

Artigo

Caso de Estudio en la Bahía de Jagua al Sur de Cuba Mediante un Acoplamiento WRF/CALMET

Anel Hernández-Garces¹, José Antonio González², Juan Casares², Leonor Turtos³,
Lourdes Alvarez⁴, Ulises Jauregui-Haza⁵

¹*Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba.*

²*Departamento de Ingeniería Química; Universidad de Santiago de Compostela, España.*

³*Cubaenergía, La Habana, Cuba.*

⁴*Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.*

⁵*Universidad de La Habana, Cuba.*

Recibido: 27 de Maio de 2015 – Aceito: 2 de Setembro de 2017

Resumen

Se evaluó el modelo meteorológico CALMET durante un periodo de temporada seca típica en un dominio costero, la bahía de Jagua al sur de Cuba, para el parámetro TERRAD y se aplicaron además, diversas resoluciones y cuatro conjuntos de datos de entrada CALMET diferentes. La evaluación se centró en términos de rendimiento del modelo en cuanto a viento y temperatura en superficie. Como datos de entrada, se combinaron los resultados del modelo de pronóstico WRF con medidas meteorológicas de diferentes estaciones. El modelo CALMET mejora sensiblemente los resultados de velocidad de viento en superficie del modelo WRF y con el aumento de la resolución se obtiene una ligera mejoría. Se obtuvo un valor elevado de TERRAD de 80 km como el mejor ajuste de este parámetro que coincide con las dimensiones del dominio. Los resultados estadísticos se calcularon sobre las estaciones que no se utilizaron como datos de entrada. Los estadísticos relativos de velocidad de viento fueron altos debido a los vientos débiles a lo largo del período de estudio. Sin embargo, los absolutos fueron mejores. También se observó una mejora significativa en la predicción de la velocidad de viento y de la temperatura a medida que se incluye la información de más estaciones meteorológicas como datos de entrada.

Palabras-clave: meteorología, CALMET, WRF, validación, modelos.

Case Study in Jagua Bay at South of Cuba Using a Coupling WRF/CALMET

Abstract

CALMET meteorological model was evaluated during a typical period of dry season in a coastal domain in the Jagua bay at the south of Cuba, for TERRAD parameter. Several resolutions and four different CALMET input datasets were used. The evaluation was focused in terms of model performance of wind and surface temperature issues. As input data, the WRF model results and meteorological measurements of different stations were combined. WRF model surface speed results has been significantly improved by CALMET model. A slightly improvement is obtained with resolution increasing. A high value of TERRAD of 80 km was obtained as the best fit for this parameter that matches with the domain size. The statistical results (both relative and absolute) were calculated on the stations that were not used as input data. Statistical relative values of wind speed were high, due to weak winds over the study period. However, the absolute ones were better. Significant improvement was also observed in wind speed and temperature for relative and absolute statistical values, when more stations as input data were provided.

Keywords: Caribbean meteorology, CALMET, WRF, model validation.

1. Introducción

La modelación de la calidad del aire juega un papel importante en el establecimiento de legislaciones para el control de las emisiones de contaminantes atmosféricos, determinando los valores máximos permitidos para los caudales y concentraciones de emisión. Es significativa, además, en la evaluación de estrategias de control de emisiones, en la selección de localizaciones de futuros focos emisores, con el fin de minimizar el impacto sobre el entorno y de garantizar que la inmisión permanezca por debajo de los umbrales legales recomendados (Hernández-Garcés *et al.*, 2015a). Para lograr resultados realistas de los modelos de dispersión se requiere información meteorológica precisa, tanto a nivel del suelo como en altura.

CALMET (Scire *et al.*, 2000) es un modelo meteorológico que incluye un módulo de diagnóstico de campos de viento, que realiza un análisis objetivo y parametrizado de flujos en pendiente, efectos cinemáticos del terreno y efectos de bloqueo del terreno mediante un procedimiento de minimización por divergencia; e incluye un módulo micrometeorológico de capa límite. Este modelo ha sido utilizado con fines regulatorios (Hernández-Garcés *et al.*, 2017).

CALMET tiene una opción que permite la asimilación de campos de viento generados por los modelos de pronóstico MM4 (Anthes *et al.*, 1987), MM5 (Grell *et al.*, 1994), CSUMM (Pielke, R., 1974) o WRF (Skamarock y Klemp, 2008). Esta opción permite que CALMET se ejecute con una mayor resolución que la usada en el modelo de pronóstico, además de contemplar la influencia de fenómenos locales sobre el viento, tales como la circulación de brisas marinas o la topografía compleja que no siempre pueden ser medidas en las estaciones de superficie.

WRF y CALMET se han acoplado en muchos estudios (Radonjic *et al.*, 2010; BSU, 2010; Whitford, 2009; Prueksakorn *et al.*, 2014; Hernández-Garcés *et al.*, 2014; Mardones *et al.*, 2015). Numerosos investigadores han aprovechado también las capacidades del modelo para investigar los flujos de viento en regiones costeras. Indumati *et al.* (2009) estudiaron el efecto de la presencia de un pequeño cuerpo de agua en la dispersión de contaminantes en una zona urbana. Mientras, Lonati *et al.* (2010) presentaron una evaluación del impacto en la calidad del aire local de las emisiones de buques en un puerto italiano de la costa del mar Jónico. En otro trabajo, Poplawski *et al.* (2011) reportaron los resultados de un estudio en la bahía James, donde investigaron los efectos de las emisiones de cruceros en la calidad del aire local. Además, Radonjic *et al.* (2011) demostraron el buen desempeño de CALMET en un entorno que incluía una interfaz tierra-agua.

