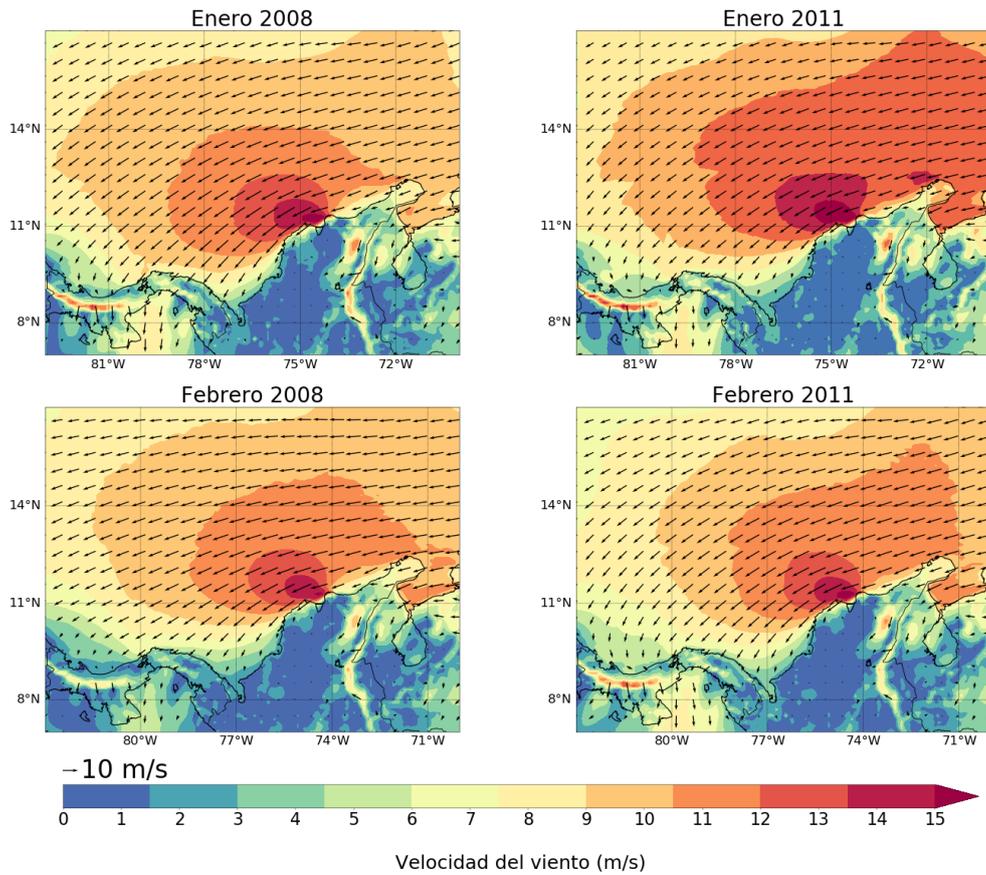
Anexo 5. Campos de vientos durante eventos EN con WRF 10 km.



