

TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS

Ministerio de Ambiente y Energía - Instituto Meteorológico Nacional

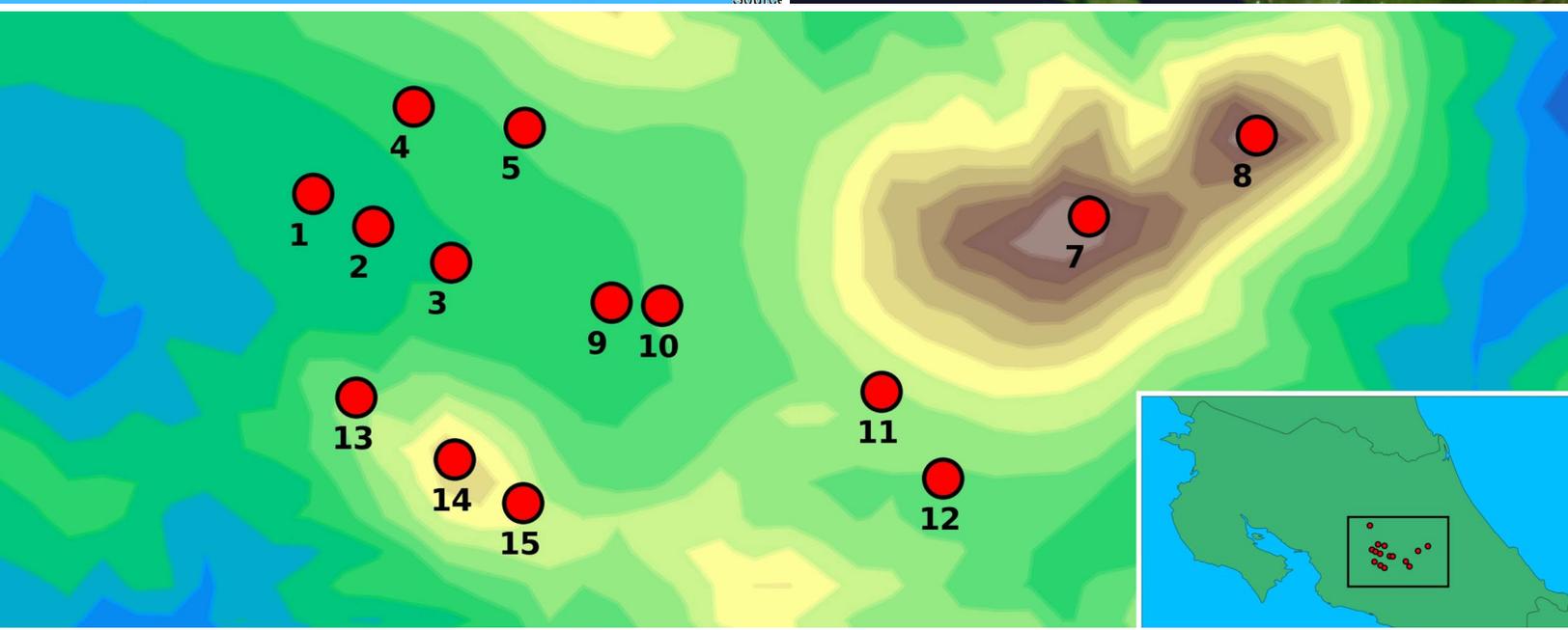
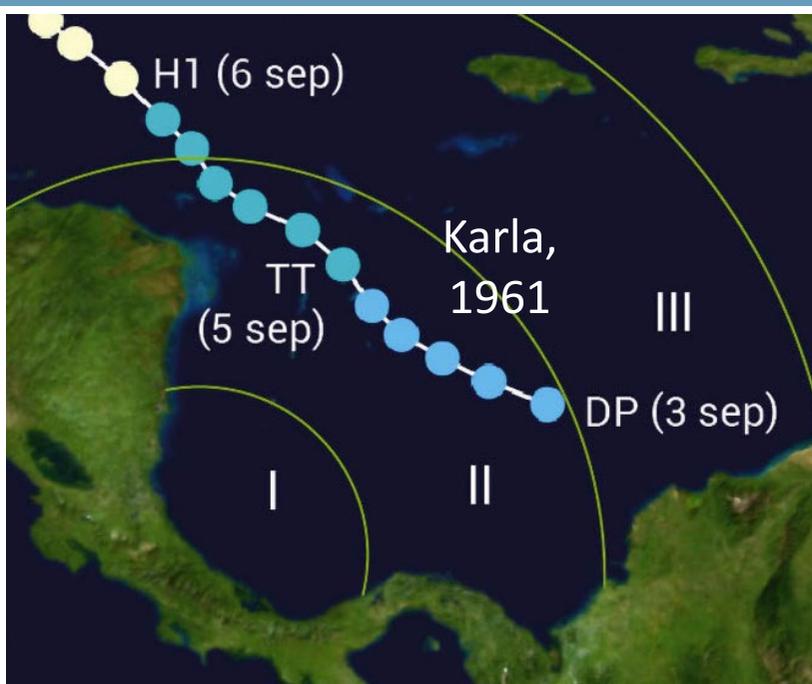


Instituto Meteorológico Nacional
Fundado en 1888

ISSN 2953-738X

Volumen 20

Diciembre 2021

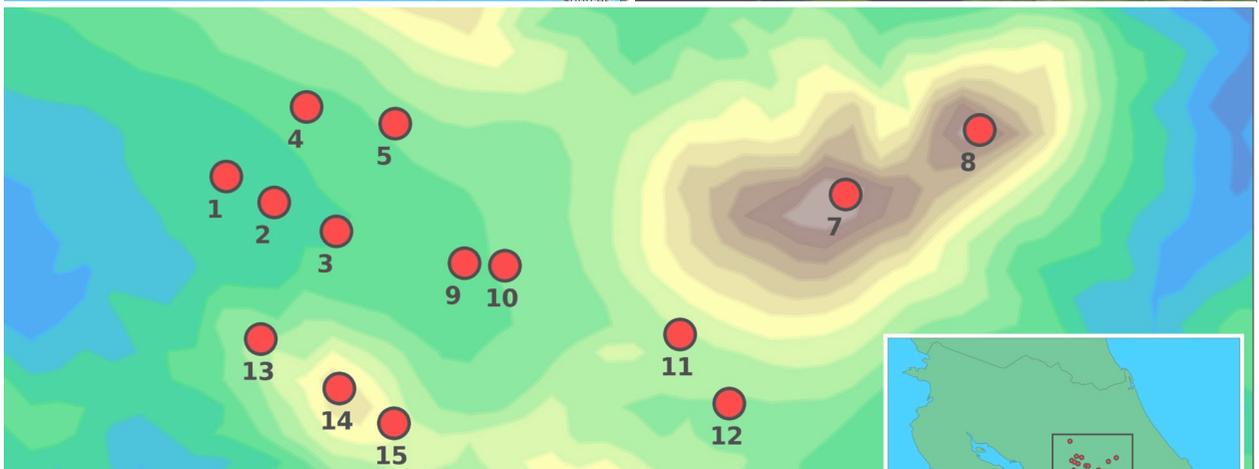
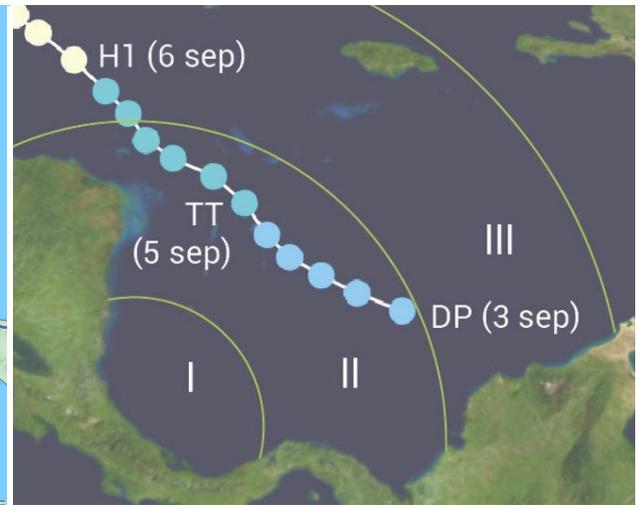


TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS

ISSN 2953-738X

Volumen 20

Diciembre 2021



Ministerio de Ambiente y Energía
Instituto Meteorológico Nacional

Coordinación general:
MSc. Eladio Solano León

Edición:
María Esther Suárez Baltodano

Comité editorial:
Gabriela Chinchilla Ramírez
Karina Hernández Espinoza
Daniel Poleo Brito

Diseño y diagramación:
Rodrigo Granados Jiménez

Imágenes de portada:
Tomadas de los artículos incluidos en esta edición.

*La revista “Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos”
es publicada por el Instituto Meteorológico Nacional,
Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica. Tiene como
finalidad dar a conocer los resultados de investigaciones y
estudios en Ciencias de la Atmósfera y Oceanografía Física.*

Los artículos publicados en Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos expresan la opinión del autor y no necesariamente del Instituto Meteorológico Nacional

CONTENIDO

- | Pág. | Artículo |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5 | Influencia de la tormenta tropical Carla en el temporal de septiembre de 1961 en Costa Rica
RODRIGO GRANADOS JIMÉNEZ |
| 16 | Inicio de la temporada de lluvias en América Central
<i>Onset of the rainy season in Central America</i>
ERIC ALFARO Y HUGO HIDALGO |
| 29 | Modelado numérico en el Valle Central Occidental de Costa Rica durante el invierno boreal: sensibilidad al esquema de capa límite
TIFFANY SUÁREZ Y ERICK R. RIVERA |

Modelado numérico en el Valle Central Occidental de Costa Rica durante el invierno boreal: sensibilidad al esquema de capa límite

TIFFANY SUÁREZ¹ Y ERICK R. RIVERA²

Resumen

El clima en el Valle Central Occidental (VCO) de Costa Rica está influenciado, entre otros aspectos, por la variación en la intensidad y la dirección de los vientos a diferentes escalas temporales y espaciales. En este trabajo, se presentan los resultados de simulaciones numéricas del viento en el VCO para el período diciembre 2015-febrero 2016, bajo diferentes configuraciones de capa superficial, capa límite planetaria y modelo de superficie, utilizando el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) y su comparación con ~observaciones en superficie. El mejor desempeño del modelo se obtuvo en el dominio con mayor resolución espacial (rejilla de 1 km). Finalmente, los resultados indican que la mejor configuración física del WRF usa la capa superficial RMM5, capa límite YSU y modelo de superficie terrestre Noah.

PALABRAS CLAVE: MODELADO CLIMÁTICO REGIONAL, CAPA LÍMITE PLANETARIA, CAPA SUPERFICIAL, MODELO DE SUPERFICIE TERRESTRE, VIENTO, WRF.

Abstract

The climate in the Western Central Valley (WCV) of Costa Rica is influenced, among other aspects, by the variation in the intensity and direction of the winds at different temporal and spatial scales. In the present work, the results of numerical simulations of wind in the WCV region, under different configurations of surface layer-planetary boundary layer-surface model, using the Weather Research and Forecasting (WRF) model, were analyzed and compared with surface observations for the period December 2015-February 2016. The best model performance was obtained for the domain with the highest spatial resolution (grid of 1 km). Lastly, the results indicate that the best physics configuration in WRF uses the RMM5 surface layer, the YSU boundary layer and the Noah land surface model.

KEY WORDS: REGIONAL CLIMATE MODELING, PLANETARY BOUNDARY LAYER, SURFACE LAYER, LAND SURFACE MODEL, WIND, WRF.