Por otra parte, Ghannam y El-Fadel (2013) acoplaron MM5 con CALMET para una evaluación regulatoria de la calidad del aire en una zona urbana costera. Igualmente, Prueksakorn *et al.* (2014) determinaron la influencia de las variaciones estacionales en la dispersión de compuestos

olorosos procedentes de un complejo industrial utilizando un acoplamiento WRF/CALMET/CALPUFF. Por su parte, Mardones y Jiménez (2015) determinaron la relación entre las emisiones de $PM_{2.5}$ y las inmisiones en áreas pobladas con un acoplamiento similar. Recientemente, Hernández-Garcés *et al.* (2015b) validaron la dispersión local de SO_2 de una gran chimenea de una central térmica considerando dos diferentes configuraciones de chimenea así como dos resultados distintos del modelo CALMET.

Con el objetivo de encontrar la mejor configuración del modelo de diagnóstico meteorológico CALMET, para alimentar el modelo de dispersión CALPUFF con fines regulatorios en el entorno elegido, en este trabajo se acopla CALMET con el modelo WRF sobre un dominio de $80 \times 80 km^2$, en una bahía caribeña, la de Jagua al sur de Cuba, durante 14 días típicos de sequía. Se calibra el modelo para el parámetro TERRAD, se evalúa la utilidad del parámetro IKINE y se comparan, además, diversas resoluciones y diferentes configuraciones del modelo con las medidas de las estaciones meteorológicas disponibles.

2. Material y Métodos

2.1. Área de estudio y periodos de evaluación

La bahía de Jagua (Fig. 1) es una bahía semicerrada y se encuentra en la parte centro-sur de Cuba, con una superficie de $90 km^2$. Allí, se espera la expansión de un complejo petroquímico, en las cercanías de la ciudad de Cienfuegos y de la región turística de Rancho Luna. Las principales fuentes industriales de contaminación atmosférica son una refinería de petróleo y una termoeléctrica.

Se pone entonces a prueba el modelo CALMET, con el fin de comprobar la capacidad del mismo para proporcionar información meteorológica precisa para el modelo de dispersión CALPUFF con fines regulatorios, en diferentes simulaciones meteorológicas de alta resolución a lo largo de 14 días. Con el fin de obtener los mayores valores de inmisión del modelo de dispersión CALPUFF se elige preferentemente un periodo seco para minimizar los procesos de autodepuración de la atmósfera. En ese sentido, el periodo seleccionado cubre desde el 2 de enero de 2010 -05 UTC al 16 de enero de 2010 -05 UTC, temporada seca típica, con vientos débiles ($2,6 m s^{-1}$) y temperaturas moderadas ($17,0 ^\circ C$).

2.2. Modelación meteorológica

El modelo de diagnóstico CALMET se anidó a la simulación del modelo WRF sobre un dominio $80 \times 80 km^2$ alrededor de la bahía de Jagua centrado en la refinería (Fig. 2).

El modelo de mesoescala meteorológica WRF ofrece múltiples opciones físicas y dinámicas que se pueden combinar de varias maneras. Las opciones típicas suelen oscilar desde las simples y eficientes a los esquemas sofisticados y más costosos computacionalmente, y desde los nuevos es-

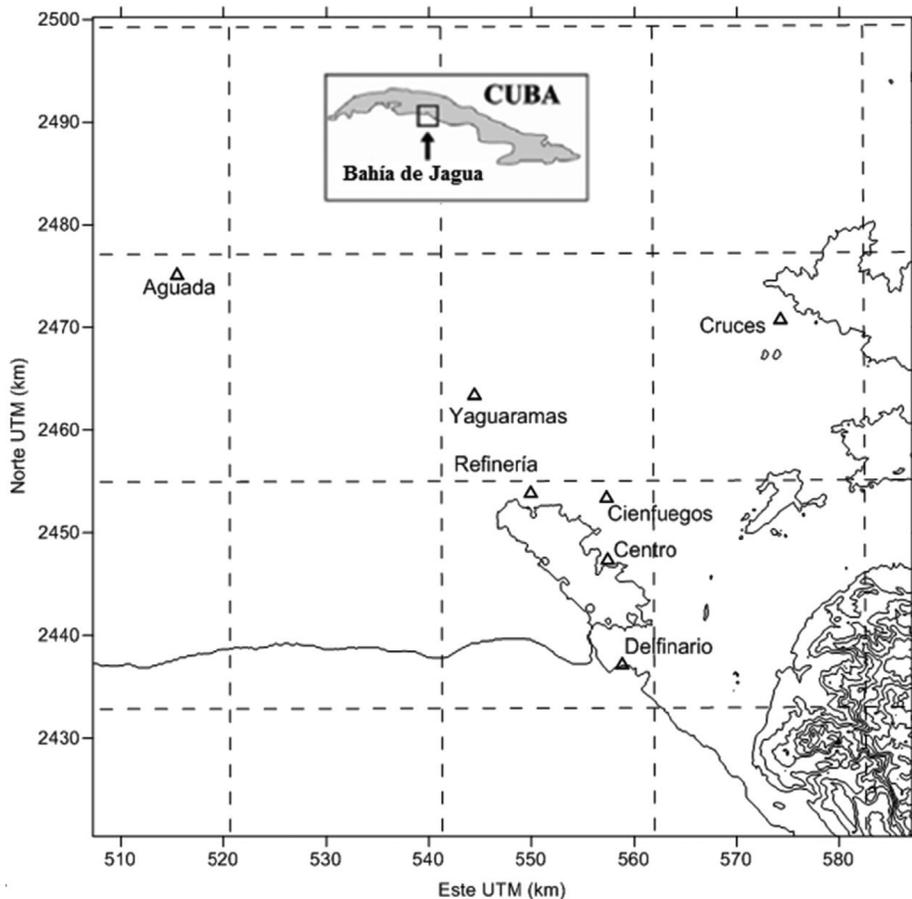


Figura 1 - Área de la zona de estudio: Bahía de Jagua al sur de Cuba, mar Caribe.

quemadas a aquellos bien probados como los de los modelos operativos actuales.