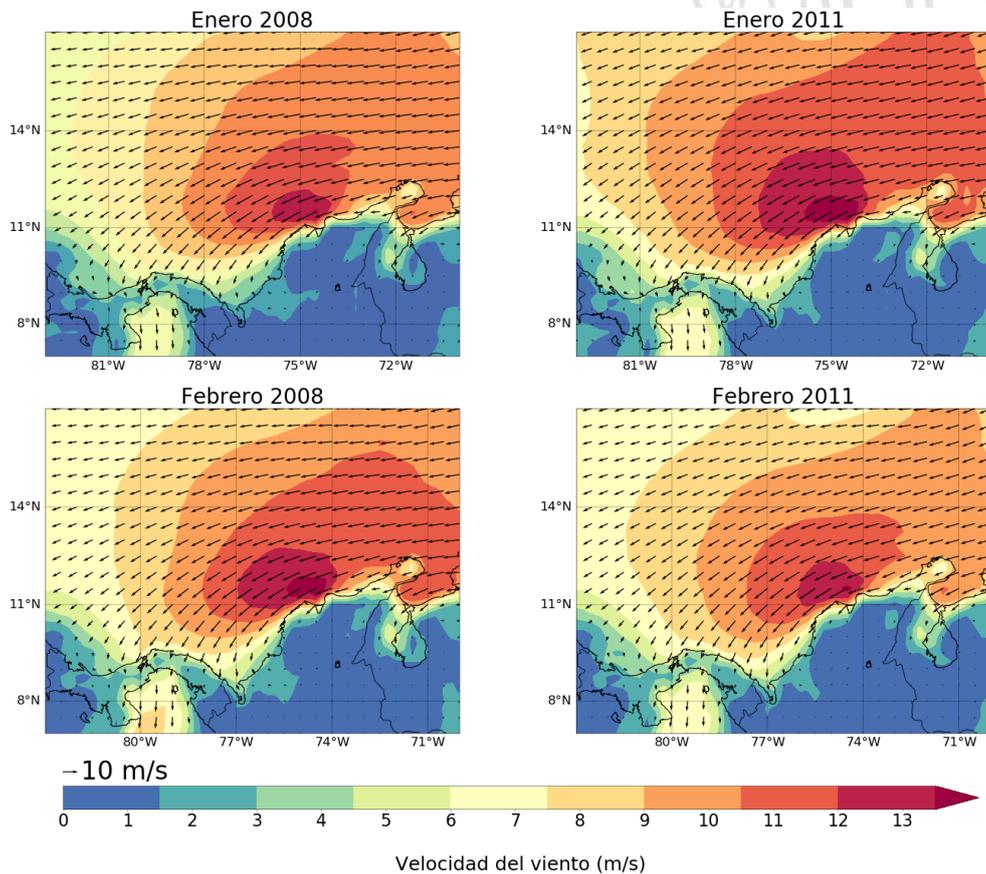
Anexo 6. Campos de vientos durante eventos EN con ERA5.



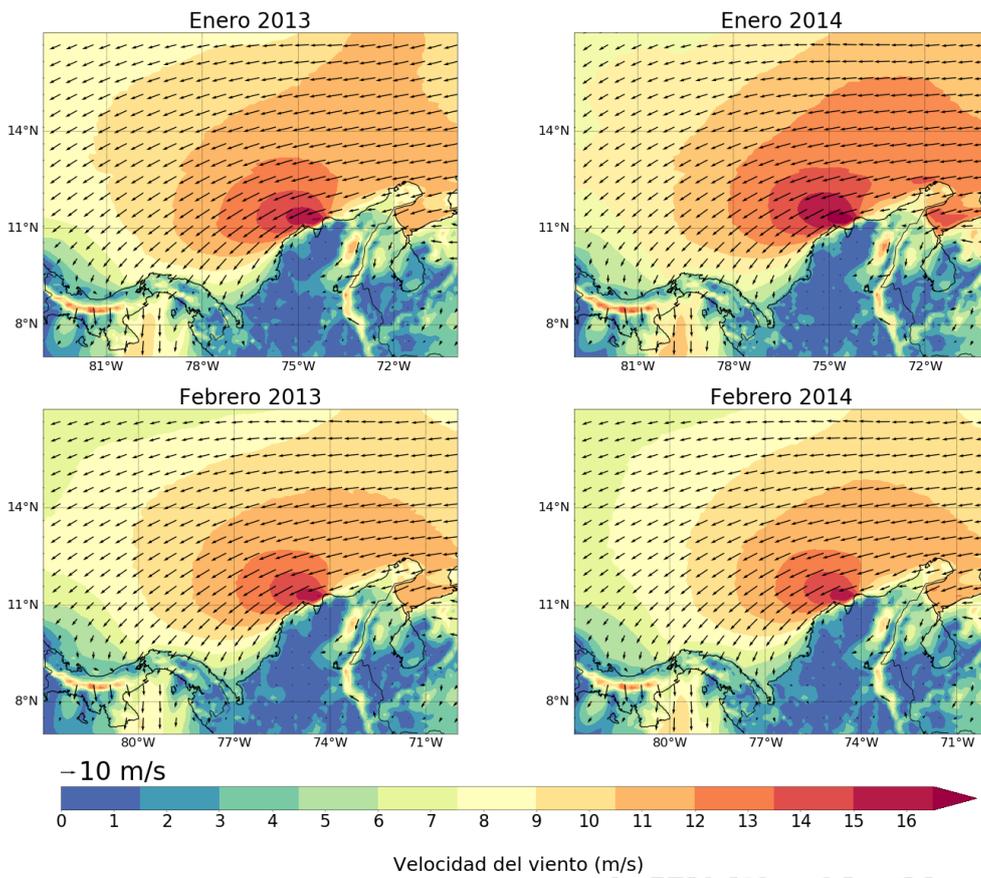
Anexo 7. Campos de vientos durante eventos LN con WRF 10 km.