1. INTRODUCCIÓN

El viento es un proceso natural de la circulación atmosférica, que consiste en el movimiento del aire en diferentes capas de la atmósfera, incluyendo la región donde se desarrollan actividades humanas, y es en parte responsable de la distribución espacial y temporal de la precipitación. Costa Rica

presenta una topografía compleja que incluye valles, mesetas y montañas de más de tres mil metros de altitud sobre el nivel medio del mar, lo que favorece el desarrollo de fenómenos atmosféricos a diferentes escalas temporales y espaciales (por ejemplo, lluvia orográfica y brisas de valle-montaña). Esto constituye un factor importante en la determinación de diferentes

1 Escuela de Física, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 11501-2060. Correo electrónico: tiffany.suarez@ucr.ac.cr

2 Escuela de Física y Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 11501-2060. Correo electrónico: erick.rivera@ucr.ac.cr

climas en las regiones del país (Muñoz, Fernández, Gutiérrez y Zárate, 2002). Estudios como los de Zárate (1977, 1978, 1980) e Instituto Costarricense de Electricidad (ICE, 1980), han brindado una caracterización del comportamiento del viento en áreas específicas de Costa Rica.

Sáenz (2014) explica que el ciclo diurno de las diferentes variables atmosféricas y las características estacionales del clima han sido temas relativamente poco estudiados en Costa Rica. Los regímenes diarios de precipitación y viento, así como su relación en el Valle Central fueron investigados por Zárate (1978), quien determina que durante la mayor parte del año predominan los vientos alisios (del este). Estos alisios presentan mayor intensidad desde mediados de noviembre hasta abril, inclusive, y en julio y agosto (época del veranillo, según Magaña, Amador y Medina, 1999). De acuerdo con Zárate (1978), en los meses en los que el viento alisio es más débil (mayo-junio y setiembre-octubre), se presenta ingreso de vientos del Pacífico hacia el interior del país, por lo que en esta época se da convergencia de bajo nivel entre los flujos del oeste y el este, lo que provoca la ocurrencia de lluvias severas y tormentas eléctricas.

Muñoz et al. (2002) encontraron que la distribución general del viento en Costa Rica responde al flujo en la escala sinóptica y a su interacción con la orografía. Ellos identificaron las estaciones que presentan mayor velocidad del viento, así como el rango de variación de la rapidez y la dirección predominante a lo largo del año. Su análisis estableció que las estaciones ubicadas a barlovento, con respecto a la dirección del viento, reportan velocidades menores que las ubicadas a sotavento.

Por su parte, el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), reporta en sus boletines meteorológicos que el clima del Valle Central Occidental (VCO) para el invierno boreal (específicamente, diciembre-enero-febrero o DEF) se ve influenciado, en algunos

años, por el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), así como por la incursión de masas invernales de aire frío; razón por la cual hay un aumento significativo en el viento alisio en esta época del año con magnitudes de hasta 55 km h^{-1} (IMN 2015, 2016a, 2016b). Aunado a lo anterior, en este período se presenta la componente de invierno boreal de la corriente en chorro de bajo nivel del Caribe (CCBNC; Amador, 2008), cuyo núcleo se encuentra aproximadamente en 15° N y 75° O , con vientos máximos cerca de los 925 hPa e intensidad cercana a los 10 m s^{-1} y una fuerte cortante vertical del viento, que suprime la convección (Amador, 2008).

En esta investigación, se estudia el ciclo diurno del viento obtenido por medio de simulaciones realizadas con el modelo numérico regional Weather Research and Forecasting (WRF, Skamarock et al., 2019). Diferentes estudios muestran que este modelo, con ciertas configuraciones físicas y en dominios de alta resolución espacial, es capaz de representar el comportamiento del viento en regiones con topografía compleja. Por ejemplo, en el trabajo de Carvalho, Rocha, Gómez-Gesteira y Silva Santos (2012) se puso a prueba el WRF sobre un área de Portugal con terreno complejo, que cuenta con infraestructura para la generación de energía eólica y, posteriormente, Carvalho, Rocha, Gómez-Gesteira y Silva Santos (2014) realizaron una evaluación más amplia sobre la península ibérica. Por su parte, Gómez, Raible y Dierer (2015), utilizaron este modelo para simular el viento en superficie asociado con el paso de una tormenta invernal en Suiza.

En los trabajos de Carvalho et al. (2012, 2014) se enfatiza que las parametrizaciones físicas por evaluar son aquellas relacionadas con la capa límite, cuando el interés es representar el viento en superficie. Por ese motivo, los autores presentaron los resultados de tres experimentos en los que analizaron diferentes configuraciones de capa superficial (SL, por sus siglas en inglés),

capa límite planetaria (PBL, por sus siglas en inglés) y modelo de superficie terrestre (LSM, por sus siglas en inglés).

Por tanto, el presente trabajo determina la capacidad de algunas configuraciones físicas del modelo WRF de representar los procesos regionales y locales que modulan el clima de invierno boreal (DEF) en la región del VCO. Esto requiere de un conocimiento apropiado de las características climáticas de esta zona y la clara identificación de patrones atmosféricos, que permiten la evaluación de simulaciones generadas con modelos numéricos. El aporte de estos resultados puede mejorar la comprensión del comportamiento del viento en la región de interés y, a su vez, servirá para futuros estudios de modelado en esta zona geográfica del país.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

Los datos observados provienen de 15 estaciones meteorológicas (ver su ubicación en la figura 1a), las cuales fueron proporcionadas por el IMN y escogidas por contar con suficiente información horaria (2.6 % de datos faltantes o menos) para el período comprendido entre el 01 de diciembre de 2015 y el 29 de febrero de 2016. En la Tabla 1 se presenta una descripción de las características de cada estación.

Con el fin de presentar los resultados de manera sencilla, se enumeraron las estaciones antes mencionadas y se agruparon de acuerdo con su ubicación dentro del VCO, para facilitar la comparación entre ellas. Para ello, se efectuó una regionalización subjetiva de modo que se agruparon, por un lado, las estaciones ubicadas al oeste del VCO (grupo I: estaciones 1, 2 y 3), luego las localizadas al norte (grupo II: estaciones 4 y 5). El siguiente grupo reúne estaciones en puntos elevados de la Cordillera Volcánica Central (grupo III: estaciones 6, 7 y 8) y en otro se encuentran las ubicadas al este (grupo IV: estaciones 9 y 10).

Las estaciones 11 y 12 se ubican fuera del VCO (grupo V), pero son importantes para determinar diferencias o similitudes en los patrones de circulación con los otros puntos de medición. Finalmente, el último grupo incluye las estaciones alrededor de la Zona Protectora de los Cerros de Escazú (ZPCE; grupo VI: estaciones 13, 14 y 15). Los resultados de los experimentos con el WRF para el dominio 3 se comparan con las observaciones en los sitios y grupos indicados.

Para realizar el estudio del comportamiento estacional y el ciclo diurno del viento durante el invierno boreal, se consideró la magnitud de dicha variable cerca de la superficie, y los cambios en su dirección durante el día, con base en observaciones in situ. Esto permite determinar las características de la circulación atmosférica en el VCO durante el período de estudio y realizar la validación de los resultados de las simulaciones numéricas realizadas con la herramienta WRF.

Se calcularon promedios horarios, diarios y estacionales. Además, se analizó la variabilidad intraestacional del viento en el VCO y su relación con fluctuaciones en la intensidad de la CCBNC y la incursión de masas de aire frío. Para complementar el análisis del comportamiento estacional, se utilizaron promedios mensuales del vector viento en el nivel de 925 hPa. Estos promedios se calcularon a partir de datos del reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2020).

El ciclo diurno característico de la magnitud del viento para el período en estudio se obtuvo mediante el cálculo del promedio de la rapidez para cada hora del día (incluso tomando en cuenta los días en que el viento fue completamente calmo; es decir, de 0 m s^{-1}) y en cada estación.

El método utilizado para realizar las simulaciones numéricas se conoce como reducción de escala dinámica (Giorgi, 1990). Esta técnica, como lo describe Sáenz (2014), consiste en forzar un modelo regional de área limitada con datos

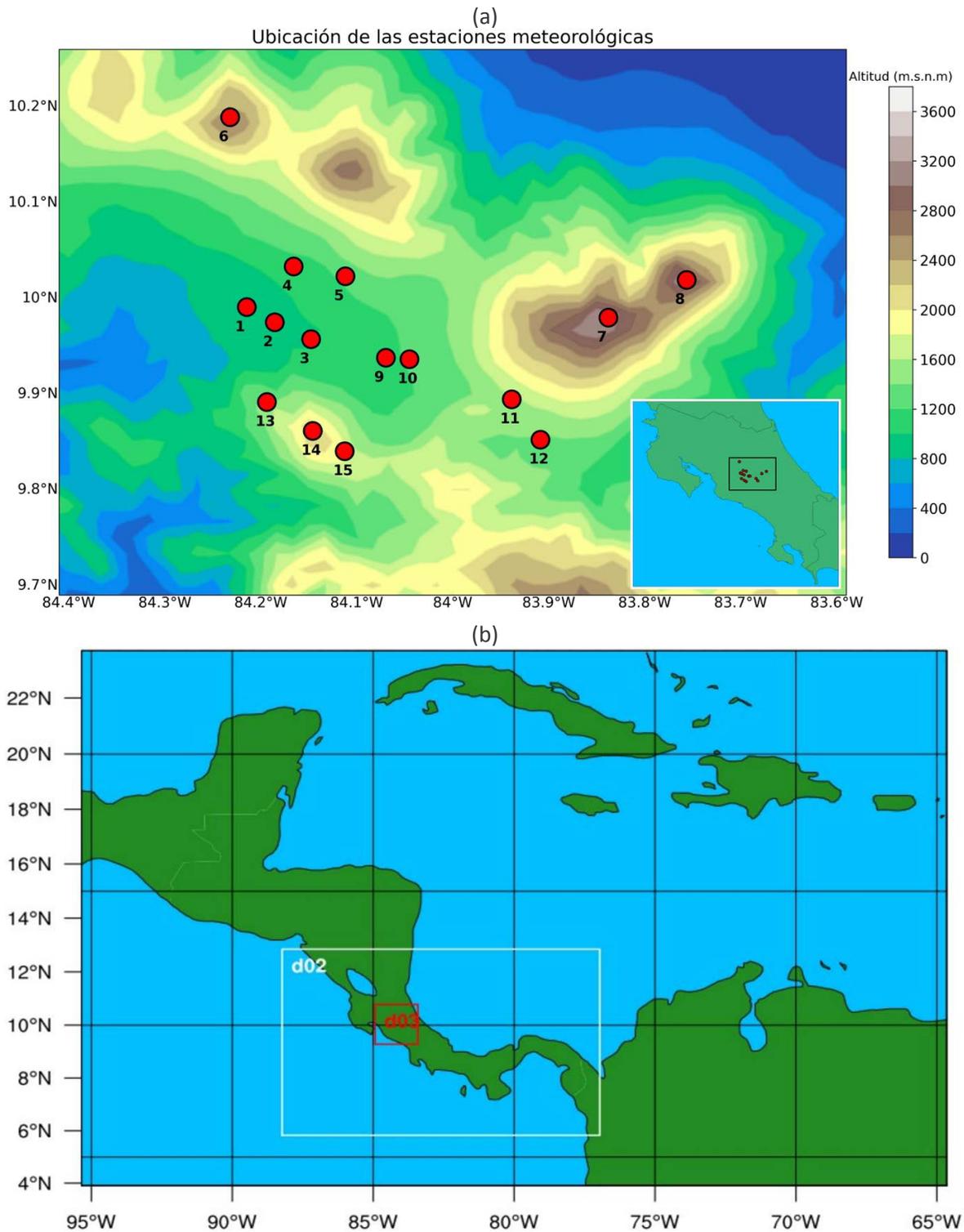


Figura 1. a) Mapa con la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en este trabajo (ver Tabla 1). b) Dominios utilizados en los tres experimentos realizados con la versión 4.0.3 del WRF-ARW. El primer dominio, d01, corresponde a una rejilla de 16 km, que abarca de 4° N - 24° N y de 95° O - 65° O; el dominio d02 discretiza el espacio cada 4 km desde 6° N - 13° N y 88° O - 77° O; mientras que en el dominio 3 (d03) se representa el espacio con una rejilla de 1 km en 9.25° N - 10.75° N y 84.75° O - 83.25° O.

de un modelo climático, de circulación general atmosférica o un reanálisis del estado de la atmósfera, el océano y la superficie, cuyo ancho de rejilla es mayor que el deseado.