En este trabajo se eligieron las opciones que resultarían más adecuadas para el objetivo de suministrar datos meteorológicos de entrada para la simulación de la calidad del aire, para lo que se consideró la singularidad del entorno caribeño de estudio. Así, se eligieron opciones equivalentes previamente probadas sobre la isla de Cuba con el modelo MM5 (Mitrani *et al.*, 2003; Turtos, *et al.*, 2013). La configuración finalmente aplicada es la siguiente:

- a) Microfísica: WSM5, esquema WRF Single-Moment 5-class. Es una versión más sofisticada del esquema, que permite considerar procesos multifase y agua sobreenfriada.
- b) Parametrización de nube: Esquema de conjuntos Grell-Devenyi para las dos mallas más externas, de menor resolución. Sobre el dominio más interior no se aplicó ninguna parametrización de nubes, al ser las celdas de la malla inferiores a 4 km.
- c) Radiación de onda corta: Sobre el dominio más externo se seleccionó el modelo RRTMG, un esquema de radiación con el método de superposición aleatoria de nubes resuelta mediante la aproximación Montecarlo para la integración de la trayectoria de la radiación a

través de la columna atmosférica (MCICA). Sobre los otros dos dominios se aplicó el esquema de Dudhia, consistente en una integración simple hacia abajo, que resulta eficiente en el cálculo de la reducción de la radiación descendente por la absorción con cielo despejado, nubes y dispersión.

- d) Radiación de onda larga: Nuevamente, se aplicó el modelo RRTMG sobre el dominio externo, ahora para onda larga. Sobre los otros dos dominios internos se seleccionó el modelo RRTM (Rapid Radiative Transfer Model), que resuelve de manera eficiente (mediante tablas look-up) la alteración de la radiación de onda larga debido a los gases traza y partículas atmosféricas considerando distintas bandas de frecuencia.
- e) Capa superficial: Analogía MM5, basado en Monin-Obukhov con subcapa viscosa de Carlson-Boland y funciones de analogía estándar incorporadas como tablas look-up.
- f) Superficie terrestre: Difusión térmica en 5 capas, considerando la temperatura del suelo.
- g) Capa límite atmosférica: Esquema Yonsei University (YSU). Esquema no local con tratamiento explícito del estrato de intrusión y perfil parabólico de K para la capa de mezcla inestable.

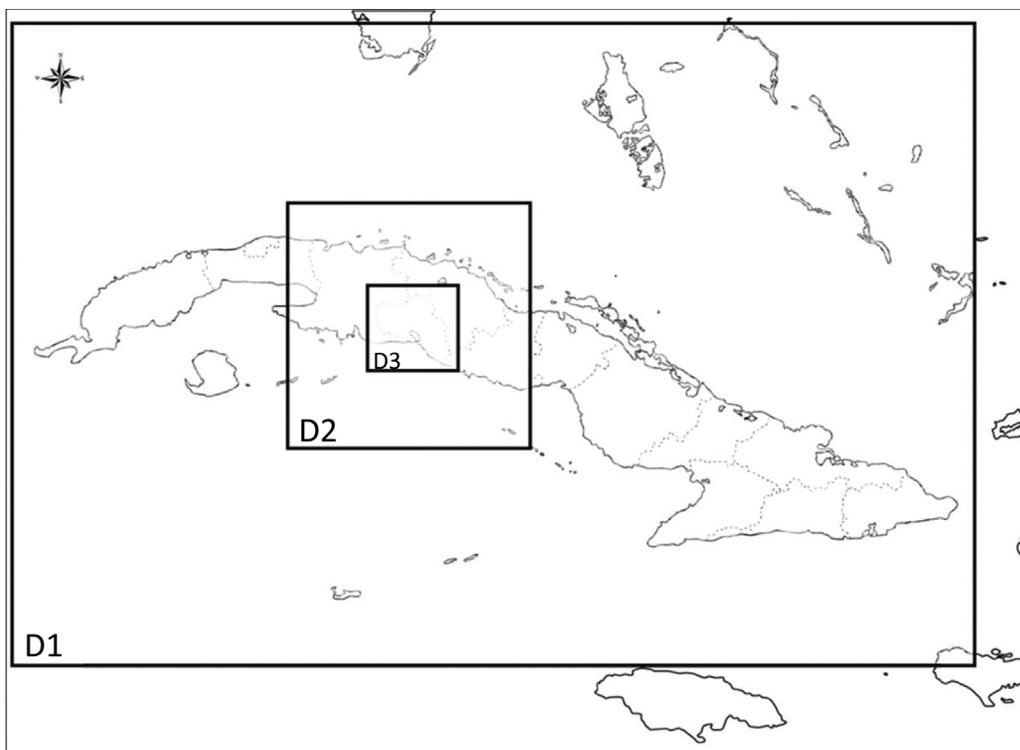


Figura 2 - Dominios anidados aplicados en la simulación WRF, para proporcionar la entrada meteorológica al modelo CALMET del dominio interno de WRF (resolución: D1: $27 \times 27 \text{ km}^2$; D2: $9 \times 9 \text{ km}^2$; D3: $3 \times 3 \text{ km}^2$).