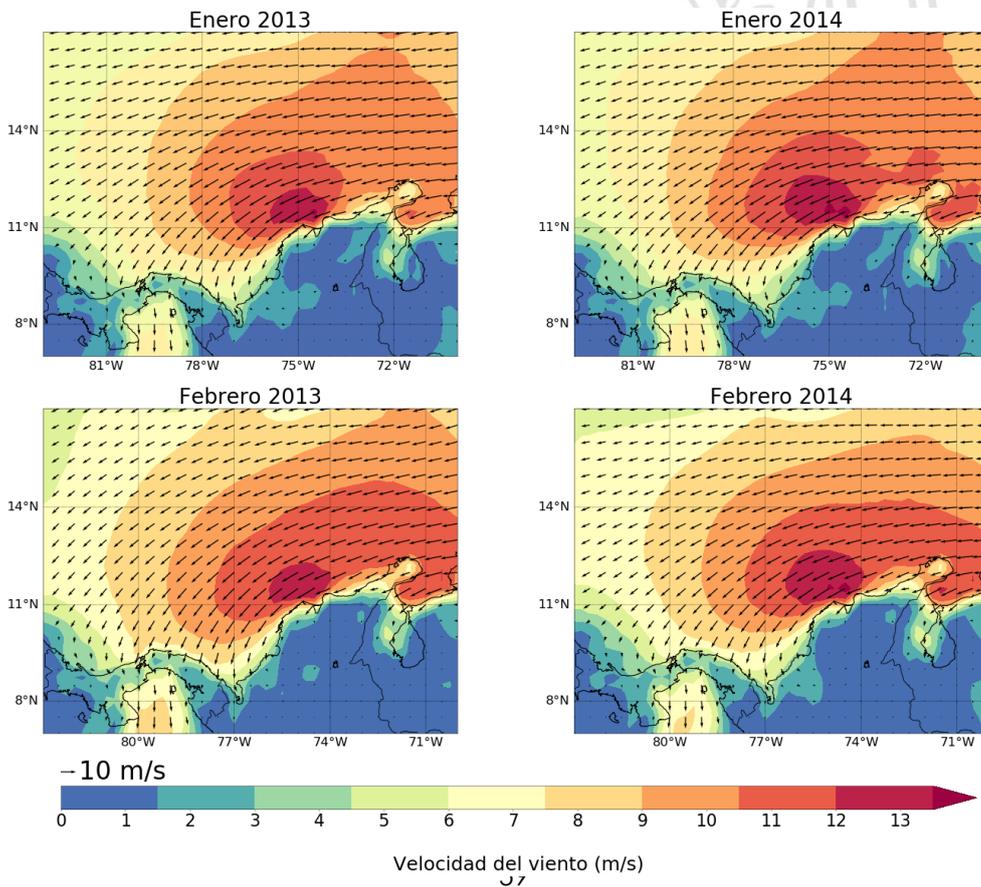
Anexo 8. Campos de vientos durante eventos LN con ERA5.



