

ESTIMACIÓN DEL RECURSO EOLICO SOBRE CUBA: MODELO WA^SP vs MODELO WEST

Alfredo Roque Rodríguez, Yoandy Alonso Díaz

Instituto de Meteorología; Loma de Casablanca; La Habana, Cuba, Telf.: 7-868-6592
alfredo.roque@insmet.cu y yoandy.alonso@insmet.cu

Resumen

Estimar el recurso eólico de un sitio o región determinado con fines de generación de electricidad, resulta esencial para el posterior emplazamiento de un aerogenerador o parque eólico. Diversas técnicas son empleadas para ello acopladas en su inmensa mayoría en modelos físicos-matemáticos que permiten obtener una representación del potencial eólico con elevada confiabilidad. El recurso eólico de Cuba ha sido evaluado en diversas ocasiones por especialistas cubanos utilizando dichas técnicas, siendo las más notables las obtenidas mediante el empleo del modelo de microescala Wind Atlas and Application Program (WA^SP) y el modelo Wind Energy Simulation ToolKit (WEST), este último no empleado en su totalidad para Cuba y para lo que fue necesario la aplicación de un método objetivo para disminuir los errores en la estimación. En este trabajo se explican las bases conceptuales de ambos modelos y los resultados obtenidos en su aplicación, especialmente en la obtención de la Densidad de Potencia Media del Viento a 50m de altura sobre la superficie.

Palabras clave: modelo WA^SP, modelo WEST, energía eólica

Abstract

Estimating the wind resource of a given site or region for the purpose of generating electricity is essential for the subsequent location of a wind turbine or wind farm. Various techniques are used for this, mostly coupled with physical-mathematical models that allow to obtain a representation of wind potential with high reliability. The Cuban wind resource has been evaluated on several occasions by Cuban specialists using these techniques, the most notable being those obtained through the use of the Wind Atlas and Application Program (WASP) microscale model and the Wind Energy Simulation ToolKit (WEST) model, the latter not fully used for Cuba and for which it was necessary to apply an objective method to reduce errors in the estimate. This paper explains the conceptual bases of both models and the results obtained in their application, especially in obtaining the Average Wind Power Density at 50m above the surface.

Key words: WA^SP model, WEST model, wind energy

Introducción

La energía eólica ha mantenido su nivel de crecimiento acelerado de las últimas décadas. Según el último reporte emitido por el Consejo Mundial de Energía Eólica (GWEC, por sus siglas en inglés) en abril del 2019, la capacidad eólica mundial creció en el 2018 hasta los 51,3 GW (46.8 GW sobre tierra (onshore) y 4.3 sobre el mar (offshore), siendo por tanto, la capacidad total acumulada de 591 GW (Fig. 1 y 2).

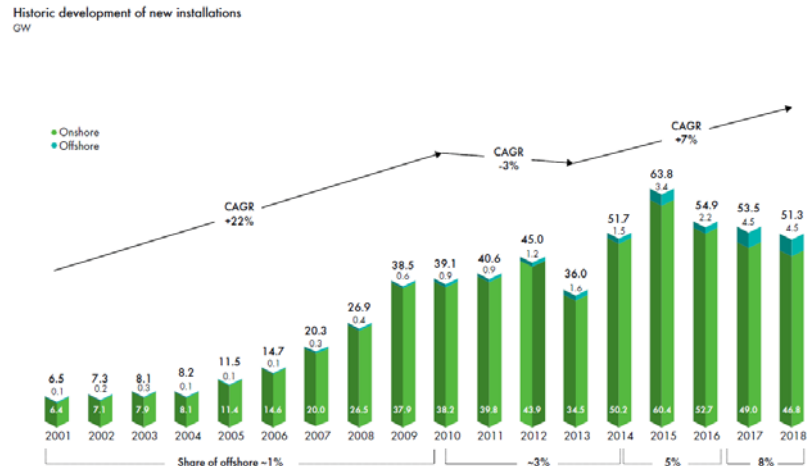


Fig. 1. Capacidad eólica instalada anualmente (GWEC, 2019)

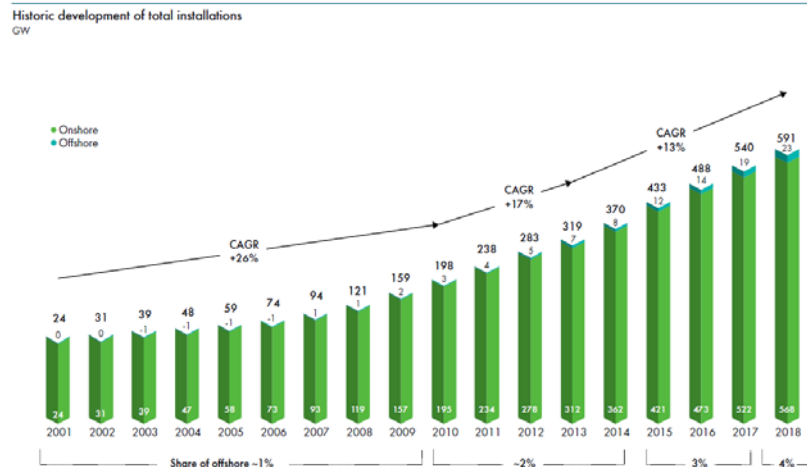


Fig. 2. Capacidad acumulada total instalada de potencia eólica (GWEC, 2019)

China continua encabezando a los países en capacidad instalada anualmente y en capacidad total acumulada (Fig. 3), convirtiéndose además en el 2018, en el primer país en capacidad eólica instalada sobre el mar (no mostrado) (GWEC 2019).