Se aplicó una resolución de 10 capas verticales de altura sobre el suelo de: 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1200, 2000, 3000 y 4000 m a todas las simulaciones de CALMET (Lakes, 2011). Se aplicó, además, el módulo de diagnóstico de viento; para el resto de las opciones se aplicaron las predeterminadas (EPA, 1998).

Se evaluó inicialmente la respuesta del modelo a la disminución de la resolución horizontal como se muestra en la Tabla 1. Las cuatro configuraciones CALMET fueron alimentadas solo con salidas WRF.

A continuación se evaluó la utilidad del parámetro IKINE (efectos cinemáticos del terreno) que viene anulado por defecto en el modelo. Se seleccionó entonces la mejor de las configuraciones anteriores y se habilitó la opción de tener en cuenta estos efectos.

El parámetro TERRAD determina el radio de influencia de los efectos del terreno. Independientemente de que el

dominio es mayoritariamente llano, se decidió con posterioridad evaluar la respuesta del modelo a la variación de este parámetro por la presencia de elevaciones importantes en el vértice sudeste (Fig. 1). Con este fin se aplicó la resolución horizontal de mejores resultados, $0.2 \times 0.2 \text{ km}^2$ como se muestra en la Tabla 2, las siete configuraciones CALMET fueron alimentadas solo con salidas WRF.

Se eligieron inicialmente valores de TERRAD iguales a 4 y 10 veces la resolución horizontal (Lakes, 2011). Con posterioridad este valor se duplicó consecutivamente hasta alcanzar las dimensiones del dominio siguiendo el procedimiento de Hernández-Garcés *et al.* (2016).

Finalmente, con la resolución horizontal de mejores resultados, $0.2 \times 0.2 \text{ km}^2$, y TERRAD 80 km, se comprobaron diferentes conjuntos de datos de entrada y estaciones meteorológicas de superficies, seleccionados de un total de siete sitios en el dominio (Tabla 3).

En los tres análisis se compararon los valores horarios de la velocidad de viento en superficie de CALMET en las estaciones de verificación con las mediciones correspondientes, utilizando el error cuadrático medio (RMSE), según (Jiménez *et al.*, 2006). Como en los tres casos, solo se pretendía seleccionar la mejor configuración, se consideró que no era necesario realizar un análisis estadístico más profundo. Cada una de las comparaciones estadísticas reportadas en los tres primeros análisis se realiza para 2345 pares de elementos correspondientes a la cantidad total de

Tabla 1 - Validación de las simulaciones CALMET con diferentes resolución horizontal.

Simulación	Resolución horizontal (km)	Configuración	Estaciones de comprobación
Met_1km	1		
Met_0.5km	0.5	Salida de WRF	7 estaciones
Met_0.2km	0.2		(todas)
Met_0.1km	0.1		

Tabla 2 - Validación de las simulaciones CALMET según la variación del parámetro TERRAD.

Simulación	Resolución Horizontal (km)	TERRAD (km)	Configuración	Estaciones de comprobación
Terrad_0.8		0.8		
Terrad_2		2		
Terrad_5		5		
Terrad_10	0.2	10	Salida de WRF	7 estaciones (todas)
Terrad_20		20		
Terrad_40		40		
Terrad_80		80		

Tabla 3 - Validación de las simulaciones CALMET con diferentes entradas meteorológicas y de datos de verificación, proporcionados por siete estaciones meteorológicas de superficie con resolución horizontal 0.2 km y TERRAD 80 km.

Simulación	Configuración	Estaciones de entrada	Estaciones de comprobación
Met_1 = a Terrad_80	Salida de WRF	-	7 estaciones (todas)
Met_2	Salida de WRF y 2 estaciones meteorológicas de superficie	Abreus, Aguada	Centro, Delfinario, Refinería, Cruces, Cienfuegos
Met_3	Salida de WRF y 4 estaciones de superficie	Abreus, Aguada, Delfinario, Cruces	Centro, Refinería, Cienfuegos
Met_4	Salida de WRF y 5 estaciones de superficie	Abreus, Aguada, Delfinario, Cruces, Centro	Cienfuegos, Refinería

observaciones horarias del periodo seleccionado para las siete estaciones. En el caso del último análisis, con la lógica disminución de estaciones de comprobación consideradas, Met_2, Met_3 y Met_4 se reportan para 1675, 1005 y 670 pares de elementos respectivamente.

3. Resultados y Discusión

En relación con la validación frente a observaciones en superficie, la Tabla 4 muestra el RMSE de los resultados de velocidad de viento de distintas simulaciones WRF y CALMET frente a medidas en superficie. Las simulaciones son validadas frente a observaciones de las 7 estaciones en superficie disponibles.

Se puede apreciar que el modelo CALMET mejora sensiblemente los resultados de velocidad de viento en superficie del modelo WRF. Con el aumento de la resolución se obtiene una ligera mejoría alcanzándose el mínimo en la resolución 0.2 km (Tabla 4). Aunque pueda parecer insignificante esta diferencia, como se pretende

seleccionar la mejor configuración se decide continuar el análisis con este valor de resolución, 0.2 km.

La activación del parámetro IKINE reportó un valor de RMSE de 2.998 ms⁻¹ para la simulación CALMET correspondiente. Este resultado empeoró los valores de RMSE obtenidos en el análisis anterior por lo que se decidió obviar este parámetro en los análisis sucesivos.