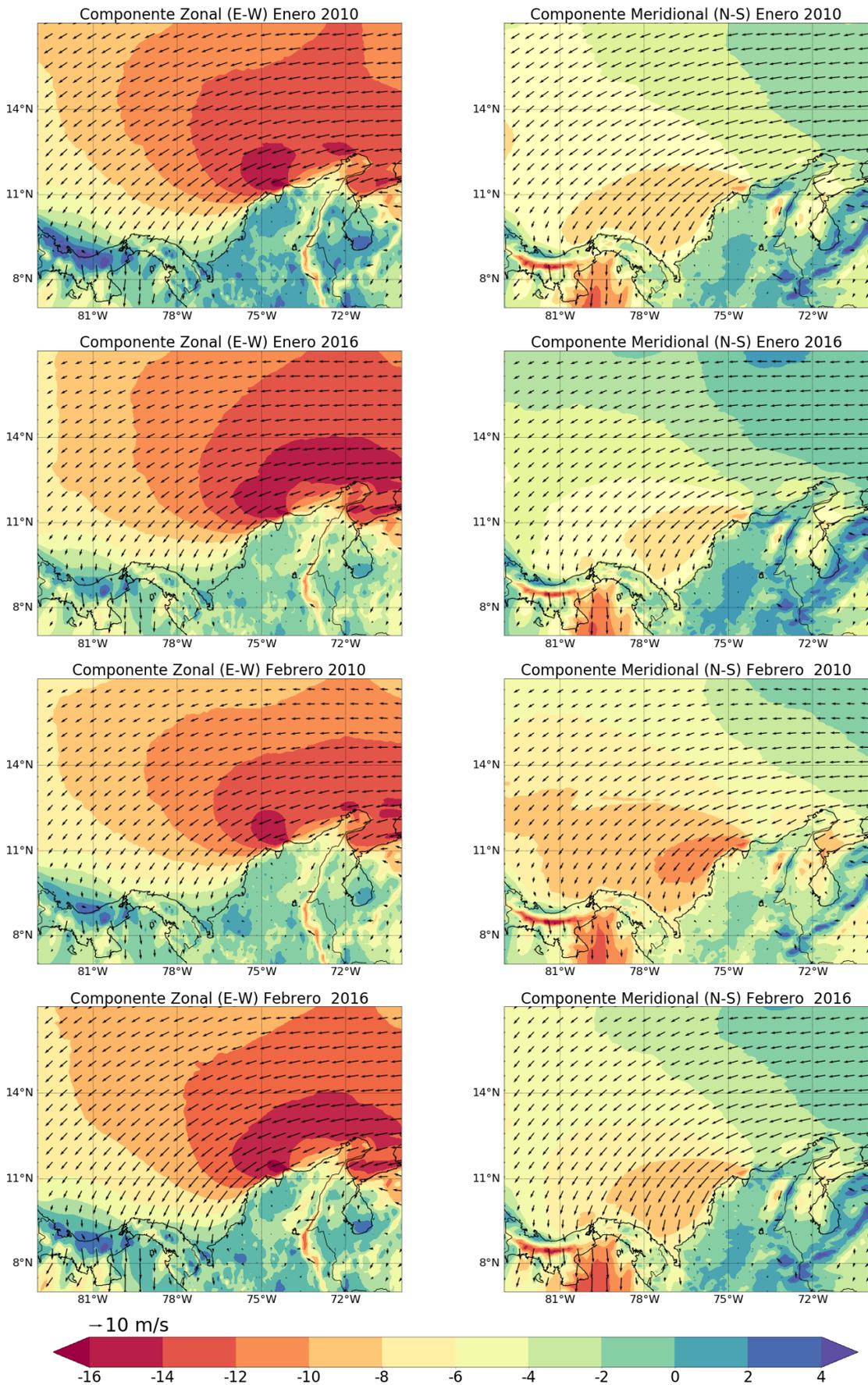
Anexo 9. Campos de vientos durante años neutros con WRF 10 km.



Anexo 10. Campos de vientos durante años neutros con ERA5.