Para este estudio, se escogieron los datos del reanálisis de ERA5, ya que poseen una de las más altas resoluciones espaciales hasta el momento, siendo de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ en la horizontal (aproximadamente 32 km), con cobertura global, mientras que en la vertical proporcionan 37 niveles de presión con una escala temporal horaria. ERA5 provee las condiciones iniciales y de contorno para las simulaciones con la versión 4.0.3 del modelo regional WRF (núcleo Advanced Research WRF o ARW). En el WRF-ARW se utilizó una rejilla de 16 km en el dominio 1 (d01), 4 km en el dominio 2

(d02) y 1 km en el dominio 3 (d03) y se obtuvieron resultados cada hora, por medio del uso de 33 niveles sigma en la vertical y 15 días para el tiempo de ajuste dinámico (spin-up en inglés), inicializando el modelo el 15 de noviembre del 2015.

La configuración de los dominios en el WRF-ARW se muestra en la figura 1b. El primero cubre América Central, porciones del mar Caribe y el océano Pacífico Tropical del Este, para ser capaz de representar adecuadamente la ubicación de la Zona de Convergencia Intertropical, la influencia de la CCBNC y la incursión de masas de aire frío del norte. El segundo dominio se sitúa sobre la porción sur de Nicaragua, todo Costa Rica y Panamá, así como el oeste del Caribe para capturar de forma eficaz el transporte de humedad en este sector y

Tabla 1. Estaciones meteorológicas del IMN utilizadas en el presente estudio, así como su agrupamiento, y porcentaje de datos horarios faltantes.

Grupo	Número	Nombre	Código	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m)	Datos faltantes (%)
I	1	Aeropuerto Juan Santamaría	84169	09° 59' 26,45"	-84° 12' 52,93"	913	0.0
	2	Belén	84199	09° 58' 30"	-84° 11' 08"	926	0.0
	3	Aeropuerto Tobías Bolaños, Pavas Oeste	84285	09° 57' 26,3"	-84° 08' 51,6"	981	0.0
II	4	Santa Bárbara	84197	10° 02' 00"	-84° 09' 57"	1070	0.0
	5	Esc. Ciencias Agrarias, Santa Lucía	84243	10° 01' 22,8"	-84° 06' 42,41"	1257	2.6
III	6	Laguna Volcán Poás	84221	10° 11' 21"	-84° 13' 55,2"	2598	0.0
	7	Volcán Irazú	73137	09° 58' 47,53"	-83° 50' 16,14"	3331	0.0
	8	Volcán Turrialba	73143	10° 01' 09"	-83° 45' 23"	3343	0.1
IV	9	IMN, Aranjuez	84141	09° 56' 16,61"	-84° 04' 10,83"	1181	0.0
	10	CIGEFI	84139	09° 56' 11"	-84° 02' 43"	1210	0.0
V	11	RECOPE, Ochomogo	73129	09° 53' 40,21"	-83° 56' 19,41"	1546	1.7
	12	ITCR, Cartago	73123	09° 51' 08"	-83° 54' 31"	1360	0.0
VI	13	Cerro Chitaría, Santa Ana	84219	09° 53' 30,1"	-84° 11' 37,3"	1717	0.0
	14	Cerro Cedral, Escazú	84231	09° 51' 41,1"	-84° 08' 45,2"	2255	0.0
	15	Cerro Burío, Aserrí	84215	09° 50' 25,3"	-84° 06' 45,6"	1811	0.0

la influencia que tiene sobre el área que encierra. Finalmente, el tercer dominio está enfocado sobre Costa Rica, específicamente sobre el VCO, para modelar el comportamiento de los vientos de la región de interés. Debido a limitaciones computacionales, no se modeló todo Costa Rica con una resolución espacial de 1 km, lo cual hubiera permitido representar con mayor detalle algunos procesos físicos importantes, como la interacción entre el flujo y la topografía. Las fronteras de este último dominio se encuentran sobre las cordilleras en algunas partes, lo cual puede generar ruido lateral; sin embargo, hay al menos 50 puntos de rejilla entre el área de interés y dichas fronteras.

Las simulaciones de reducción dinámica de escala en el VCO se plantearon de la siguiente manera: tres experimentos, cada uno con distintas configuraciones de SL, PBL y LSM, las cuales se muestran en la Tabla 2, mientras que el resto de las parametrizaciones físicas se mantienen fijas. Los esquemas SL-PBL-LSM para las simulaciones fueron escogidos con base en trabajos previos enfocados en regiones montañosas (Carvalho et al., 2012, 2014; Gómez et al., 2015), debido a que el VCO se trata de un caso de topografía compleja. El esquema de parametrización de cúmulos de Kain-Fritsch fue utilizado por Maldonado (2012) y demostró capacidad de representar la magnitud y distribución de la precipitación sobre América Central durante parte de un invierno boreal. Dicho esquema está inactivo en el dominio 3, por lo que la precipitación es representada explícitamente en ese caso.

Para evaluar la representación de la dirección y magnitud del viento en el modelo WRF-ARW, se utilizaron tres parámetros estadísticos: la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés), el sesgo (bias, en inglés) y la desviación estándar del error (STDE, por sus siglas en inglés). Siguiendo la suposición de Carvalho et al. (2012), se dará prioridad al valor de STDE, ya que, si es bajo, incluso en el caso de una simulación con RMSE o sesgos relativamente altos, significa que el error es casi constante, por lo que la simulación de la física es correcta. Si una simulación tiene un STDE alto, el error es aleatorio y la simulación tiene un significado físico bajo, incluso si tiene RMSE o sesgos relativamente bajos. Para la dirección del viento, Jammalamadaka y Sengupta (2001) proponen utilizar una distancia (diferencia entre la observación y el modelo) circular, definida como la más pequeña de las dos longitudes de arco entre dos puntos a lo largo de una circunferencia.

Se incluye también el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson entre las variables observadas y modeladas (Wilks, 2011). Además, se emplea una prueba t de Student para determinar la significancia estadística de las correlaciones obtenidas, con un nivel de confianza del 95 %, según la fórmula en Siegert, Bellprat, Ménégoz, Stephenson y Doblas-Reyes (2017). Este cálculo toma en consideración la autocorrelación (rezago 1) de las series de tiempo para obtener el tamaño efectivo de la muestra (Bretherton, Widmann, Dymnikov, Wallace y Bladé, 1999).

Tabla 2. Parametrizaciones físicas utilizadas en cada uno de los dominios del modelo WRF.

Parametrización física	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
SL-PBL-LSM	RMM5-YSU-Noah	ETA-MYJ-5layer	MYNN-MYNN3-Noah
Radiación de onda larga	Rapid Radiative Transfer Model		
Radiación de onda corta	Dudhia		
Cúmulos	Kain-Fritsch (*)		
Microfísica	WRF Single-Moment 6-Class		

(*) En el dominio 3 (d03) no se emplea un esquema de convección de cúmulos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Viento promedio regional en 925 hPa

En la figura 2 se presenta el patrón de circulación de escala sinóptica en 925 hPa, tanto para el reanálisis ERA5, como para el primer dominio de las tres simulaciones con el WRF. De acuerdo con el reanálisis (Fig. 2a), los vientos alisios sobre Costa Rica tienen componente del noreste. Esto concuerda con los patrones prevalentes en regiones tropicales, según lo indicado por Rivera y Amador (2009).

En la figura 2a, es de particular importancia la presencia de la CCBNC. Nótese que el máximo

observado de 15 m s^{-1} se encuentra en 12° N y 74° O ; es decir, tiene un ligero desplazamiento con respecto a lo encontrado por Amador (2008), debido a que dicho autor empleó otra fuente de datos de reanálisis, la cual tiene una menor resolución espacial.

En las simulaciones con el WRF (Figs. 2b-d), el núcleo de la CCBNC se encuentra desplazado ligeramente hacia el sur, ya que el máximo asociado está alrededor de 11° N , 75° O (más cercano a la costa caribeña de Colombia). Además, la intensidad del flujo de bajo nivel sobre el Caribe central y oriental es menor que en el reanálisis. Esto puede indicar que los esquemas de parametrización de capa límite producen fuerte

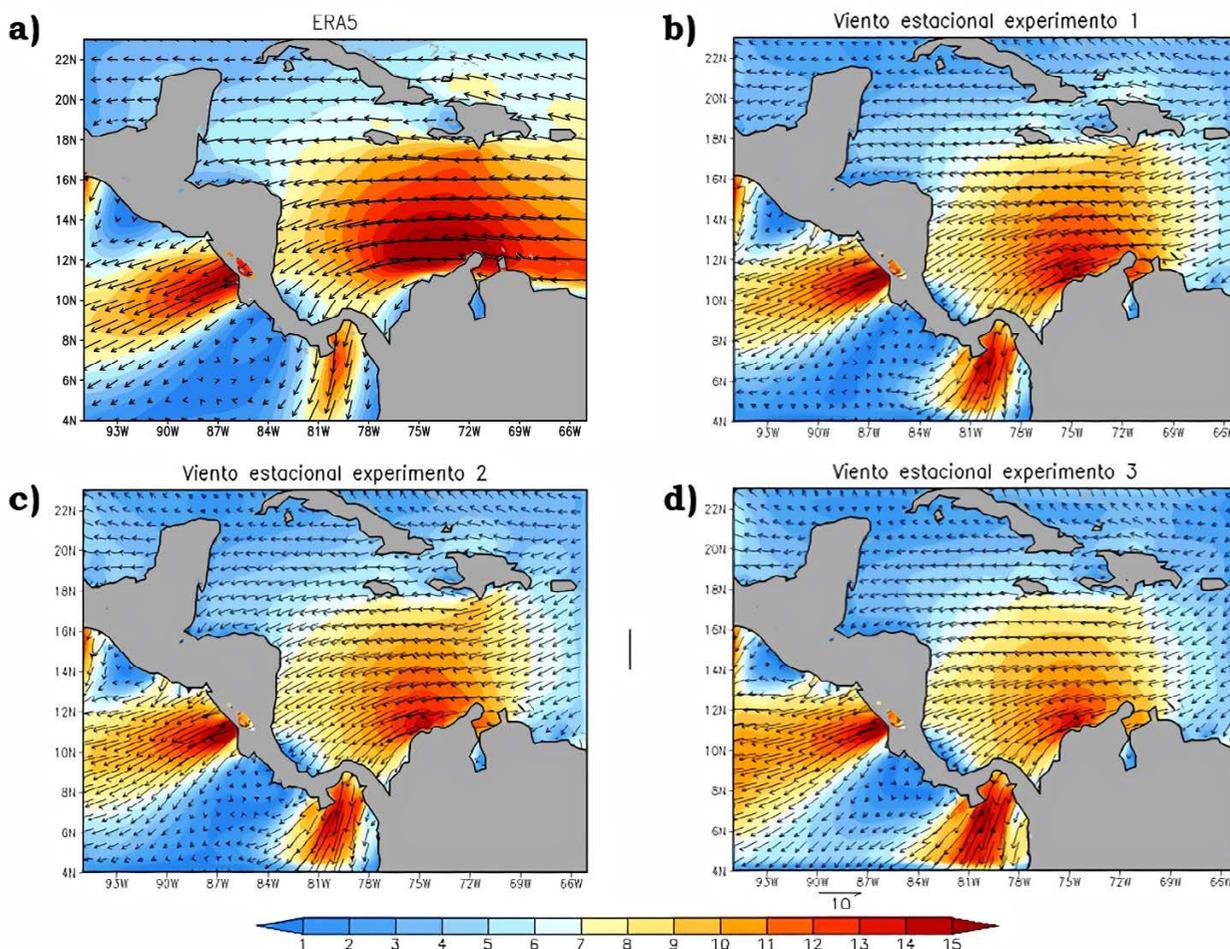


Figura 2. Viento promedio (m s^{-1}) en el nivel de 925 hPa sobre América Central, el mar Caribe y el Pacífico tropical del este (período diciembre de 2015-febrero de 2016), según el reanálisis ERA5 (a) y los experimentos 1, 2 y 3 (b, c y d, respectivamente) realizados con el modelo WRF.

mezcla de momento, lo cual incide en magnitudes de viento más débiles.