Con respecto al ajuste del parámetro TERRAD, la Tabla 5 muestra el RMSE de los resultados de velocidad de viento de distintas simulaciones CALMET frente a medidas de las 7 estaciones en superficie disponibles.

En un terreno mayormente plano, como el del estudio, y con las elevaciones agrupadas hacia un vértice del dominio se esperaba un valor elevado de TERRAD. En este caso coincide con las dimensiones del dominio. En esta evaluación no fue posible obtener un mínimo dentro del intervalo evaluado (Tabla 5). A pesar de esto, carece de sentido continuar incrementando el parámetro TERRAD a valores superiores a las dimensiones del dominio.

Tabla 4 - Resultado de la validación de las simulaciones CALMET con diferentes resoluciones. Se incluye el resultado del modelo WRF utilizado como dato de entrada.

Simulación	RMSE (ms ⁻¹)
WRF	4.350
Met_1km	2.884
Met_0.5km	2.883
Met_0.2km	2.882
Met_0.1km	2.884

Tabla 5 - Resultado de la validación de las simulaciones CALMET con el ajuste del parámetro TERRAD.

Simulación	RMSE (ms ⁻¹)
Terrad_0.8km	2.882
Terrad_2km	2.882
Terrad_5km	2.882
Terrad_10km	2.882
Terrad_20km	2.822
Terrad_40km	2.638
Terrad_80km	2.587

En el tercer análisis, los campos de viento de CALMET en superficie obtenidos usando sólo los resultados de WRF como entrada, son representativos de los flujos observados en este dominio complejo costero durante los períodos secos (Barcia *et al.*, 2009). Como ejemplo, la Fig. 3 muestra la magnitud y dirección de viento sobre el dominio de simulación a las 10 Hora Local, con una débil brisa de tierra adentro. Se observan además, vientos fuertes sobre el agua y vientos hacia tierra más variables. Como el dominio de estudio es bastante llano, las diferencias se deben principalmente a la influencia costera.

Además, la Fig. 3. muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas proporcionadas, ya sea de entrada o de comprobación, para cada simulación (Tabla 3). Los valores horarios de la velocidad de viento en superficie y de tempe-

ratura de CALMET en las estaciones de verificación se compararon con las mediciones correspondientes, utilizando diferentes estadísticos absolutos: la desviación (bias) media (MB), el error absoluto medio (MAGE), y el RMSE; y relativos: la desviación (bias) media normalizada (MNBE), el bias fraccional medio (MFB), el error absoluto medio normalizado (MNGE), el error medio normalizado (NME) y la desviación (bias) media normalizada (NMB), según Jiménez *et al.* (2006).

Los resultados para los estadísticos relativos de la velocidad de viento (Tabla 6) alcanzan valores altos, debido a que la velocidad media del viento es generalmente baja, con una mejora significativa al incrementar el número de estaciones en el conjunto de datos de entrada. Según los estadísticos absolutos, las diferencias no son tan impor-

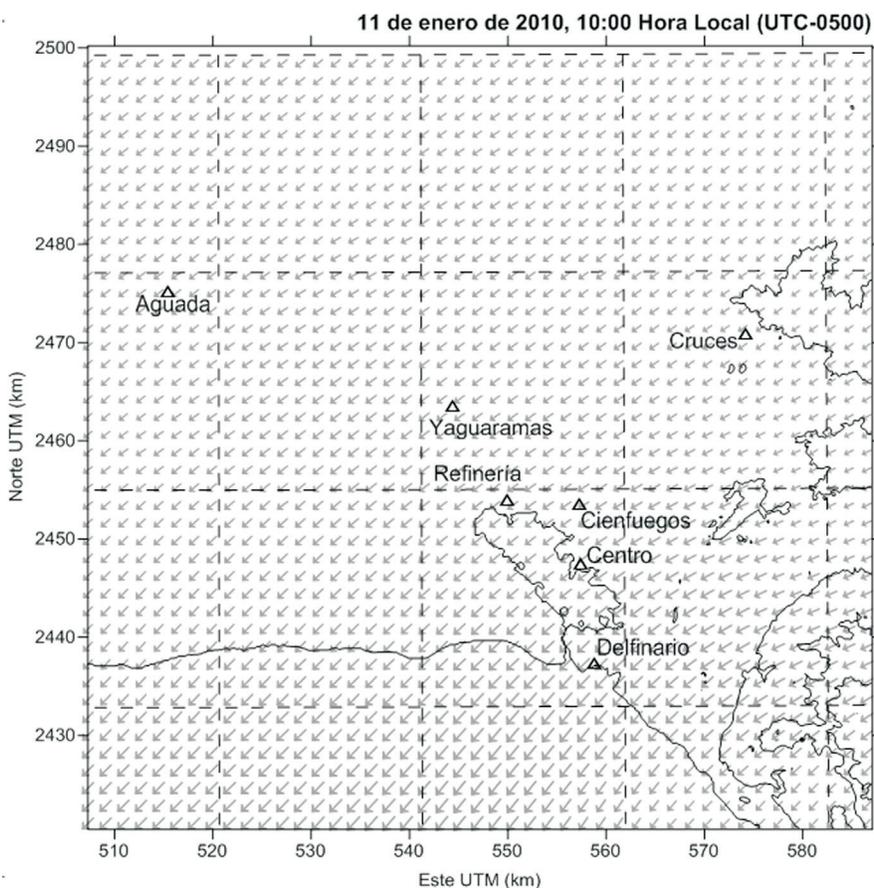


Figura 3 - Campo de viento en superficie de la simulación de CALMET (Met_1, utilizando sólo los resultados WRF) el 11 de enero de 2010 a las 10 Hora Local sobre el dominio de estudio, con la topografía y la línea costera, y la ubicación de las siete estaciones meteorológicas de superficie aplicadas (Δ).