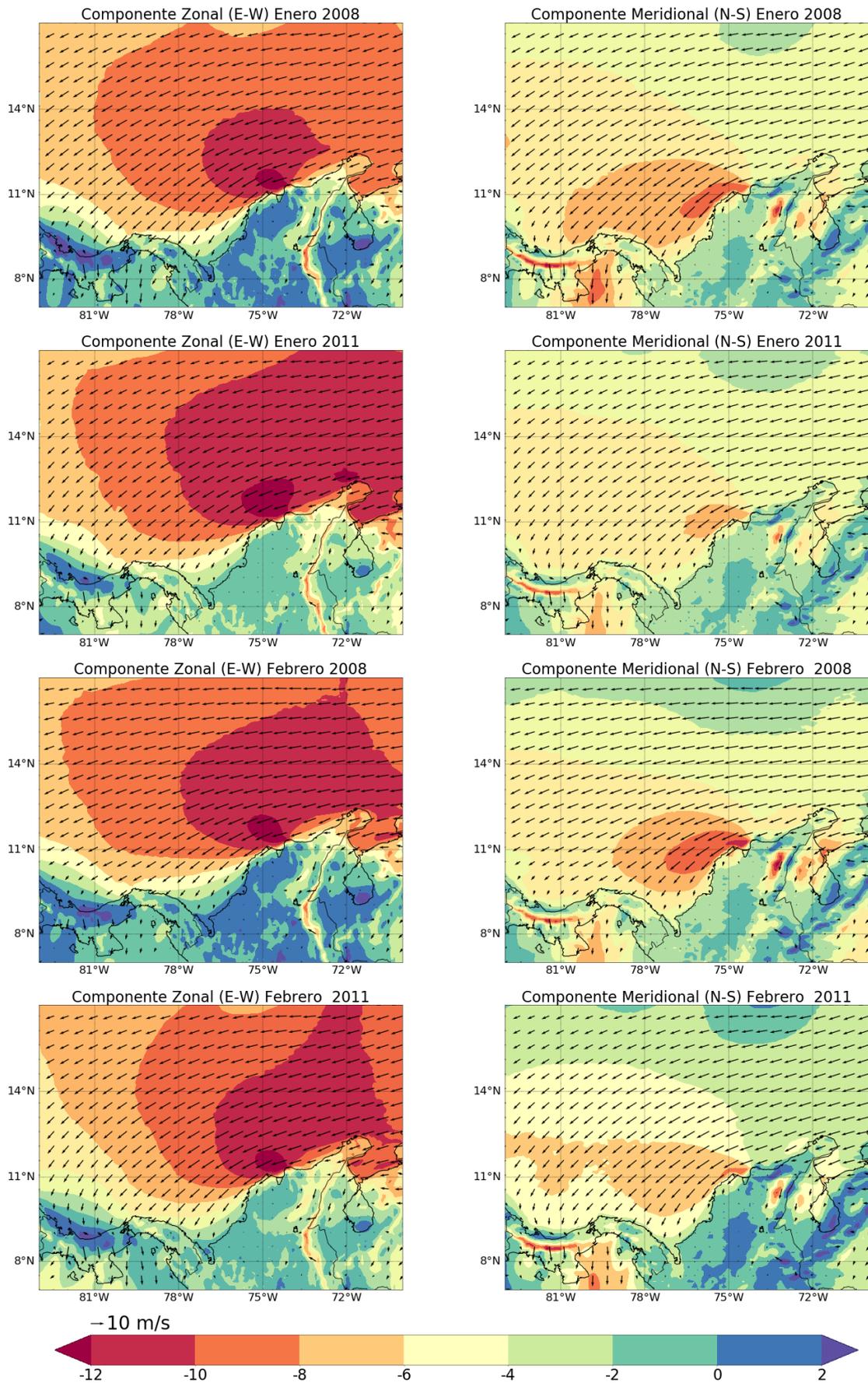
Anexo 11. Componente zonal y meridional del viento durante EN WRF 10 km