Cuba por su parte se ha propuesto una proyección en el uso de esta fuente renovable para la producción de electricidad hasta el 2030 de 688 MW incorporados al Sistema Electroenergético nacional (SEN) (Sánchez, 2019) y así contribuir con otras fuentes renovables a disminuir la dependencia de los combustibles fósiles en la generación de electricidad.

Para el caso de la energía eólica, el primer paso a realizar consiste en conocer el potencial eólico de un país o región. Para ello diversas técnicas son empleadas acopladas en su inmensa mayoría en modelos físicos-matemáticos que permiten obtener una representación del potencial eólico con elevada confiabilidad. Entre los modelos más conocidos se encuentra el Modelo de Microescala WA^SP (Wind Atlas and Application Program) desarrollado por el Laboratorio de Energía Renovable de RISO en Dinamarca (Gibert *et al.*, 1996) y el Modelo WEST (Wind Energy Simulation ToolKit) desarrollado por

Environment Canada. El primero constituye la base conceptual del Atlas Eólico Europeo (Troen y Petersen, 1989) y el segundo fue empleado en la realización de los Atlas Eólico de Canadá (Yu *et al.*, 2005) y China (Rong y Zhu).

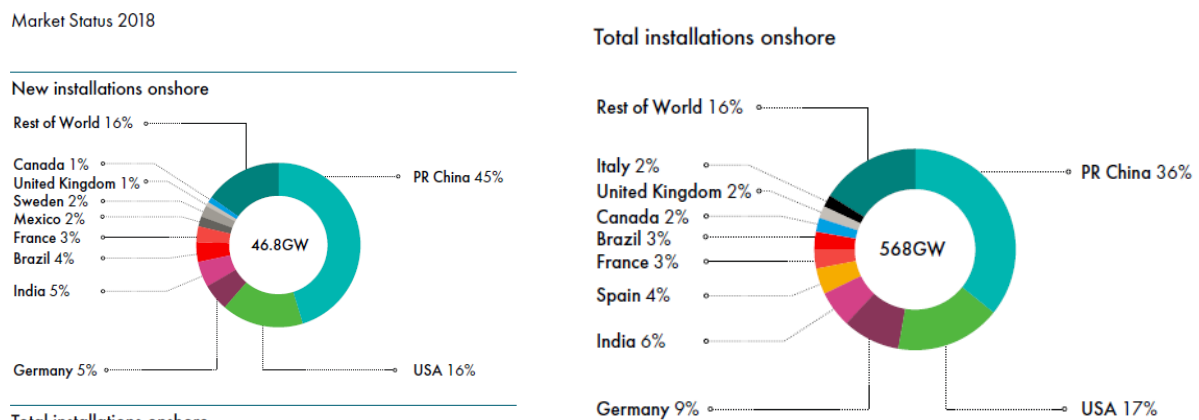


Fig. 3. Primeros países en potencia eólica instalada en el 2018 y Capacidad Acumulada (GWEC, 2019)

Con el desarrollo de dos proyectos internacionales, especialistas cubanos pudieron tener acceso total a ambos modelos y con ellos elaborar los mapas del potencial eólico de Cuba (Soltura *et al.*, 2007, Roque *et al.*, 2014 y Alonso *et al.*, 2018). Este trabajo presenta las bases conceptuales de ambos modelos y establece a partir de los diferentes mapas obtenidos diferencias y semejanzas entre ellos. El WASP solo se utilizó para obtener el mapa de potencial eólico de Cuba a 50m de altura, pero en el Atlas Eólico, debido a su esquema de trabajo, fue posible también obtener los mapas de potencial eólico a 10, 30 y 100m de altura sobre el terreno.

Materiales y Métodos

Como se mencionó anteriormente el recurso eólico de Cuba ha sido estudiado principalmente usando el modelo de microescala WA^SP y el modelo WEST. A continuación se explicarán las bases conceptuales de ambos modelos y cómo se aplicaron para obtener la estimación del potencial eólico de Cuba.

Modelo de microescala WA^SP

El proyecto internacional SWERA (Solar and Wind Energy Resources Assessment), financiado por el Programa de Naciones Unidas para el Medioambiente (UNEP), se ejecutó entre junio del 2002 y noviembre del 2004, con importantes salidas para 13 países en vías de desarrollo, incluyendo Cuba. Este proyecto, dirigido por dos prestigiosas instituciones internacionales, tales como, el Laboratorio de Energía Renovable de los Estados Unidos (NREL) y el Laboratorio Nacional Risø, constituyó la fuente original del proyecto nacional “Atlas del potencial eólico y solar de Cuba”, que se extendió hasta el 2006, cuya coordinación y financiamiento estuvo a cargo del Centro de Gerencia de Programas y Proyectos Priorizados (GEPROP), perteneciente al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA).