Tabla 6 - Estadísticos para la velocidad de viento horaria (en m s^{-1}) resultados de las simulaciones.

	MB	MNBE(%)	MFB(%)	MAGE	MNGE(%)	NME(%)	NMB(%)	RMSE
Met_1	1.508	2580.290	60.297	2.150	2595.949	99.567	69.806	2.587
Met_2	0.816	778.950	36.637	1.656	801.621	71.728	35.329	2.088
Met_3	-0.025	446.831	9.325	1.526	489.836	63.289	-1.043	1.943
Met_4	-0.629	8.281	-21.449	1.371	62.695	45.771	-21.003	1.781

tantes debido al ajuste previo de la resolución y el parámetro TERRAD, aunque también se observa una mejora utilizando más estaciones de entrada.

Como la temperatura en superficie tiene una dependencia más elevada del conjunto de datos de entrada que la velocidad de viento, se espera una mejoría continua utilizando más estaciones de entrada. Esto se debe a que los resultados de CALMET para viento no sólo se basan en los datos de entrada (WRF y medidas), sino también en las limitaciones físicas. Sin embargo, los resultados de temperatura se basan fundamentalmente en los datos de entrada

de temperatura, que CALMET solo interpola. Por lo tanto, los mejores resultados se obtuvieron utilizando 5 estaciones de entrada (Met_4), como obviamente se esperaba (Tabla 7).

A pesar de que los estadísticos se calculan en estaciones que no se utilizan como datos de entrada, la distribución de temperatura en este dominio es bastante homogénea. Como ejemplo, la Fig. 4 muestra las series temporales de temperatura, desde el 7 al 10 de enero de 2010, tanto simuladas y medidas, en dos sitios de validación: Cienfuegos y Refinería. La simulación Met_1 (sólo WRF)

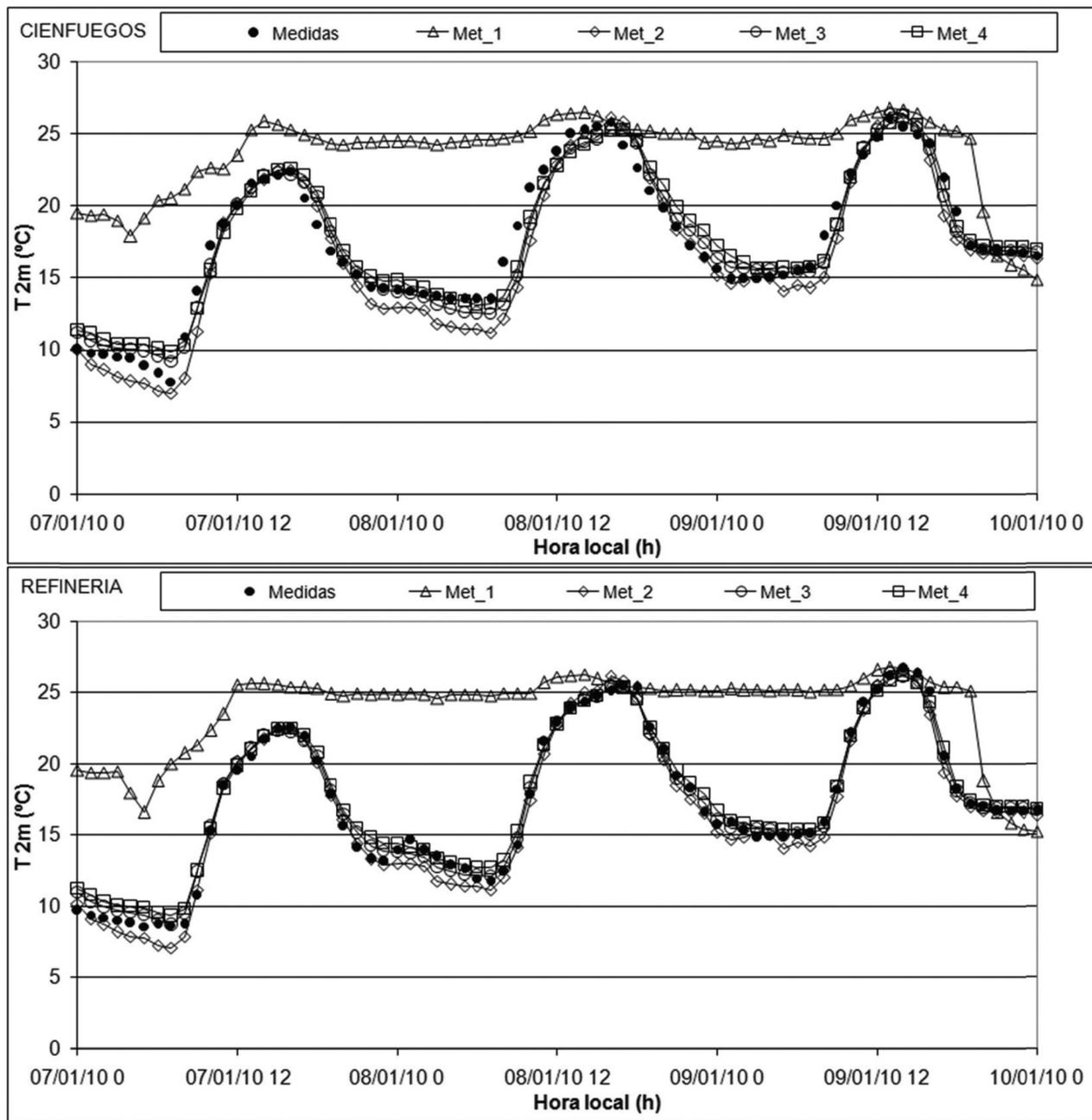


Figura 4 - Serie temporal de temperaturas en superficie resultados de las simulaciones y observaciones en dos estaciones seleccionadas para la validación del modelo: Cienfuegos y Refinería.