Cabe destacar que los experimentos con el WRF capturan las dos corrientes asociadas con los chorros trans-ístmicos cerca del domo de Costa Rica y el golfo de Panamá. La primera de ellas, según ERA5, posee una magnitud de más de 13 m s^{-1} y la segunda alrededor de 11 m s^{-1} . Sobre el domo de Costa Rica, los tres experimentos muestran intensidades del viento similares a las del reanálisis, mientras que en el golfo de Panamá la simulación 3 es la de magnitudes más grandes, lo cual puede deberse al tratamiento de la fricción sobre tierra.

3.2. Ciclo diurno de la magnitud del viento en el VCO

El patrón de vientos en el VCO muestra un comportamiento heterogéneo, pues se tiene la influencia de sistemas sinópticos y de mesoescala, cuyos regímenes abarcan brisas de valle y montaña, por ejemplo. Lo anterior se comprueba al observar el ciclo diurno de las estaciones meteorológicas (Fig. 3), las cuales fueron clasificadas para su análisis según su ubicación geográfica.

Las figuras 3a-c muestran el ciclo diurno promedio (observado y simulado), durante el período de estudio, para el primer grupo de estaciones, que corresponden a las ubicadas al oeste del VCO: Aeropuerto Juan Santamaría (1), Belén (2) y Aeropuerto Tobías Bolaños (3). En este primer conjunto se observa que el viento se intensifica en las horas del día con mayor calentamiento radiativo. Para la estación 1 (Fig. 3a), a las 10:00 se tiene el máximo de viento de $6,9 \text{ m s}^{-1}$ y a las 19:00 su mínimo de $4,6 \text{ m s}^{-1}$. Al comparar con las simulaciones, se observa que éstas también reproducen el comportamiento del ciclo diurno. El experimento 1 provee la mejor representación, ya que la evaluación estadística de los parámetros

indica que su STDE es menor en comparación con los otros experimentos (Tabla 3). En esta estación, el sesgo es negativo, lo que muestra una subestimación por parte de todos los experimentos, mientras que el RMSE tiene valores entre $2,7$ y $3,1 \text{ m s}^{-1}$.

En el caso de la estación 2 (Fig. 3b), su máximo de $7,4 \text{ m s}^{-1}$ ocurre a las 9:00, con un mínimo de $5,5 \text{ m s}^{-1}$ a las 18:00. Las simulaciones muestran un rango diurno de la rapidez del viento mayor al observado; sin embargo, la representación del ciclo diurno es adecuada, especialmente en el experimento 1, ya que sus parámetros estadísticos son los más bajos (Tabla 3). Cabe destacar que la simulación 2 modela de mejor forma el ciclo diurno en las horas de máxima intensidad del viento, lo que se refleja en que el sesgo de esta simulación sea el menor. Por último, la estación 3 (Fig. 3c) posee su máximo a la misma hora que la anterior, pero con el mínimo a las 19:00, con valores de $8,3$ y $6,7 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente. En esta estación, las simulaciones del modelo WRF se comportan de forma similar a la estación 2.

En las Figs. 3d-e se muestra el ciclo diurno de viento promedio para el segundo grupo de estaciones (norte del VCO), correspondientes a Santa Bárbara (4) y Escuela de Ciencias Agrarias Santa Lucía (5). En este conjunto, los mínimos se dan en horas de la noche y en la madrugada. El viento aumenta su intensidad hasta alcanzar máximos a las 12:00 y 13:00 en las estaciones 4 y 5, respectivamente. Las simulaciones de la estación 4 (Fig. 3d) muestran un ciclo diurno muy similar al observado. Adicionalmente, las magnitudes del viento simuladas tienen valores cercanos a las reportadas por las mediciones, como lo confirma el estadístico de sesgo. El STDE tanto en el experimento 1 como en el 3, presenta un valor de $2,1 \text{ m s}^{-1}$, por lo que, con base en el sesgo, se nota que la simulación 1 provee la mejor representación dado que su valor es prácticamente cero.

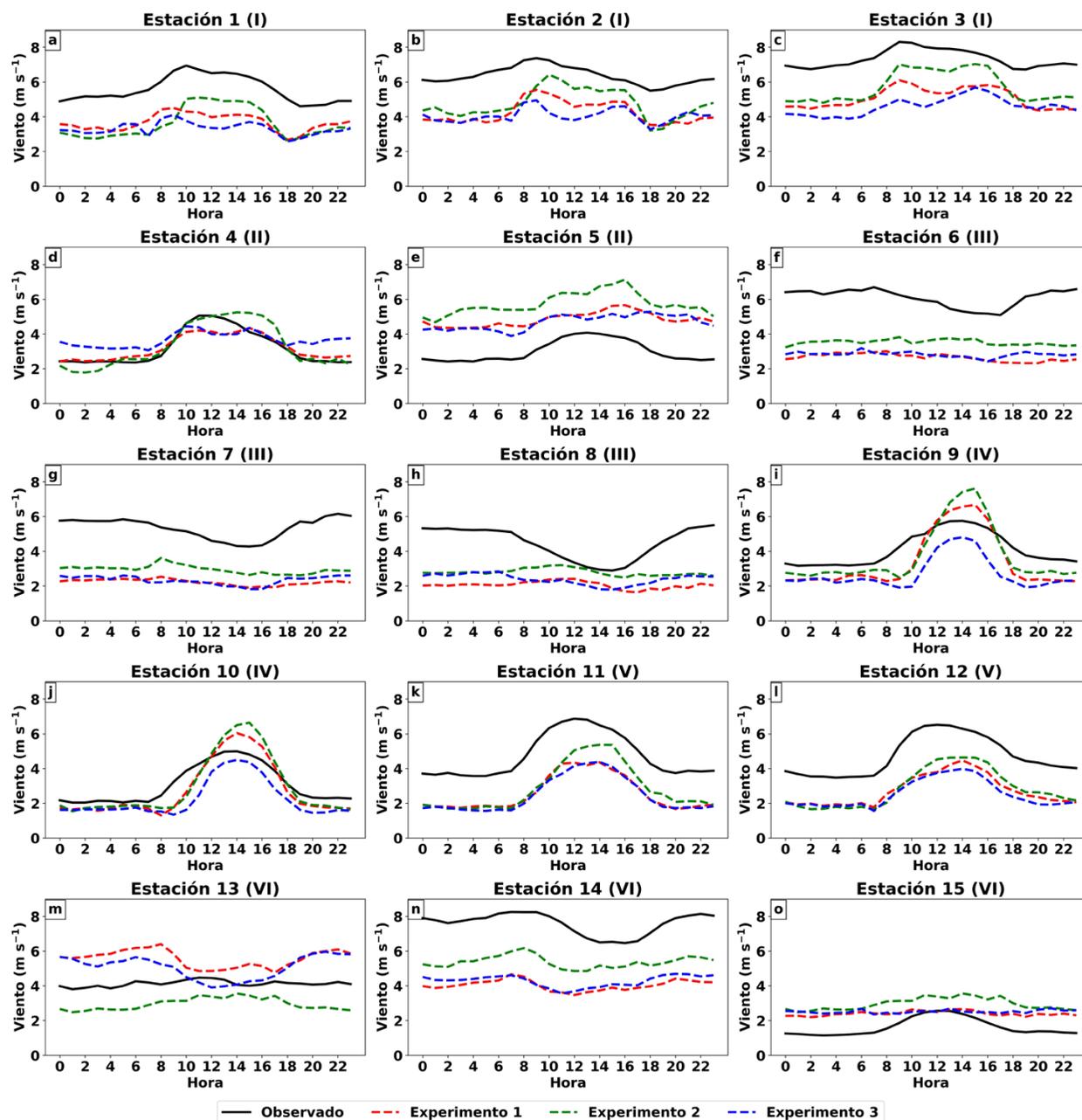


Figura 3. Ciclo diario promedio (observado y simulado en d03) de la rapidez del viento (m s^{-1}) para las estaciones ubicadas en el VCO. Período: diciembre de 2015-febrero de 2016. En paréntesis se muestra el grupo al que pertenece cada estación, según lo indicado en el texto.

En el caso de la estación 5 (Fig. 3e), sus simulaciones capturan la curva del ciclo diario de forma no tan suavizada. La mejor representación es dada por el experimento 3, debido a que las métricas calculadas son menores con respecto a las otras simulaciones. Es importante notar que en

esta estación el sesgo del modelo es claramente positivo.

El ciclo diario promedio del viento para el grupo de estaciones localizadas en puntos altos de la Cordillera Volcánica Central se muestra en las Figs.

3f-h. Las estaciones corresponden a la Laguna del Volcán Poás (6), el Volcán Irazú (7) y el Volcán Turrialba (8). En estas tres estaciones, el ciclo diurno presenta máximos en horas de la noche-madrugada y mínimos en las tardes, contrario a lo observado para puntos ubicados en el valle. Nótese que, en todos los casos de este grupo, el modelo WRF no capturó de forma adecuada la curva del ciclo diurno, pues no reflejó aspectos como la disminución en la magnitud del viento que se presenta en horas de la tarde en las tres estaciones. Además, la rapidez es subestimada en todos los experimentos. Contrario a lo que ocurre en los demás grupos, donde el viento se intensifica en horas de la mañana, las estaciones del grupo III muestran una disminución en la intensidad del viento a partir de las 9:00 (aunque la estación 14, ubicada en el Cerro Cedral Escazú también se comporta de forma similar). Otro aspecto por resaltar es que los experimentos numéricos mantienen valores muy similares a lo largo del día (poca variación diurna) para las tres estaciones. En este caso, el sesgo de la simulación 2 fue menor en las tres estaciones y, en la estación 8, el experimento 2 coincide con las observaciones entre las 12:00 y 14:00.

En las figuras 3i-j, se enmarcan las estaciones al este del VCO: IMN (9) y Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI, 10), respectivamente. En este grupo, el viento alcanza su máxima intensidad cerca de las 14:00 horas con valores cercanos a 5 m s^{-1} , mientras que los mínimos se presentan en la madrugada. Con respecto a los parámetros estadísticos calculados, nótese que el sesgo de las simulaciones es negativo en ambos sitios, siendo el experimento 2 el de menor subestimación. Sin embargo, en la estación 9 (Fig. 3i) la mejor representación la provee la simulación 1, pues sus estadísticos de sesgo, RMSE y STDE son los más bajos. En el caso de la estación 10 (Fig. 3j), la magnitud del viento es mejor modelada por el experimento 3, ya que su RMSE y STDE son menores.