El WA^SP es un sistema de programas integrado por varios modelos físicos y estadísticos que permite modelar horizontal y verticalmente el campo de viento en un área dada, y para ello utiliza las fuentes de datos climáticos o series de tiempo de velocidad y dirección del viento que aportan las estaciones meteorológicas o cualquier otra fuente de datos (aeropuertos, mediciones en parques eólicos, etc). Este sistema de cómputo opera en la microescala (resolución menor de 1 km). Utiliza un modelo de análisis de obstáculo, otro de análisis de rugosidad y otro de análisis orográfico, los que en conjunto después de ser aplicado a una estación meteorológica reconstruyen el campo de viento para una región según la resolución escogida. El mismo fue utilizado para la confección del Atlas Eólico Europeo (1989).

Un esquema simple de la aplicación de los modelos del WAsP puede verse en la Fig. 3. La flecha hacia arriba en la figura indica la aplicación de tres tipos de modelos a los datos de entrada de velocidad y dirección del viento, con el propósito de calcular el efecto perturbador que producen sobre la medición los obstáculos que rodean la estación en un radio de 500 m, los cambios de rugosidad por sectores de dirección, y las variaciones en altura del terreno. El cálculo de estas perturbaciones permite hacer correcciones a las mediciones de viento, a fin de eliminar el efecto perturbador y obtener una climatología generalizada del viento en la región. En el WAsP esto se conoce como atlas regional del viento, y el procedimiento para su obtención se denomina *limpieza climática del dato de viento*. El atlas regional del viento es uno de los conceptos básicos del WAsP, y es el fichero a partir del cual se pueden extrapolar horizontal y verticalmente los datos de viento de la estación a otras áreas, climática y topográficamente semejantes, en un radio de poco más de 10 km.

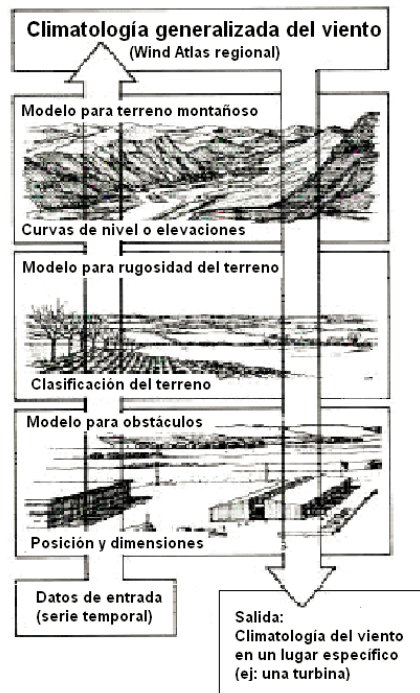


Fig.3 Esquema simple de aplicación de los modelos del WAsP.

La flecha hacia abajo en la Fig.3 indica la aplicación inversa de los modelos del WAsP. Ahora el procedimiento consiste en incorporar el efecto perturbador que producen los obstáculos cercanos, los cambios de rugosidad y las variaciones en altura del terreno sobre el funcionamiento de la turbina eólica en el sitio escogido para su emplazamiento. El atlas regional del viento es ahora la fuente principal de datos para la aplicación de este procedimiento, cuyo resultado final es la climatología del viento en el sitio escogido. A partir de esta climatología el WAsP puede calcular la producción de energía de un aerogenerador emplazado en dicho lugar. Esto es en línea general la filosofía de trabajo del WAsP.

Datos utilizados

Para la obtención de este mapa se utilizaron 49 estaciones meteorológicas (Fig. 4) de las 68 que integran la red nacional, seleccionadas de acuerdo al tipo de paisaje físico-geográfico, 43 de ellas con series de datos de viento comprendidas en el período 1970-2004 (30 a 35 años). Todos los datos fueron extraídos de la base de datos del Centro del Clima del INSMET.

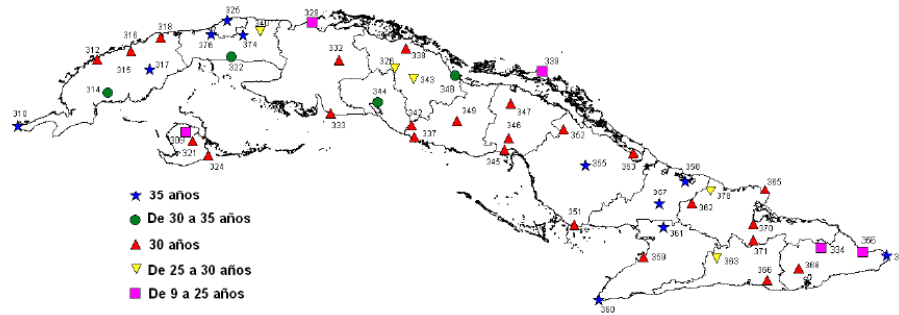


Fig. 4. Ubicación de las 49 estaciones meteorológicas utilizadas para obtener el mapa WAsP de potencial eólico de Cuba.