Tabla 7 - Estadísticos para temperatura horaria en superficie (°C) resultados de las simulaciones.

	MB	MNBE(%)	MFB(%)	MAGE	MNGE(%)	NME(%)	NMB(%)	RMSE
Met_1	5.111	35.839	27.340	5.409	37.398	31.855	30.103	6.409
Met_2	-0.811	-5.288	-5.781	1.045	6.599	6.076	-4.711	1.427
Met_3	0.099	1.060	0.900	0.593	4.005	3.490	0.586	0.771
Met_4	0.023	0.387	0.308	0.408	2.751	2.375	0.133	0.537

sobrestima claramente las temperaturas nocturnas; mientras que cuando se agregan las medidas de otras estaciones (Met_2, Met_3 y Met_4) se reducen las temperaturas y mejoran los resultados de CALMET.

4. Conclusiones

El modelo CALMET fue probado en una región costera del Caribe, la Bahía de Jagua al sur de Cuba, acoplado a una simulación de WRF, con el fin de comprobar su capacidad para representar los patrones de viento y de temperatura a lo largo de un período de estación seca típica y para encontrar la mejor configuración del modelo que alimente el modelo de dispersión CALPUFF con fines regulatorios en el entorno elegido. Se evaluó la utilidad del parámetro IKINE, se calibró el modelo para el parámetro TERRAD y se aplicaron además, diversas resoluciones y diferentes conjuntos de medidas en superficie de forma conjunta con los resultados de WRF como datos de entrada a CALMET. Los campos de viento de CALMET en superficie obtenidos son representativos de los flujos observados en este dominio complejo costero durante los períodos secos.

El modelo CALMET mejora sensiblemente los resultados de velocidad de viento en superficie del modelo WRF y con el aumento de la resolución se obtiene una ligera mejoría. La activación del parámetro IKINE empeora los valores de RMSE. Se obtuvo además, un valor elevado de TERRAD de 80 km como el mejor ajuste de este parámetro que coincide con las dimensiones del dominio. También se observa una mejora utilizando más estaciones de superficie como datos de entrada.

En comparación con las diferentes medidas en superficie disponibles, los resultados para viento de CALMET, alimentado con sólo resultados de WRF, proporcionan buenos valores para los estadísticos absolutos, pero los relativos son demasiado altos. Los vientos débiles típicos durante este período de temporada seca no son favorables para lograr mejores resultados relativos.

Además, los estadísticos de temperatura son buenos, a pesar de que las temperaturas nocturnas suelen ser sobrestimadas por la simulación alimentada solo con el modelo WRF. A medida que más medidas de superficie se aplicaron como entrada a CALMET, se obtuvieron mejores valores, tanto para viento como para temperatura en superficie.

Teniendo en cuenta las limitadas medidas disponibles en este entorno, un acoplamiento WRF-CALMET puede ser una buena solución si sólo se requiere la estimación de viento; si se necesitan valores de temperatura en superficie más exactos, se deben añadir medidas a los resultados del WRF como entrada en CALMET.

Agradecimientos

A la beca USC-Banco de Santander para los profesores universitarios latinoamericanos por financiar las estancias de investigación de Anel Hernández-Garces en la Universidad de Santiago de Compostela.

Referencias

- ANTHES, R.A.; HSIE, E.Y.; KUO, Y.H.: Description of the Penn State/NCAR mesoscale model version 4 (MM4). **Boulder, CO.: NCAR.** p. 66. 1987.
- BARCIA, S.; ORBE, G.; REGUEIRA, V.; SÁNCHEZ, R.; NÚÑEZ, E.; RODRÍGUEZ, C.; HERNÁNDEZ, A.L.; ANGULO, R.; CEBALLO, R.; MILLÁN, J.: Guía Climática de la Provincia Cienfuegos. **Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos, INSMET, Cienfuegos, Cuba.** 58p. 2009.
- BOISE STATE UNIVERSITY (BSU): Forecasting for Wind Energy Grid Integration. **Final Report.** 2010.
- EPA: Interagency Workgroup on Air Quality Modeling (IWAQM) Phase 2 **Summary Report and Recommendations for Modeling Long Range Transport Impacts.** 1998.
- FOX, T.: Memorandum: **Clarification on EPA-FLM Recommended Settings for CALMET.** August, v. 31, p. 2009. 2009.
- GHANNAM, K.; EL-FADEL, M: Emissions characterization and regulatory compliance at an industrial complex: an integrated MM5/CALPUFF approach. **Atmospheric Environment,** v. 69, p. 156-169. 2013.
- GRELL, G.A.; DUDHIA, J.; STAUFFER, D.R.: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). 1994.
- HERNANDEZ, A.; SAAVEDRA, S.; RODRIGUEZ, A.; SOUTO, J.A.; CASARES, J.J.: Coupling WRF and CALMET models: Validation during primary pollutants glc episodes in an Atlantic coastal region, **Air Pollution Modeling and its Application XXII,** Steyn D.G. *et al.* (Eds.), Springer, Dordrecht, The Netherlands, p. 681-684. 2014.
- HERNÁNDEZ-GARCES, A.; JÁUREGUI-HAZA, U.; SOUTO, J.; CASARES, J.; SAAVEDRA, S.; GUZMÁN, F.; TORRES, A.: Estado actual de los modelos de dispersión atmosférica y sus aplicaciones. **UCE Ciencia. Revista de postgrado,** v. 3, n. 2, p. 1-17. 2015a.