Velocidad del viento (m/s)
60

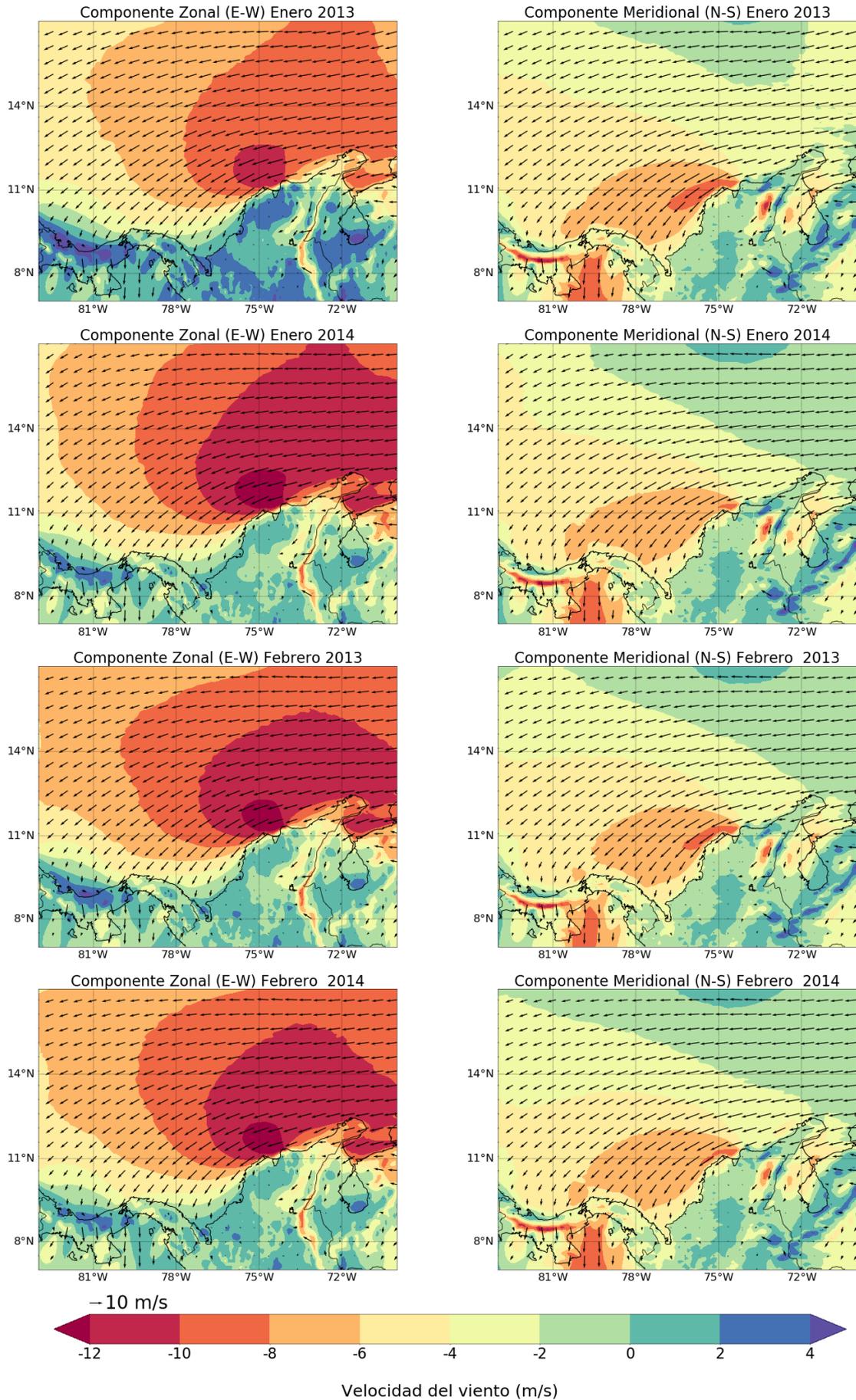


Anexo 12. Componente zonal y meridional