Las estaciones de RECOPE Ochomogo (11) y el Instituto Tecnológico de Costa Rica (12) se muestran en las Figs. 3k-l. El ciclo diurno promedio de estas estaciones refleja que el viento alisio es mayor en las horas del día entre las 10:00 y 16:00 horas, alcanzando magnitudes cercanas a 6.7 m s^{-1} , y de menor intensidad en las horas de la madrugada, con valores cercanos a 3.5 m s^{-1} . Se hace evidente en la Tabla 3, que los comportamientos de los experimentos 1 y 3 son muy similares entre sí; sin embargo, en la simulación 1 se presentan los menores valores de RMSE y STDE. Cabe destacar, en ambos casos, que el sesgo del experimento 2 fue el menor, lo cual se observa en los puntos de intensidad máxima de los valores modelados.

Finalmente, las figuras 3m-o muestran los puntos al sur del VCO: Santa Ana (13), Cerro Cedral, Escazú (14) y Cerro Burío, Aserrí (15). En estas estaciones, se presentan entre ellas variaciones de las horas de viento máximo y mínimo, pues para las estaciones 13 y 15 éste alcanza su máxima intensidad hacia el mediodía, mientras que en la 14 se observa el máximo a las 7:00. Los mínimos de viento en las estaciones 13 y 15 se dan hacia la madrugada, no así en la 14 que presenta su mínimo en horas de la tarde. Nótese que estas estaciones también representan puntos altos alrededor del VCO y al igual que en el grupo III, el WRF no captura correctamente el comportamiento del ciclo diurno en cada estación.

En las estaciones 13 y 15, los estadísticos indican que el experimento 1 (Tabla 3) tiene la representación más aceptable, debido a los valores más bajos de RMSE y STDE. Cabe destacar que en la estación 13, el experimento 3 valora de forma correcta la rapidez del viento en los períodos de las 10:00-11:00 y 14:00-16:00 y tiene el sesgo más bajo. Para el caso de la estación 14, el sesgo es negativo en todos los experimentos, lo que se observa claramente en la figura 3n. Esta estación es la única en la que el experimento 2 mostró el desempeño más aceptable.

Tabla 3. Estadísticos de la magnitud y dirección del viento horario para cada estación meteorológica y experimento en el dominio 3.

Grupo	Estación	Experimento	Magnitud ($m s^{-1}$)			Dirección ($^{\circ}$)		
			RMSE	Sesgo	STDE	RMSE	Sesgo	STDE
I	1	1	2.8	-1.9	2.0	65	16	63
		2	3.1	-2.0	2.4	71	24	67
		3	3.1	-2.3	2.1	73	19	70
	2	1	2.9	-2.1	2.0	58	16	56
		2	3.0	-1.6	2.6	62	18	59
		3	3.1	-2.3	2.1	67	16	65
	3	1	2.9	-2.2	1.9	54	11	53
		2	2.7	-1.6	2.2	58	11	57
		3	3.4	-2.7	2.0	59	7	59
II	4	1	2.2	0.0	2.2	91	13	90
		2	2.5	0.1	2.5	96	31	91
		3	2.2	0.5	2.1	88	6	88
	5	1	2.9	1.8	2.2	76	-23	72
		2	4.0	2.7	2.9	78	-20	76
		3	2.5	1.7	1.8	71	-23	67
III	6	1	4.7	-3.4	3.2	77	9	76
		2	4.2	-2.6	3.3	82	4	82
		3	4.7	-3.3	3.4	76	6	76
	7	1	4.0	-3.1	2.4	130	-39	124
		2	3.6	-2.4	2.6	126	-38	121
		3	4.0	-3.0	2.6	124	-30	120
	8	1	3.4	-2.4	2.4	106	19	105
		2	3.1	-1.7	2.6	107	12	106
		3	3.1	-2.1	2.3	101	8	101
IV	9	1	2.1	-0.7	2.0	66	27	60
		2	2.3	-0.4	2.3	65	27	59
		3	2.2	-1.4	1.7	63	27	57
	10	1	1.8	-0.3	1.8	89	52	72
		2	2.0	-0.1	2.0	92	57	72
		3	1.7	-0.8	1.5	92	60	70
V	11	1	3.6	-2.1	3.0	52	3	52
		2	3.7	-1.8	3.3	54	11	53
		3	3.7	-2.2	3.0	55	12	53
	12	1	2.7	-2.0	1.8	91	62	66
		2	2.6	-1.9	1.9	86	62	59
		3	2.8	-2.2	1.8	90	56	71
VI	13	1	2.7	1.4	2.3	194	-133	141
		2	2.9	-1.2	2.7	158	-61	146
		3	2.9	0.9	2.7	195	-135	142
	14	1	4.9	-3.6	3.4	43	-4	43
		2	3.9	-2.2	3.2	43	-6	43
		3	4.8	-3.3	3.4	39	-6	38
	15	1	1.4	0.8	1.1	79	19	77
		2	1.8	1.3	1.2	86	12	85
		3	1.5	0.9	1.3	89	11	88

3.3. Variación observada y simulada de la magnitud y dirección del viento horario en el VCO

A continuación, se evidencia que el VCO no es homogéneo en cuanto a la dirección horaria del viento para el período de estudio; sin embargo, cabe destacar que la componente con mayor representación en todas las estaciones fue la del Este (E).

En la figura 4, conformada por las estaciones 1, 2, y 3, se nota que todas las direcciones horarias van desde el E hasta el Sureste (SE). En las tres

estaciones predominan vientos con magnitudes de 6 a 9 m s^{-1} , seguidos por vientos con valores de 9 a 12 m s^{-1} .

El WRF, en todos los experimentos, presentó un sesgo positivo en la dirección del viento para el grupo I de estaciones. Esto se nota en la ocurrencia de viento débil con componente del Oeste (O) en algunas ocasiones. Además, los datos simulados tienen un RMSE que oscila entre 54° y 73° . La menor desviación se da en la estación 3. Al realizar la evaluación de los parámetros estadísticos (Tabla 3) se determina que el experimento que mejor capturó la dirección fue el número 1.

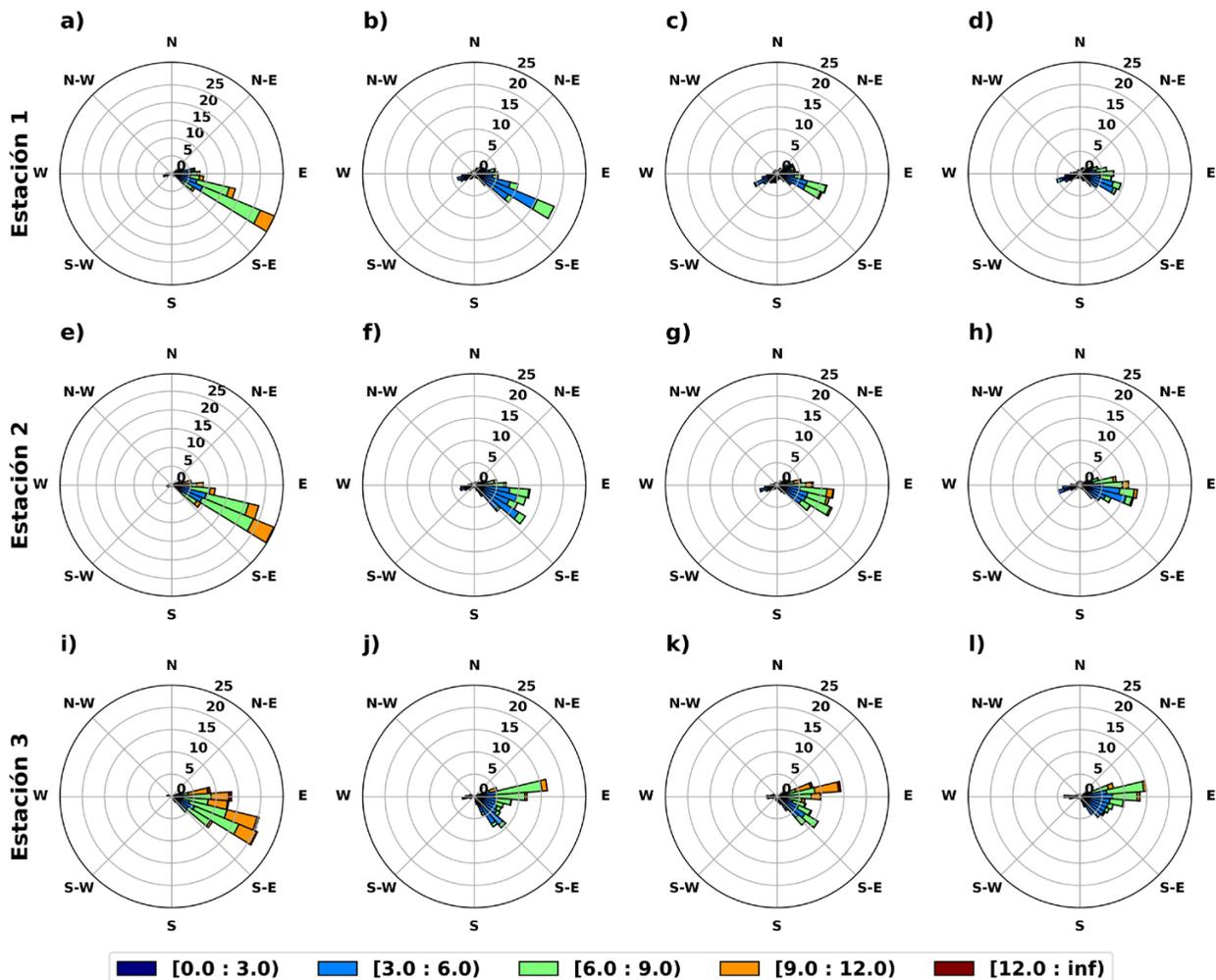


Figura 4. Dirección y magnitud del viento (m s^{-1}) de acuerdo con las observaciones horarias (a, e, i) y simulaciones 1 (b, f, j), 2 (c, g, k) y 3 (d, h, l) para las estaciones 1, 2 y 3 (grupo I), respectivamente. Período: diciembre de 2015-febrero de 2016.

Las estaciones 4 y 5 (grupo II, no mostrado) presentan viento entre el Noreste (NE) y el SE, cuyas intensidades están principalmente entre los 3 y 6 m s^{-1} , seguido por casos entre los 6 y 9 m s^{-1} . En este grupo II, el sesgo para la estación 4 es positivo, mientras que en la estación 5 es negativo para todas las simulaciones. En este conjunto la dispersión de los datos del WRF, en comparación con las observaciones, alcanza 96° como valor máximo y 71° como mínimo. Un aspecto destacable es que los valores más bajos de RMSE, sesgo y STDE para la dirección del viento, fueron los obtenidos en el experimento 3 (Tabla 3).

Por otra parte, en la figura 5, se encuentran las estaciones 6, 7 y 8, respectivamente (grupo III), donde se presenta viento con dirección del NE, mayoritariamente. Las observaciones en la estación 6 indican que el viento de 6 a 12 m s^{-1} es predominante y proviene del NE. La estación 7, por su parte, presenta direcciones horarias entre el Noroeste (NO) y el Norte (N). En el rango NE a SE se encuentran el resto de las direcciones, con una ligera presencia Sur (S), abarcando las magnitudes de 3 a 9 m s^{-1} . Finalmente, el viento en la estación 8 abarca las direcciones entre el NE y el SE, con magnitudes menores o iguales a 9 m s^{-1} .