Como soporte el modelo WAsP utiliza para su modelación un mapa de rugosidad y orografía que se obtiene con la ayuda del utilitario WAsP Map Editor, un editor gráfico que, a diferencia del GIS (Geographical Information System), permite asignar valores de rugosidad a las distintas capas, tales como, tipos de vegetación, poblados y cuencas hidrográficas, que integran el mapa en formato DXFAutocad importado por este editor. También con la ayuda de este editor, se puede superponer o sumar al mapa de rugosidad un mapa de curvas de nivel u orografía para obtener finalmente el mapa en formato WAsP (orografía + rugosidad), que sirve de soporte digital a los modelos del WAsP (Fig. 5). Este mapa contiene valores de rugosidad entre 0.0002 (ó 0.0) y 1.0 m, valores de altura entre 0 y 1960 m, con espaciamiento entre curvas de nivel de 10 m.

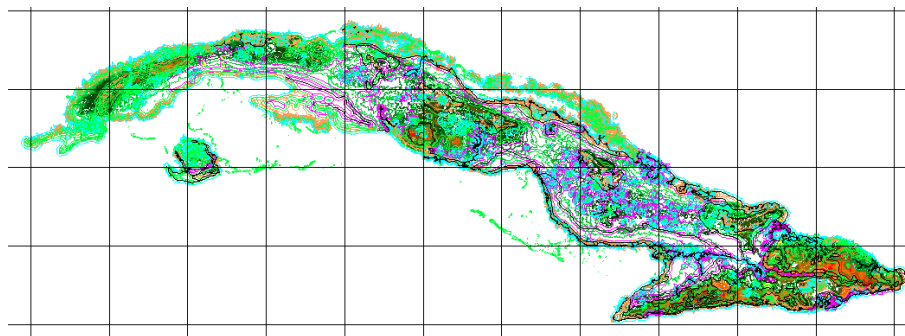


Fig. 5 Mapa vectorial WAsP en formato digital, a escala 1: 250 000, preparado con el WAsP Map Editor. Proyección Cuba Norte.

Modelo WEST

El modelo WEST (Wind Energy Simulation Toolkit), como se ha planteado anteriormente, está basado en un enfoque de reducción de escala estadística-dinámica (Frey-Buness et al., 1995). La asunción básica del modelo es que el clima regional está asociado con una distribución específica de situaciones o patrones de tiempo a gran escala. El procedimiento de reducción de escala se ilustra en la figura 6 y se resume en los principales pasos siguientes:

1) Un conjunto de situaciones meteorológicas básicas (que en lo sucesivo denominaremos “clases”) se definen usando parámetros meteorológicos pertinentes, en el cual el viento geostrofico es el parámetro principal en la clasificación. La frecuencia de cada clase es determinada aplicando un análisis estadístico a los datos globales de larga data en una rejilla (NCEP/NCAR Reanalysis (National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research, by Kalnay et al., 1996). Cada situación meteorológica es simplificada a un simple perfil vertical del estado atmosférico para toda la región

(temperatura, viento, etc.). El tamaño de la región debe ser suficientemente grande para poder definir una situación meteorológica, pero lo más pequeño posible para no permitir el desarrollo de situaciones de

transición durante la simulación del modelo en el paso 2. Un dominio menor que 1000 X 1000 km se establece para este tipo de aplicación.

2) Para cada clase determinada en el primer punto, una simulación del modelo de mesoescala (Canadian Mesoscale Compressible Community Model (Tanguay et al., 1990, Thomas et al., 1998) es inicializado con el perfil atmosférico correspondiente, mientras las condiciones de fronteras laterales son mantenidas constante en el tiempo. El periodo de tiempo para la simulación debe ser suficientemente grande para que la atmosfera alcance su estado estacionario, pero corto para no permitir situaciones de transiciones de tiempo (6-9 horas). La convergencia del modelo hacia el estado estacionario depende principalmente de la estabilidad del aire, la resolución del modelo y el estado inicial con el cual modelo empieza a ejecutarse.

3) El clima eólico a mesoescala se obtiene ponderando los resultados de la simulación de cada clase con su frecuencia de ocurrencia. En este paso se establece también una distribución de la frecuencia del viento por sectores de dirección e intervalo de rapidez (Distribución de frecuencia bivariada), la cual resulta indispensable como dato de entrada en la modelación en la microescala.

4) Una serie de simulaciones en la microescala son ejecutadas para refinar los resultados de la microescala. El modelo de microescala calcula las aceleraciones y desviaciones del viento debido a Colinas y rugosidad de la superficie. Los datos de entrada al modelo incluyen los datos de las propiedades de la superficie (elevación del terreno y uso de suelo) y la distribución de frecuencia bivariada mencionada en el paso 3. (Este paso no fue realizado para Cuba).

5) Los resultados finales son ploteados utilizando herramientas similares a los de los SIGs para obtener un atlas de viento para una región dada.

Como puede verse de la formulación inicial del modelo WEST, este combina las 3 escalas meteorológicas (sinóptica, mesoescala y microescala), lo que le permite tener en cuenta muchos de los fenómenos que originan o modifican el flujo de viento en las distintas escalas, algo que no tuvieron en cuenta los otros modelos analizados aquí hasta para la realización de los mapas de Cuba.