del viento durante LN WRF 10 km

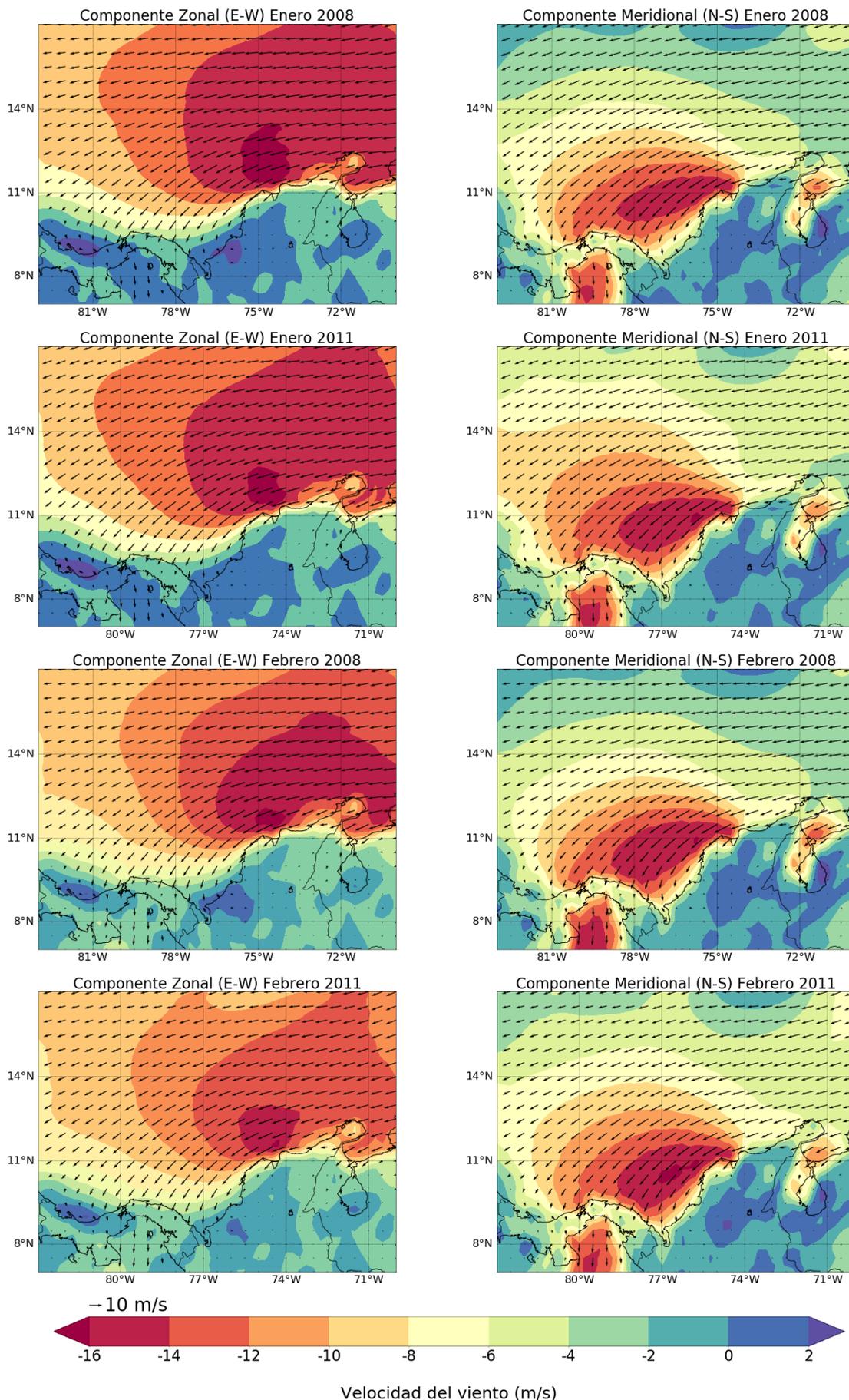


Velocidad del viento (m/s)