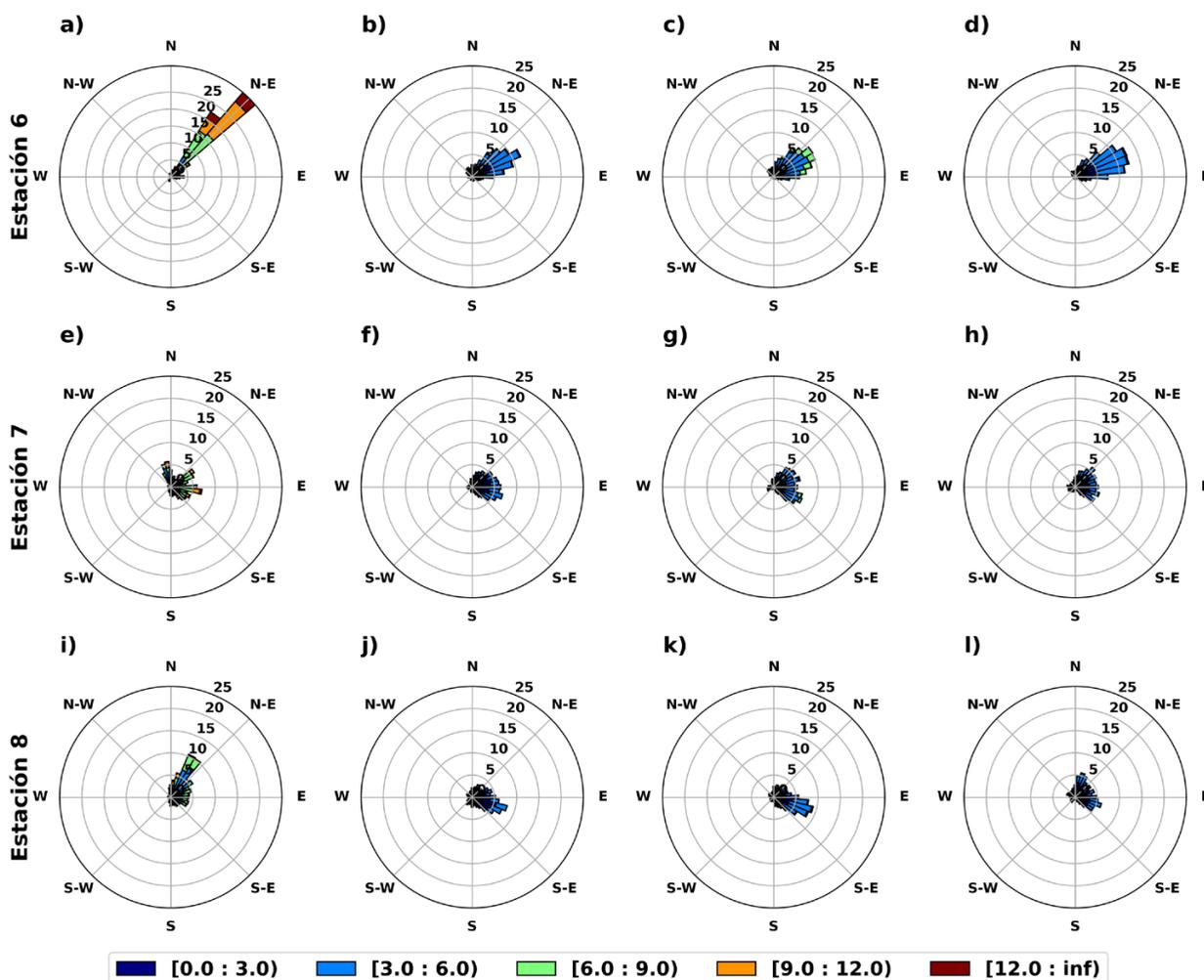


Figura 5. Dirección y magnitud del viento (m s^{-1}) de acuerdo con las observaciones horarias (a, e, i) y simulaciones 1 (b, f, j), 2 (c, g, k) y 3 (d, h, l) para las estaciones 6, 7 y 8 (grupo III), respectivamente. Período: diciembre de 2015-febrero de 2016.

Los resultados de las simulaciones muestran la dificultad que tiene el modelo WRF para representar la dirección del viento cuando la rapidez es baja (entre 0 y 3 m s^{-1}). En este grupo existen dispersiones (RMSE) de hasta 130° . Cabe destacar que el sesgo en la dirección es positivo y relativamente pequeño para las estaciones 6 y 8, mientras que en la estación 7 es negativo y de mayor amplitud. No obstante, el experimento 3, mostrado en las Figs. 5d, h, l, es el mejor para capturar la dirección de este conjunto de estaciones.

En relación con la figura 6, que corresponde al grupo IV (estaciones 9 y 10), se observan direcciones entre el NE y el E. Las observaciones en ambas estaciones del conjunto muestran que con mayor frecuencia ocurren rapideces en el rango de 3 a 6 m s^{-1} . El sesgo de las direcciones en el WRF es positivo y la dispersión de los datos modelados va de 63° a 92° ; sin embargo, es importante notar que las direcciones del viento

en las simulaciones se encuentran, de forma general, en los mismos intervalos que los valores observados, por lo que se podría decir que el modelo capturó adecuadamente esta variable. Al realizar la evaluación de los parámetros estadísticos, se determina que el experimento 3 provee la mejor captura para la estación 9, debido a que presenta los valores más bajos de sesgo, RMSE y STDE, mientras que en la estación 10 es la simulación 1 la que mejor modela la dirección del viento.

En el caso de la figura 7, se presenta la distribución de la magnitud y dirección del viento horario de la estación 11, la cual exhibe en su mayoría componentes entre el S y el SE, abarcando todo el viento desde los 0 hasta los 9 m s^{-1} . Para la época que comprende este estudio, el comportamiento explicado es de esperar; pues los vientos son en su mayoría alisios; además la componente del S en la estación RECOPE Ochozogo puede deberse a su ubicación y la configuración topográfica de

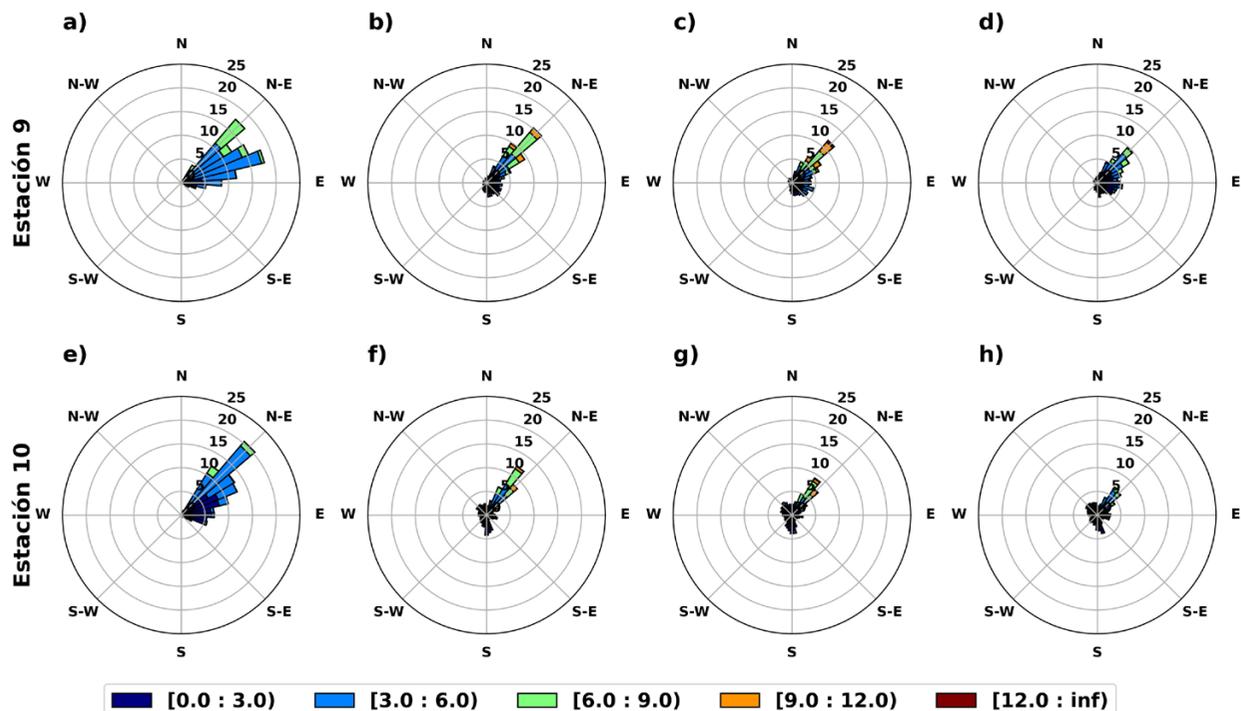


Figura 6. Dirección y magnitud del viento (m s^{-1}) de acuerdo con las observaciones horarias (a, e) y simulaciones 1 (b, f), 2 (c, g) y 3 (d, h) para las estaciones 9 y 10 (grupo IV), respectivamente. Período: diciembre de 2015-febrero de 2016.

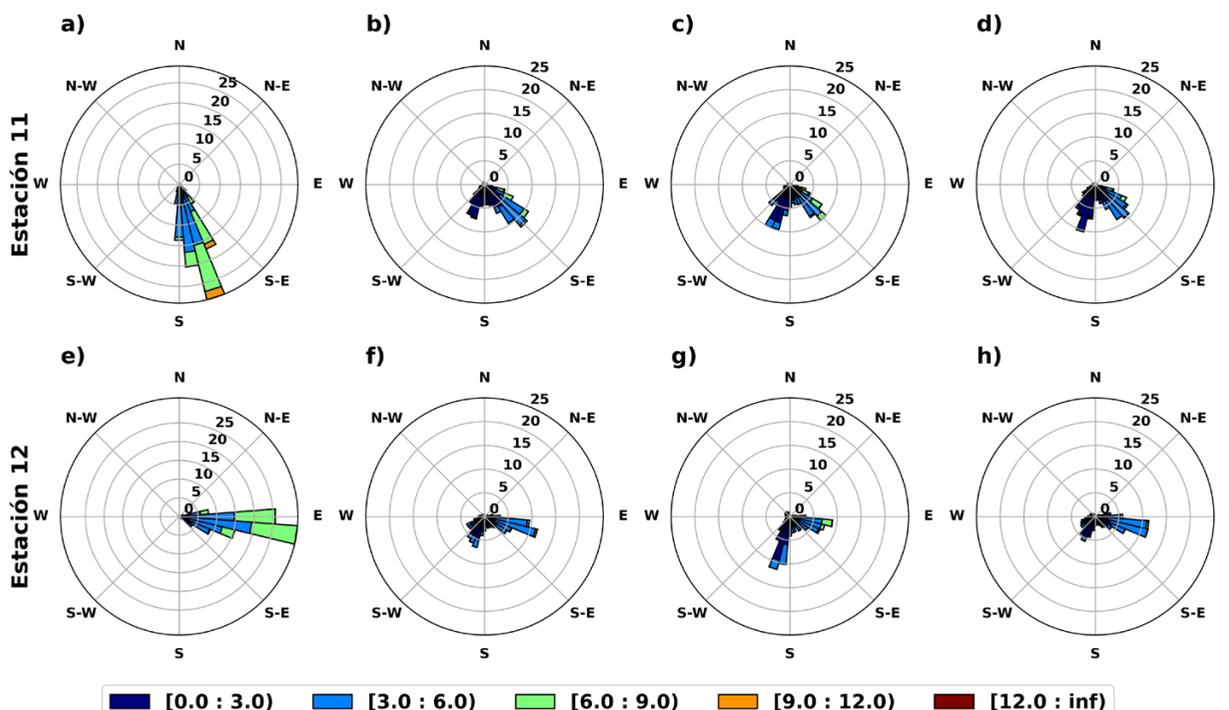


Figura 7. Dirección y magnitud del viento (m s^{-1}) de acuerdo con las observaciones horarias (a, e) y simulaciones 1 (b, f), 2 (c, g) y 3 (d, h) para las estaciones 11 y 12 (grupo V), respectivamente. Período: diciembre de 2015-febrero de 2016.

la zona. Por su lado, la estación 12 presenta un comportamiento de viento totalmente del E, con algunas desviaciones hacia el SE, abarcando en su mayoría vientos de 3 a 6 m s^{-1} y con porcentajes altos de magnitudes entre 6 y 9 m s^{-1} . En las simulaciones se registra una dispersión de hasta 55° en la estación 11 y de hasta 90° en la estación 12 (lo cual es evidente en las Figs. 7f-h). Para ambas estaciones, el sesgo en las simulaciones es positivo. De acuerdo con los estadísticos calculados (Tabla 3), el experimento 1 tiene un mejor desempeño para la estación 11, mientras que en la estación 12 es el experimento 2.