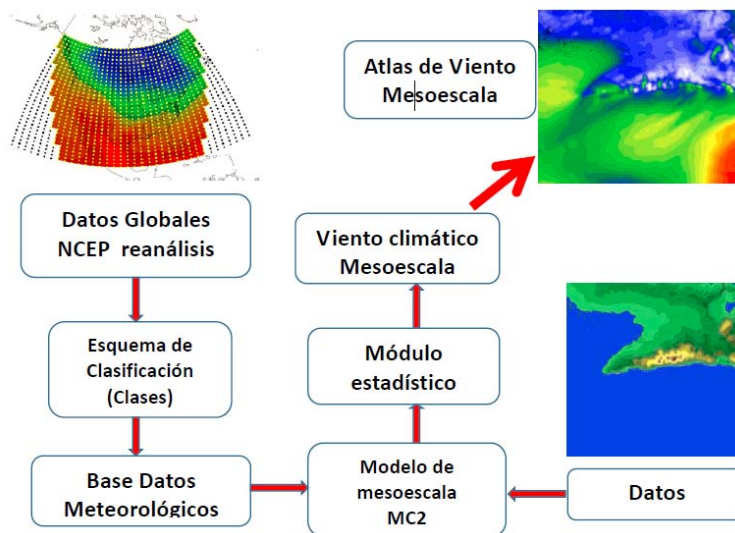


Fig. 6. Diagrama de flujo del modelo WEST para la elaboración del Atlas Eólico de Cuba.

Datos utilizados

Los reanálisis del NCEP/NCAR son seleccionados por ser el conjunto de datos global a largo plazo para los análisis de series temporales, debido a su calidad relativamente uniforme en el espacio y el tiempo y su libre acceso para el público. Los datos utilizados en este trabajo cubrieron 53 años (1958 – 2011) con

intervalos cada 6 horas y están comprendidos en una rejilla de latitud – longitud que presenta 2.5 grados de espaciamiento y 17 niveles en la vertical (de 1000mb a 10mb).

Para la realización del mapa digital de terreno (Fig. 7), la base de datos topográficos fue extraída del Geophysical Survey con 2 km de resolución.

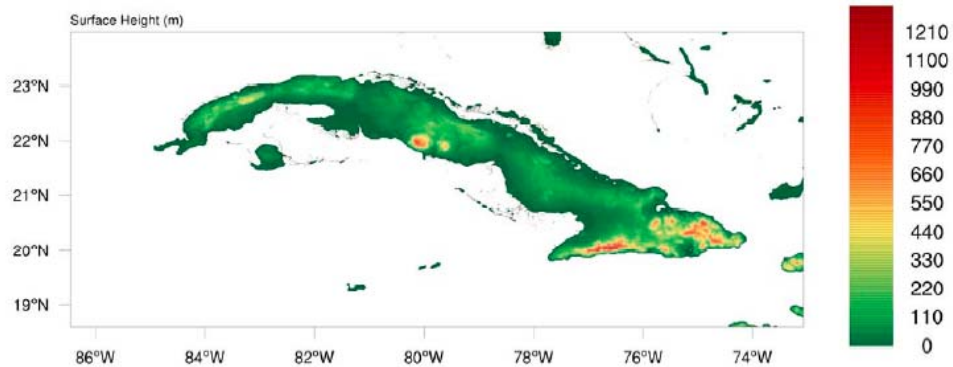


Fig. 7. Mapa Topográfico de Cuba para la simulación con el WEST.

Modelo WEST-C

La posterior validación del mapa WEST con mediciones correspondientes a la Red de Torres de Referencia Meteorológica (Roque *et al.*, 2010) y estaciones meteorológicas de superficie, mostró que el promedio del Error Absoluto Medio (EMA) fue de 0.95 m/s, siendo todavía mayor para el nivel de 100m de altura, lo que repercutió negativamente en los valores bajos de la densidad de potencia media del viento para estos niveles.

Alonso y colaboradores (Alonso *et al.*, 2018), introdujeron un módulo de pos procesamiento a las salidas numéricas del WEST para disminuir este error basado en el método objetivo de Cressman con muy buenos resultados. Con esta nueva metodología, denominada WEST-C, el EMA para el nivel de 50m disminuyó a 0.19 m/s.

Mapa NREL

El National Renewable Energy Laboratory (NREL) de Estados Unidos mediante el proyecto SWERA elaboró un mapa eólico de Cuba a 50m de altura con 1 km de resolución (Fig. 8). El mismo está basado en el sistema WRAMS (NREL's Wind Resource Assessment and Mapping System), el cual es una combinación de métodos analíticos, numéricos y empíricos que utilizan herramientas de mapeo de Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Este mapa solo es utilizado en el trabajo para realizar comparaciones con los obtenidos por especialistas cubanos.