- HERNÁNDEZ-GARCÉS, A.; SOUTO, J.A.; RODRÍGUEZ, A.; SAAVEDRA, S.; CASARES, J.J.: Validación de simulaciones de los modelos CALMET/CALPUFF en el entorno de una gran chimenea de central térmica. **Revista Física de la Tierra**, v. 27, n. 15, p. 35-55. 2015b.
- HERNANDEZ, A.; GONZALEZ, J.A.; CASARES, J.J.: Effect of the terrain features on the accuracy of CALMET. A complex terrain case study. **Proceedings of the 17th International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modeling for Regulatory Purposes**, Budapest, Hungary, p. 81-85. 2016.
- HERNÁNDEZ-GARCÉS, A.; JÁUREGUI-HAZA, U.; GONZÁLEZ, J.A.; CASARES, J.J.; ÁLVAREZ, L.: Aplicaciones del modelo de diagnóstico meteorológico CALMET. **Revista Cubana de Meteorología**, vol. 23, n. 1, p. 122-140. 2017.
- HONG, S.-Y.; LIM, J.-O.J.: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 42, n. 2, p. 129-151. 2006.
- INDUMATI, S.; OZA, R.B.; MAYYA, Y.S.; PURANIK, V.D.; KUSHWAHA, H.S.: Dispersion of pollutants over land-water-land interface: Study using CALPUFF model. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 2, p. 473-478. 2009.
- JIMÉNEZ, P.; JORBA, O.; PARRA, R.; BALDASANO, J.M.: Evaluation of MM5-EMICAT2000-CMAQ performance and sensitivity in complex terrain: high-resolution application to the northeastern Iberian Peninsula. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 26, p. 5056-5072. 2006.
- LAKES ENVIRONMENTAL: CALPUFF Air Dispersion Modeling Workshop, **Course Slides**. Barcelona - Oct 19-21, 2011.
- LONATI, G.; CERNUSCHI, S.; SIDI, S.: Air quality impact assessment of at-berth ship emissions: Case-study for the project of a new freight port. **Science of the Total Environment**, v. 409, n. 1, p. 192-200. 2010.
- MARDONES, C.; JIMENEZ, J.: Alternatives for reducing fine particulate matter from industrial activities in Concepción metropolitan area, Chile. **Energy & Environment**, v. 26, n. 3, p. 445-456, 2015.
- MITRANI, I.; ALVAREZ, L.; BORRAJERO, I.: Aplicación optimizada del MM5V3 sobre el territorio Cubano mediante el uso de computadora personal. **Revista Cubana de Meteorología**, vol. 10, no 1, p. 84-94. 2003.
- PIELKE, R.: A three-dimensional numerical model of the sea breeze over South Florida. **Monthly Weather Review**, v. 102, 115-139. 1974.
- POPLAWSKI, K.; SETTON, E.; MCEWEN, B.; HREBENYK, D.; GRAHAM, M.; KELLER, P.: Impact of cruise ship emissions in Victoria, BC, Canada. **Atmospheric Environment**, v. 45, n. 4, p. 824-833. 2011.
- PRUEKSAKORN, K.; TAE-HYEUNG, K.; VONGMAHA-DLEK, C.: Applications of WRF/CALPUFF modeling system and multi-monitoring methods to investigate the effect of seasonal variations on odor dispersion: a case study of Changwon City, South Korea. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 7, n. 1, p. 13-27, 2014.
- RADONJIC, Z.; TELENTA, B.; CHAMBERS, D.; JANJIC, Z.: WRF-NMM Mesoscale Weather Forecast Model and CALMET Meteorological Preprocessor Wind Simulations over the Mountaneous Region', **EGU General Assembly Conference Abstracts**, 12, EGU2010, 2941. 2010.
- RADONJIC, Z.; CHAMBERS, D.; TELENTA, B.; JANJIC, Z.: Coupled NMM-CALMET meteorology development for the CALPUFF air dispersion modelling in complex terrain and shoreline settings', **Geophysical Research Abstracts**, 13, EGU2011, 3729. 2011.
- SCIRE, J.S.; ROBE, F.R.; FERNAU, M.E.; YAMARTINO, R.J.: A user's guide for the CALMET Meteorological Model. **Earth Tech, USA**, v. 37. 2000.
- SKAMAROCK, W.C.; KLEMP, J.B.: A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. **Journal of Computational Physics**, v. 227, n. 7, p. 3465-3485. 2008.
- TURTOS, L.; CAPOTE G. FONSECA, Y.; ALVAREZ, L.; SANCHEZ, M.; BEZANILLA, A.; BORRAJERO, I.; MENESES, E. PIRE, S.: Assessment of the weather research and forecasting model implementation in Cuba addressed to diagnostic air quality modeling. **Atmospheric Pollution Research**, v. 4, n. 1, p. 64-74. 2013.
- WHITFORD, J.: 'Durham-York Air Quality Assessment. Appendix D. CALPUFF Methodology', **Technical Study Report**, Project No. 1009497. 2009.