Finalmente, el grupo VI (no mostrado), compuesto por las estaciones 13, 14 y 15, presenta un comportamiento heterogéneo, con direcciones entre el Noroeste (NO) y el E. Específicamente, la estación 13 es la segunda de todo el conjunto de estaciones cuyos datos observados contienen una componente del NO, con magnitudes que abarcan desde los 0 hasta los 12 m s^{-1} . También se

presentan direcciones en el intervalo N a NE. En la estación 14 se presenta viento prácticamente del E, con intensidades que en muchos casos superan los 12 m s^{-1} . Por su parte, la estación 15 es la tercera entre todas las estaciones analizadas que presenta una débil componente del NO en sus datos observados, con magnitudes entre 0 y 3 m s^{-1} . Aunque la dirección predominante es del NE con magnitudes de hasta 6 m s^{-1} .

Este último grupo de estaciones exhibe un comportamiento singular, pues el sesgo de la dirección en las simulaciones con el WRF es negativo en las estaciones 13 y 14, y positivo en la 15. Este mismo estadístico, presenta valores muy altos en la estación 13, y bajos en las estaciones 14 y 15. La dispersión o RMSE, es menor a 45° en la estación 14, cercana a 90° en la 15 y alrededor de 180° en la estación 13. La simulación 2 muestra la mejor representación de la dirección del viento, por sus menores valores tanto de RMSE como de sesgo.

3.4. Validación del modelo WRF por grupos de estaciones y en todo el VCO

Los estadísticos promediados por grupo de estaciones para el dominio 3 se muestran en la Tabla 4. De acuerdo con dicha tabla e independientemente de la configuración SL-PBL-LSM utilizada, el viento en la mayor parte de los grupos de estaciones fue subestimado en magnitud, pues en cinco de ellos el sesgo es negativo. Carvalho et al. (2012) y Gómez et al. (2015) discuten que estos sesgos se deben a la configuración física utilizada en el modelo WRF, así como a problemas en la correcta representación de la topografía, a pesar de la utilización de dominios con alta resolución espacial.

En cuanto al mejor desempeño del modelo, éste se presenta para el grupo IV (al este del VCO), ya que su dispersión (RMSE) promedio se mantuvo en un rango de 2.0 m s^{-1} a 2.2 m s^{-1} ; además, la

subestimación en la magnitud del viento y el STDE fueron menores. Por otro lado, el grupo con mayor dificultad de representación en el WRF fue el III (puntos altos ubicados en la Cordillera Volcánica Central). La configuración del WRF que mostró mejores resultados es la que utiliza el esquema RMM5-YSU-Noah (experimento 1), mientras que la que tuvo más problemas de representación, fue la proporcionada por las parametrizaciones ETA-MYJ-5layer (simulación 2).

En cuanto a la dirección del viento, se puede observar que en la mayor parte de los experimentos se obtuvo sesgo positivo, pues solo en cinco estaciones la dirección modelada del viento obtuvo valor de dirección menor a la observada. Estos resultados se complementan al notar que la RMSE en todos los datos simulados fue mayor o igual a 59° , alcanzando en el peor de los casos, 108° de dispersión promedio. No obstante, es destacable que el experimento 1

Tabla 4. Estadísticos promedio de las simulaciones de la magnitud y dirección del viento horario en el dominio 3 para cada grupo de estaciones.

Grupo	Experimento	Magnitud (m s^{-1})			Dirección ($^\circ$)		
		RMSE	Sesgo	STDE	RMSE	Sesgo	STDE
I	1	2.9	-2.1	2.0	59	15	57
	2	2.9	-1.7	2.4	64	18	61
	3	3.2	-2.4	2.1	66	14	65
II	1	2.6	0.9	2.2	83	-5	81
	2	3.3	1.4	2.7	87	6	83
	3	2.4	1.1	2.0	79	-9	77
III	1	4.0	-3.0	2.7	104	-3	102
	2	3.6	-2.2	2.8	105	-7	103
	3	3.9	-2.8	2.8	100	-5	99
IV	1	2.0	-0.5	1.9	78	39	66
	2	2.2	-0.3	2.2	79	42	66
	3	2.0	-1.1	1.6	78	43	64
V	1	3.2	-2.1	2.4	71	33	59
	2	3.2	-1.9	2.6	70	37	56
	3	3.3	-2.2	2.4	72	34	62
VI	1	3.0	-0.5	2.3	106	-39	87
	2	2.9	-0.7	2.4	96	-18	91
	3	3.1	-0.5	2.5	108	-43	89

modeló mejor el grupo de estaciones ubicado al oeste del VCO, mientras que los experimentos 2 y 3 obtuvieron mejores resultados al representar esta variable en las estaciones fuera del VCO. Por su parte, el grupo en el que hubo mayores problemas para simular la dirección del viento fue, de nuevo, el III (sitios elevados), pues su dispersión va de 100° a 105° , mientras que el promedio de la desviación estándar del error alcanza los 103° . Sin embargo, es interesante notar que en el grupo III se obtuvieron los valores más bajos en el sesgo. En resumen, para la dirección del viento hay una mejor representación en el experimento 1 (esquema RMM5-YSU-Noah), mientras que las mayores limitaciones se aprecian en la simulación 2 (esquema ETA-MYJ-5layer).

La tabla 5 muestra el promedio, por experimento, de las 15 estaciones analizadas en este estudio para el dominio 3, cuya rejilla es de 1 km. Según el sesgo promedio, el modelo tiende a subestimar la magnitud del viento y presenta un valor de RMSE de 3.0 m s^{-1} . Es interesante notar que los experimentos 1 y 3 arrojan resultados muy similares entre sí y mejores que los de la simulación 2; no obstante, esta última obtiene un menor valor del sesgo en cuanto a la magnitud del viento, ya que se comprobó que esta simulación captura de mejor forma los valores extremos. Con respecto a la dirección, ocurre el mismo comportamiento; sin embargo, al realizar la evaluación de los parámetros estadísticos, se determina que es el experimento 1 el que mejor captura la dirección, debido a sus menores valores promedio de RMSE y STDE. En conclusión, tanto en la magnitud del viento como para su dirección, fue el experimento 1 el que mejor simuló el viento horario sobre todo el VCO.

Considerando estos resultados, se identifica a la configuración compuesta por RMM5-YSU-Noah, como la mejor para modelar el viento en el VCO de Costa Rica para el período en estudio. Este resultado es similar al encontrado por Carvalho et al. (2012), para un área de Portugal y, más

Tabla 5. Estadísticos promedio de las simulaciones de viento horario para todo el VCO en el dominio 3.

Experimento	Magnitud (m s^{-1})			Dirección ($^\circ$)		
	RMSE	Sesgo	STDE	RMSE	Sesgo	STDE
1	3.0	-1.3	2.3	110	19	98
2	3.0	-1.0	2.5	111	28	102
3	3.0	-1.4	2.3	110	18	99

en detalle, para una zona entre montañas. Sin embargo, Shin y Hong (2011) determinan que la parametrización YSU produce fuerte mezcla de momento, lo cual genera viento de bajo nivel menos intenso que lo observado.

Se puede notar también, que el esquema de PBL MYJ fue el que tuvo mayor dificultad de representación, de acuerdo con los estadísticos utilizados. Carvalho et al. (2012) indican que esto ha sido anteriormente reportado por Pagowski (2004), quien identifica deficiencias en la transferencia de calor entre la superficie y la atmósfera en este esquema.

3.5. El viento en el VCO: su relación con la CCBNC y las incursiones de masas de aire frío

Sobre el VCO se presenta una importante variabilidad espacial en el comportamiento del viento. La mayoría de las estaciones meteorológicas estudiadas son influenciadas, entre otros aspectos, por circulaciones de mesoescala, la incursión de masas invernales de aire frío en el mar Caribe y la CCBNC. Estos factores no solo producen sistemas de viento local, sino que también incorporan forzamientos de gran escala que afectan cada zona del VCO (Sáenz, 2014).

Los resultados evidencian que los forzamientos radiativos y de gran escala, que modulan el ciclo diurno de las estaciones al interior del valle,

sí son capturados correctamente en el WRF, mientras que los mecanismos físicos en zonas topográficamente más complejas y de mayor altitud, no se representan de manera adecuada.

Por su parte, las incursiones de masas de aire frío no tuvieron efectos sobre Costa Rica durante el mes de diciembre. Hubo un evento en enero, entre los días 19 y 23, donde ocurrió caída de rótulos y cableado eléctrico, y tres actividades de fuertes vientos en el mes de febrero, alcanzando magnitudes de hasta 27.8 m s^{-1} (100 km h^{-1}) en la ZPCE y las partes altas del VCO.

Se nota que algunos máximos de viento diario se presentan en fechas en las que hubo influencia de masas de aire frío sobre Costa Rica (Figs. 8a, c, e).

Además, que el modelo es capaz de representar características de la variabilidad del viento diario en el transcurso del período de estudio, los cuales pueden estar asociados con aumentos o disminuciones en la intensidad de la CCBNC. Cabe resaltar que el aumento de resolución espacial evidencia un mayor acercamiento de los datos modelados a los observados, pues los valores simulados mejoran sustancialmente en el caso de la intensidad del viento. En cuanto a la dirección diaria del viento, las simulaciones presentan mayores dificultades para representarla apropiadamente (Figs. 8b, d, f).

En relación con lo anterior, se presenta la Tabla 6, cuyos datos muestran el coeficiente de correlación de Pearson entre las observaciones