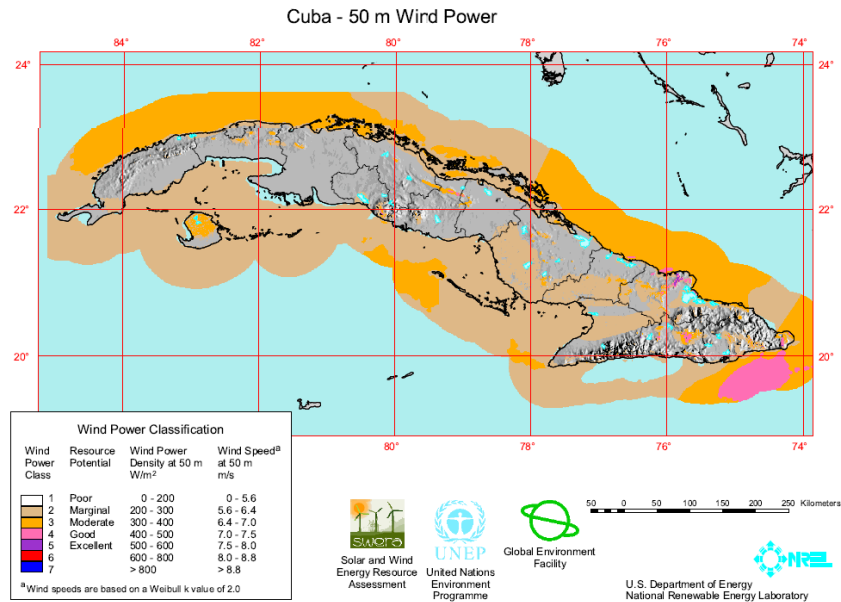


Fig. 8. Mapa de Potencia Eólico de Cuba elaborado por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) de Estados Unidos.

Discusión de los Resultados

El mapa de densidad media anual del flujo de energía del viento sobre Cuba, calculado a 50 m de altura sobre el terreno aplicando los modelos del WASP, puede verse en la figura 9. En la misma se aprecia que las principales zonas donde ubica el recurso eólico se encuentran en las zonas costeras desde la provincia de Ciego de Avila hasta Guantánamo y las zonas montañosas del oriente del país. A partir del análisis del mapa, se identificaron 24 áreas o zonas geográficas del país, con densidades de energía mayores que 500 W/m² y velocidades medias anuales mayores que 6.2 m/s. De acuerdo con la división en clases de energía propuesta en la leyenda del mapa, estas áreas corresponden a sitios con potenciales entre Bueno y Excepcional, lo cual, en sentido práctico, significa que estos sitios son de “buenos” a “muy buenos”, según la clase a que pertenezcan, para la generación eléctrica a partir del viento a escalas diversas.

Estudios de prospección realizado confirmaron la mayoría de las áreas que muestra el WASP, no obstante hubo otras zonas puntuales en que no se comportó así, incluso dentro de las mismas áreas de mayor recurso eólico.

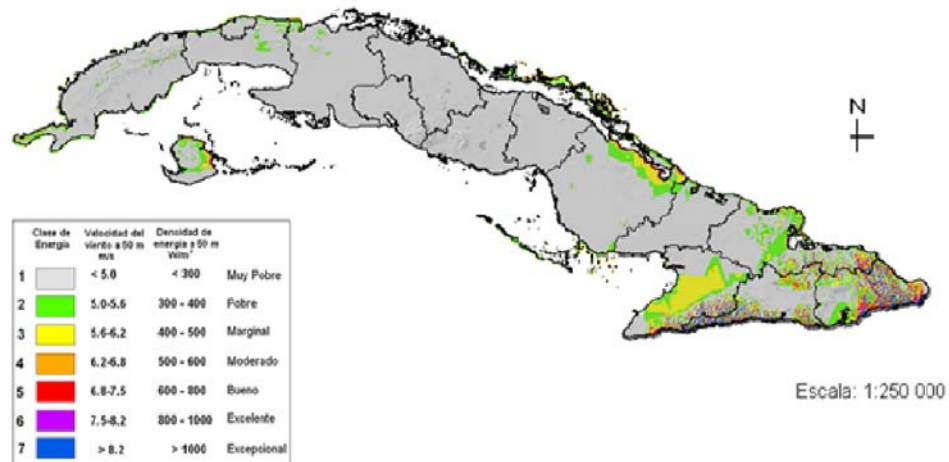


Fig.9. Densidad de energía media anual del viento sobre Cuba calculada a 50m de altura, utilizando el WASP.

Como todo modelo, el WASP presenta limitaciones que hay que tener en cuenta en cualquier análisis que se realice. Entre estas limitaciones se encuentran las siguientes:

- El WASP es un modelo de flujo en equilibrio con estratificación neutral de la atmósfera. Exige condiciones ideales de la atmósfera.
- El dominio de aplicación del WASP como modelo de microescala es de 10 km x 10 km, es decir, 100 km². Más allá de este dominio los errores del WASP se incrementan.
- Sobrestima el cálculo del recurso en áreas de terreno complejo o montañoso, especialmente en áreas con RIX (ruggedness index) mayores que cero. El WASP trabaja bien con RIX=0.
- Exige el cumplimiento del principio de semejanza climática y topográfica, lo cual dificulta la aplicación y validez del WASP cuando esta condición no se cumple estrictamente, ya sea en zonas montañosas o en cualquier tipo de paisaje menos complejo.
- El WASP no permite cambiar el valor de la densidad del aire, hecho que puede tener incidencias negativas en el cálculo de la producción de energía de una turbina eólica.