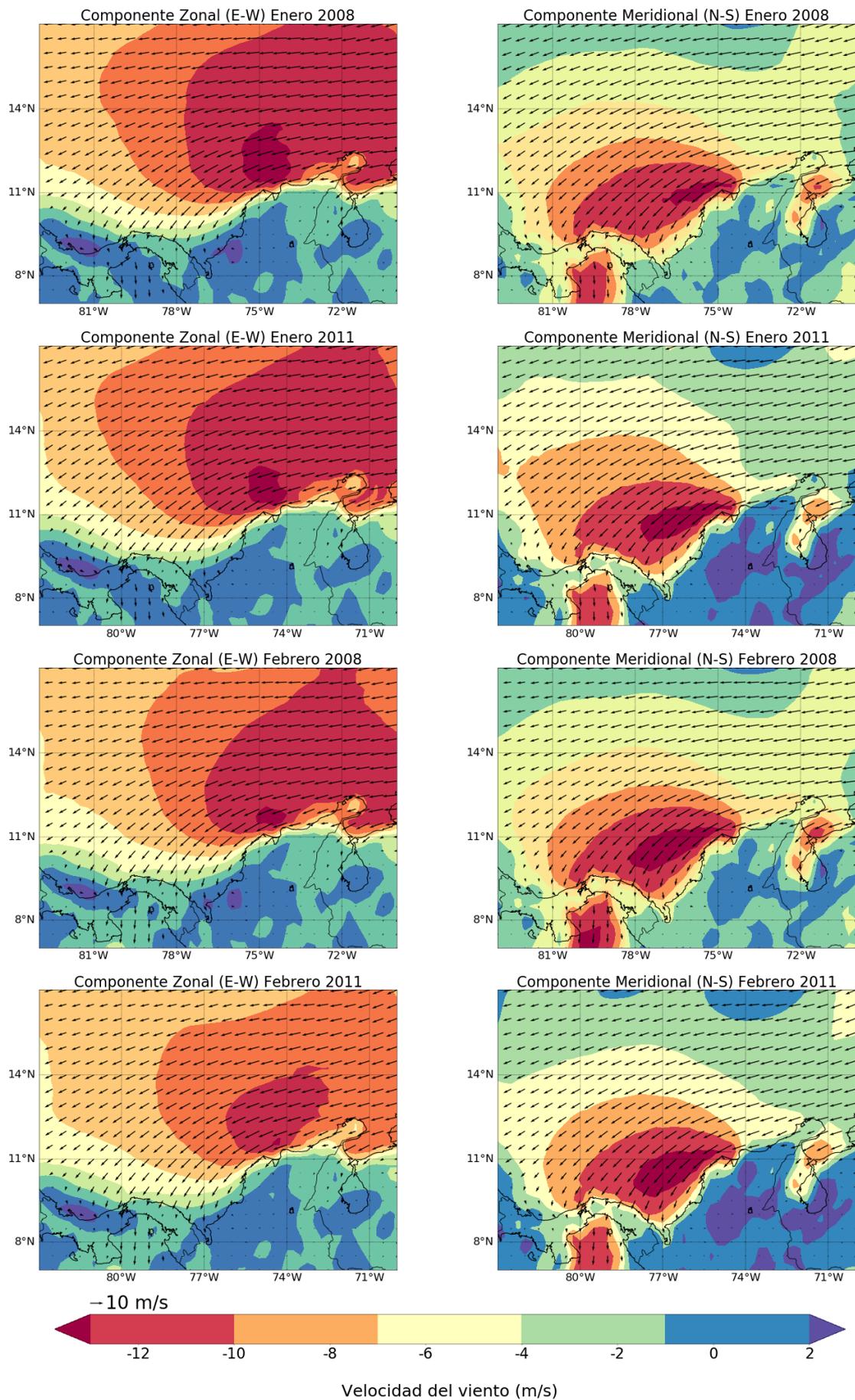
Anexo 13. Componente zonal y meridional del viento durante años neutros WRF 10 km



Anexo 14. Componente zonal y meridional del viento durante EN ERA5



Anexo 15. Componente zonal y meridional del viento durante LN ERA5



Anexo 16. Componente zonal y meridional del viento durante años neutros ERA5