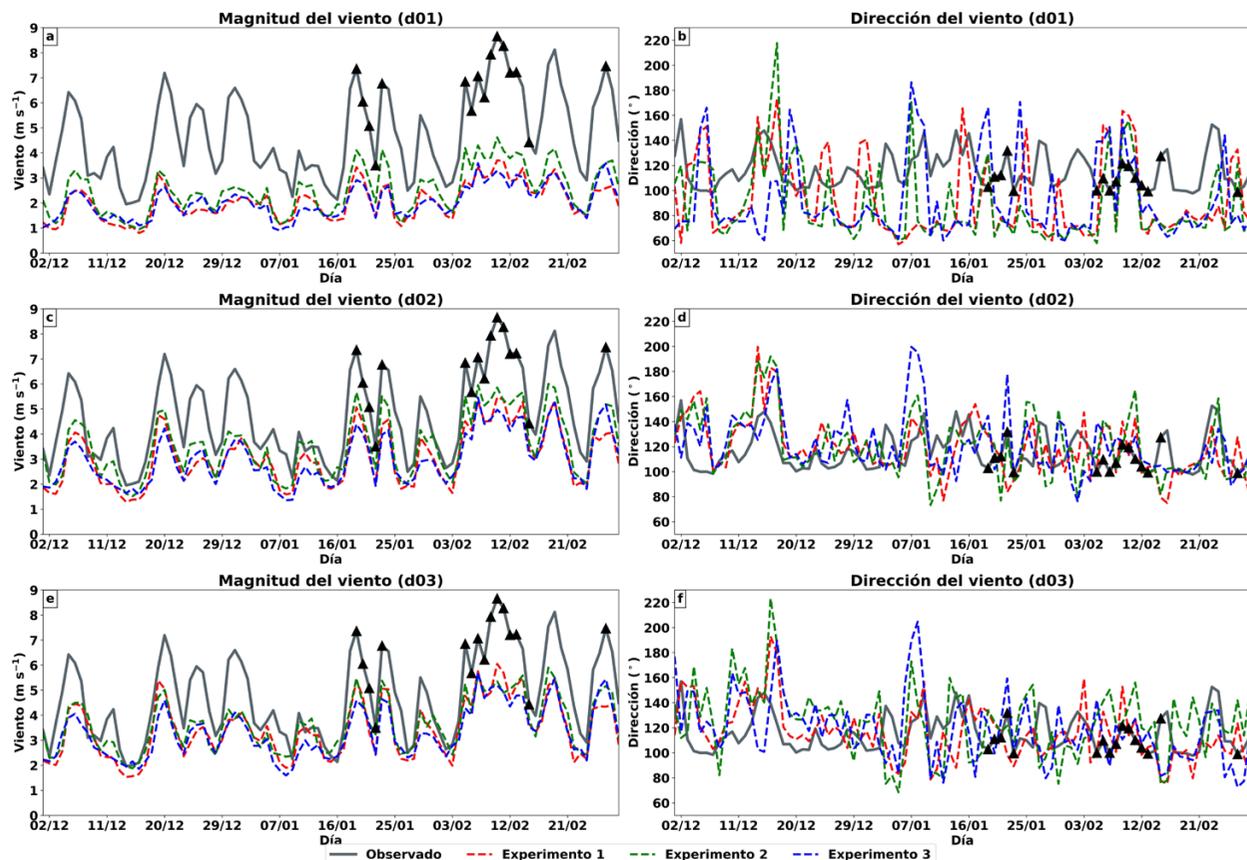


Figura 8. Datos observados (línea negra) de la magnitud (izquierda) y dirección (derecha) del viento diario a 10 m (m s^{-1}) sobre el VCO, comparados con los experimentos 1 (línea roja), 2 (línea verde) y 3 (línea azul) en el dominio (a)-(b) d01, (c)-(d) d02 y (e)-(f) d03. Se muestran con triángulos negros los días en que ocurrieron incursiones de masas invernales de aire frío.

Tabla 6. Coeficiente de correlación de Pearson entre las simulaciones y las observaciones para las series de tiempo de magnitud y dirección del viento diario en todos los dominios. Se muestran en números *itálicos* las correlaciones significativas al nivel de 95 %. En **negrita** aparecen las correlaciones más altas para cada dominio de simulación.

	Dominio	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Magnitud (m s ⁻¹)	1	<i>0.836</i>	<i>0.861</i>	0.880
	2	<i>0.899</i>	<i>0.907</i>	0.927
	3	<i>0.904</i>	<i>0.901</i>	0.926
Dirección (°)	1	-0.084	0.090	-0.150
	2	0.229	0.295	0.162
	3	0.218	-0.093	0.134

y las simulaciones, usando las series de tiempo presentadas en la figura 8. En dicha tabla, se han destacado en **negrita** las correlaciones más altas para cada dominio de simulación y en *itálicas* aquellas que son significativas al nivel de confianza de 95 %, tanto para la magnitud del viento diario como para la dirección.

Se puede notar que el experimento 3 del WRF, para todos los dominios, captura de mejor forma la variabilidad de la magnitud del viento durante el período de estudio y las correlaciones son significativas. Para la variable de dirección, en los dominios d01 y d02, la mejor captura se da con el experimento 2, y en el d03 con la simulación 1. Sin embargo, en este caso todas las correlaciones son bastante bajas, no significativas en su mayoría y demuestran las dificultades en el modelo regional para simular apropiadamente la evolución temporal de la dirección del viento, bajo las configuraciones establecidas en los experimentos.

4. CONCLUSIONES

Los experimentos con el WRF, forzados con ERA5, lograron capturar adecuadamente la curva del ciclo diurno medio del viento durante el período diciembre 2015-febrero 2016, en la mayoría de las estaciones del VCO. Sin embargo, el sesgo indica que éstos generalmente subestiman la intensidad del viento, con diferencias de hasta -3.6 m s⁻¹.

Este comportamiento se debe a las opciones físicas utilizadas en el modelo y a limitaciones en la representación de la compleja topografía en el área de estudio, a pesar de haber empleado un dominio con una alta resolución espacial.

Para cada estación, se obtuvo la desviación media (RMSE) de las magnitudes del viento simulado con respecto a las observaciones; siendo la menor dispersión de 1.4 m s⁻¹ y la mayor de 4.9 m s⁻¹; mientras que el STDE estuvo entre 1.1 m s⁻¹ y 3.4 m s⁻¹. Los valores más altos de estos dos estadísticos fueron encontrados en sitios elevados del área de estudio, lo que refleja una mayor incertidumbre en los resultados de las simulaciones del modelo WRF sobre estas regiones.

Existen en todas las estaciones, dispersiones en los datos simulados de la dirección del viento, que van de 39°, en el caso mínimo, hasta 195° en la mayor desviación. Además, que en la mayoría de las estaciones el sesgo es positivo, mientras que el STDE muestra valores muy altos, los cuales evidencian una baja capacidad de los experimentos para capturar esta variable. La mejor representación de la magnitud se dio en las estaciones 9 y 10 (grupo IV), mientras que en la dirección fue en el grupo fuera del VCO (estaciones 11 y 12).

La predominancia de vientos alisios fue capturada de forma correcta. Desde el punto de vista

de los estadísticos utilizados (sesgo, RMSE y STDE), se concluye que la mayor dificultad de representación, tanto en magnitud como en dirección, ocurrió principalmente en zonas con altas elevaciones y topografía compleja.

Para el dominio 3 (resolución espacial de 1 km), el experimento 1 es capaz de representar de forma más apropiada el comportamiento horario de la magnitud y dirección del viento durante el período de estudio. Los sistemas de gran escala y el forzamiento radiativo son capturados de mejor manera, mientras que el forzamiento mecánico, debido a barreras topográficas, no se representa correctamente.

La reducción dinámica de escala demostró ser un excelente método para simular aspectos climáticos del VCO durante la época analizada, pues la mejor representación de la variabilidad temporal (altas correlaciones significativas), así como de la intensidad del viento diario, se obtuvo con el dominio del modelo con mayor resolución espacial (dominio 3), que representa una rejilla de 1 km.

Para el período y área geográfica estudiados, se concluye que la mejor configuración, en términos generales y tomando en cuenta los resultados expuestos, es la propuesta por el experimento 1, conformado por la capa límite planetaria del modelo YSU, la capa superficial RMM5 y el modelo de superficie terrestre Noah.

5. AGRADECIMIENTOS

Al proyecto FEES-CONARE “Transporte de contaminantes atmosféricos en el Valle Central Occidental: identificación de sumideros de contaminación atmosférica y su impacto en materiales metálicos” (Componente UCR: VI-805-B8-650), así como al Colaboratorio Nacional de Computación Avanzada (CNCA) del Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT) por facilitar

el Clúster Kabré para la realización de las simulaciones numéricas con el modelo WRF. Al Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI) por el uso de las instalaciones y equipo de cómputo y al Instituto Meteorológico Nacional (IMN) por aportar los datos de las 15 estaciones meteorológicas usadas en este trabajo. Rivera también agradece a los proyectos de investigación UCR-VI-805-B8-604/B9-454/B9-609.

6. REFERENCIAS

- Amador, J. A. (2008). The Intra-Americas Sea low-level jet. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146, 153-188. doi:10.1196/annals.1446.012.
- Bretherton, C. S., Widmann, M., Dymnikov, V. P., Wallace, J. M. y Bladé, I. (1999). The effective number of spatial degrees of freedom of a time-varying field. *Journal of Climate*, 12(7), 1990-2009.
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M. y Silva Santos, C. (2012). A sensitivity study of the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy. *Environmental Modelling and Software*, 33, 23-34. doi: 10.1016/j.envsoft.2012.01.019.
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M. y Silva Santos, C. (2014). Sensitivity of the WRF model wind simulation and wind energy production estimates to planetary boundary layer parameterizations for onshore and offshore areas in the Iberian Peninsula. *Applied Energy*, 135, 234-246. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.08.082.
- Giorgi, F. (1990). Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *Journal of Climate*, 3, 941-963.
- Gómez, J. J., Raible, C. y Dierer, S. (2015). Sensitivity of the WRF model to PBL parameterizations and nesting techniques: evaluation of windstorms over

- complex terrain. *Geoscientific Model Development*, 8(10), 3349-3363. doi: 10.5194/gmd-8-3349-2015.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999-2049. doi: 10.1002/qj.3803.
- Instituto Costarricense de Electricidad (1980). *Análisis preliminar del viento en Costa Rica*. San José, Costa Rica: ICE.
- Instituto Meteorológico Nacional (2015). Boletín meteorológico. Diciembre 2015. San José, Costa Rica: IMN.
- Instituto Meteorológico Nacional (2016a). Boletín meteorológico. Enero 2016. San José, Costa Rica: IMN.
- Instituto Meteorológico Nacional (2016b). Boletín meteorológico. Febrero 2016. San José, Costa Rica: IMN.
- Jammalamadaka, S. R. y Sengupta, A. (2001). *Topics in circular statistics* (Vol. 5). Singapore: World Scientific.
- Magaña, V., Amador, J. A. y Medina, S. (1999). The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12, 1577-1588.
- Maldonado, T. (2012). Regional precipitation study in Central America using the WRF model (Tesis de maestría). Recuperado de <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/13768>.
- Muñoz, A. C., Fernández, W., Gutiérrez, J. A. y Zárate, E. (2002) Variación estacional del viento en Costa Rica y su relación con los regímenes de lluvia. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 9(1), 1-13.
- Pagowski, M. (2004). Some comments on PBL parameterizations in WRF. Trabajo presentado en el Joint 5th WRF/14th MM5 Users' Workshop, Boulder, CO. Resumen recuperado de https://www2.mmm.ucar.edu/mm5/workshop/ws04/Session1/Pagowski.Mariusz_web.pdf.
- Rivera, E. y Amador, J. A. (2009). Predicción estacional del clima en Centroamérica mediante la reducción de escala dinámica. Parte II: Aplicación del modelo MM5v3. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 16(1), 76-104.
- Sáenz, F. (2014). *El ciclo diurno de la precipitación en el Caribe de Costa Rica: Observaciones y simulaciones con un modelo dinámico regional* (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Shin, H.H. y Hong, S.-Y. (2011). Intercomparison of planetary boundary layer parameterizations in the WRF model for a single day from CASES-99. *Boundary-Layer Meteorology*, 139, 261-281. doi: 10.1007/s10546-010-9583-z.
- Siegert, S., Bellprat, O., Ménégoz, M., Stephenson, D. B. y Doblas-Reyes, F. J. (2017). Detecting improvements in forecast correlation skill: Statistical testing and power analysis. *Monthly Weather Review*, 145(2), 437-450. doi: 10.1175/MWR-D-16-0037.1.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., ... Huang, X.-Yu. (2019). *A description of the Advanced Research WRF model version 4* (Informe No. NCAR/TN-556+STR). Boulder, CO: NCAR.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). USA: Academic Press.
- Zárate, E. (1977). *Principales sistemas de vientos que afectan a Costa Rica y sus relaciones con la precipitación* (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Zárate, E. (1978). *Comportamiento del viento en Costa Rica*. San José, Costa Rica: IMN.
- Zárate, E. (1980). *El viento en San José*. San José, Costa Rica: IMN.



Source



Instituto Meteorológico Nacional

Sitio web:
www.imn.ac.cr

Teléfono: (506) 2222 5616

Apartado postal: 5583-1000
San José
Costa Rica