Además, el mapa elaborado, presenta una limitación relacionado con la interpolación de las áreas estimadas, apreciándose algunas irregularidades o saltos en la interpolación gráfica o mapeo del recurso eólico realizada por el GIS. Estos saltos son más notables en la región oriental, debido, en primer lugar, a los fuertes contrastes entre los paisajes montañosos y no montañosos, y en segundo lugar, a la falta de correlación entre los ficheros “wind atlas” derivados de las estaciones características de estos paisajes. El paso de un tipo de paisaje físico-geográfico muy complejo a otro menos complejo, puede traer como resultado una violación del Principio de Similitud, cuyo cumplimiento es condición indispensable para la aplicación y validez del WASP.

El mapa obtenido por el modelo WEST para el mismo nivel de 50m de altura se muestra en la figura 10. En la misma se aprecia que el recurso eólico de Cuba queda subestimado en la costa norte. Algo similar había sido obtenido por el mapa elaborado por el National Renewable Energy Laboratory (NREL, 2004) de los Estados Unidos para Cuba, en el marco del proyecto SWERA.

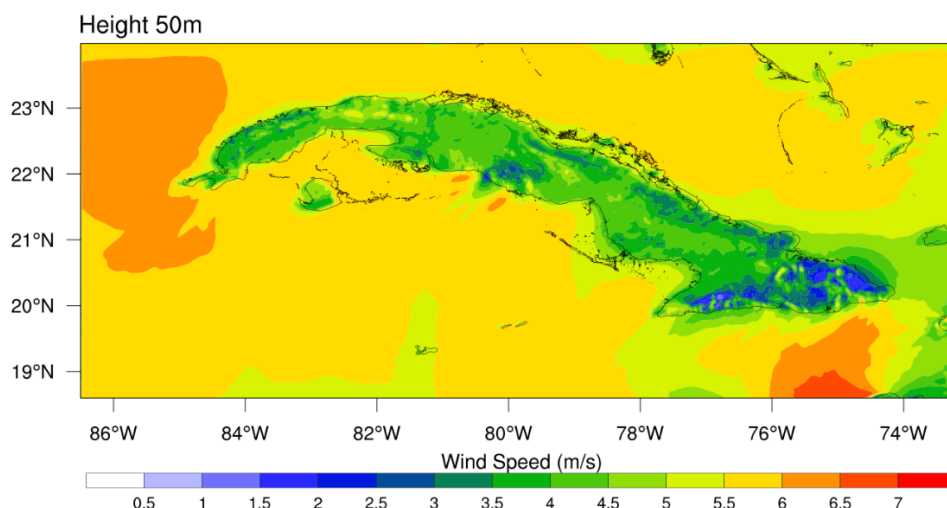


Fig. 10. Rapidez Media del Viento al nivel de 50m de altura, utilizando el modelo WEST.

En la figura 10, sin embargo se aprecia una de los mayores aportes del modelo WEST, que es mostrar no solo el recurso eólico sobre tierra, sino también en el mar, lo que no fue posible con el modelo WASP y sí en alguna medida por el mapa de NREL, aunque se requerirá de mediciones en los sitios prometedores para confirmar los resultados hallados. Es por ello que nos centraremos básicamente en el recurso sobre tierra, por ser estratégicamente lo más promisorio para Cuba.

Aunque los resultados obtenidos se quedaron por debajo de lo esperado, especialmente en lo referente al aspecto cuantitativo, el recurso eólico muestra los mejores valores de densidad de potencia media del viento en la costa norte desde Ciego de Avila hasta Holguín, a los que habría que añadir, la zona sur de San Juan y Martínez en Pinar del Río, la zona costera este del municipio especial de la Isla de la Juventud y algunas zonas puntuales de la costa sur de las provincias orientales (Fig. 11). Sin tener en cuenta el recurso en las costas, tanto el mapa WASP, el mapa WEST y el mapa NREL, presentan coincidencia en las demás zonas mencionadas. En las zonas montañosas, el mapa WEST de Cuba no representa bien el recurso eólico, como tampoco lo hace el mapa NREL, mientras el mapa WASP, como se mencionó anteriormente lo sobrestima.

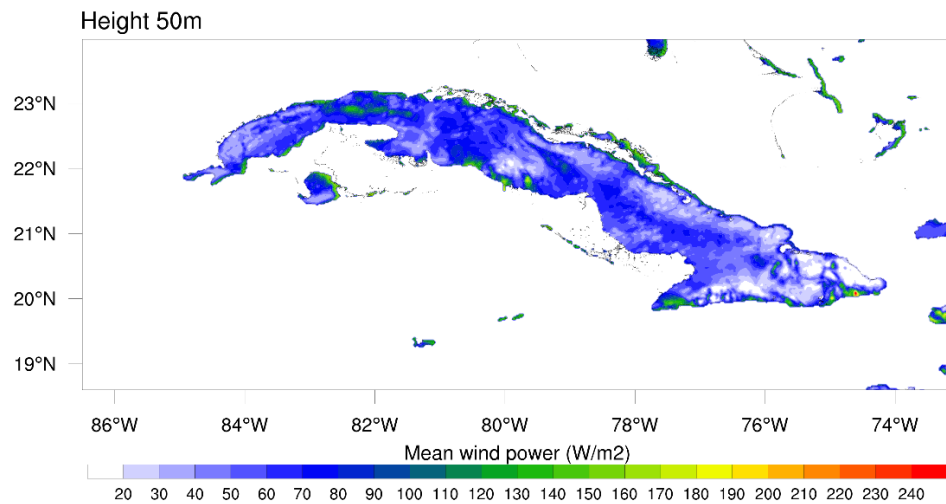


Fig. 11. Densidad de Potencia Media del Viento al nivel de 50m de altura, utilizando el modelo WEST.

Igual que el modelo WASP, el WEST posee limitaciones en su aplicación, producto de las aproximaciones que se realizan en su formulación. Algunas de estas son:

- Asume al viento como geostrófico y homogéneo, por lo que el procedimiento falla cuando se aplica a regiones tropicales donde no se cumple el balance geostrófico;
- Otra importante aproximación en la herramienta WEST es el balance hidrostático. Estas restricciones hacen que esta herramienta sólo sea aplicable a dominios lo suficientemente pequeños como para que se cumplan los balances dinámicos. Esto hace, que cuando el dominio de trabajo es mucho más grande (como es el caso del territorio cubano) este debe dividirse en mosaicos de aproximadamente 200 km x 200 km. Entonces la herramienta se vuelve computacionalmente más costosa porque habría que calcular las clases y después hacer la reducción de escala para cada clase y para cada mosaico por separado.
- Dificultad del modelo para capturar el comportamiento de las variables atmosféricas en regiones costeras y terrenos complejos; debido a la opción de coordenada vertical utilizada. Cuando la pendiente de la topografía se acerca a los 30 grados entonces aparecen inestabilidades numéricas en el modelo contaminando la salida, por lo que en las zonas montañosas la representación del recurso eólico es muy deficiente.
- La herramienta WEST no tiene en cuenta el ciclo diurno del viento y asume un perfil vertical estacionario para todo el día.
- A diferencia del mapa WASP, el mapa WEST no presenta las irregularidades mostradas durante la interpolación gráfica o mapeo del recurso.
- El modelo WEST aplicado a Cuba no contempló la modelación de la microescala.

Con el objetivo de mejorar en lo posible estas importantes limitaciones se decidió emplear el método objetivo de Cressman, entre otros métodos de interpolación (Alonso 2018).

El nuevo mapa para el nivel de 50m, refleja para Cuba (Fig. 12), de acuerdo a la clasificación dada por la Nota Técnica No. 175 de la Organización Meteorológica Mundial (Technical Note No. 175, 1981), que el recurso eólico se encuentra entre marginal ($200-300 \text{ W/m}^2$) y moderado ($300-400 \text{ W/m}^2$), aunque algunas zonas alcanzan la categoría de Bueno o Excelente ($400-600 \text{ W/m}^2$). Resultado que se asemeja más a las mediciones que se realizaron en mástiles de prospección o torres de referencia meteorológica, lo cual puede notarse en la figura 12. En la misma se muestran los perfiles verticales del viento en los primeros 100m sobre la superficie terrestre, dado por el modelo WEST-C en comparación con el modelo WEST y las mediciones (Fig. 13) para algunas regiones de Cuba.

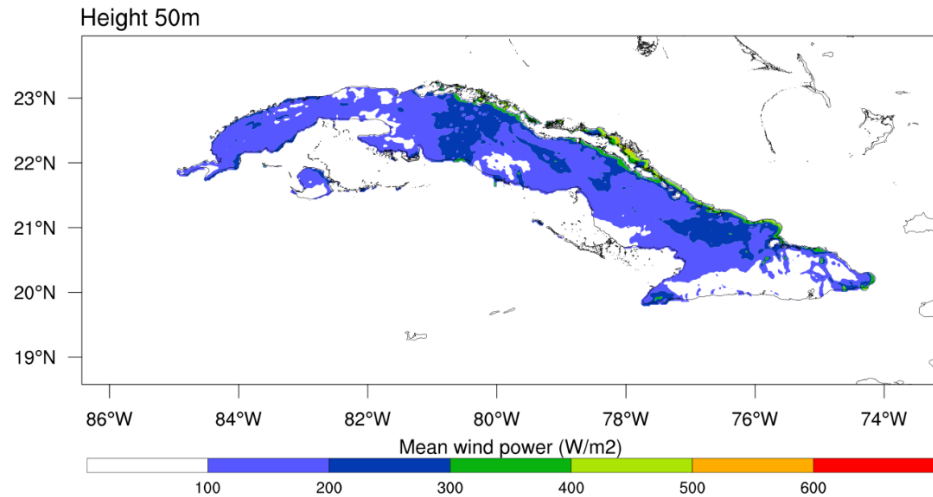


Fig. 12. Densidad de Potencia Media del Viento al nivel de 50m de altura, utilizando el modelo WEST-C.

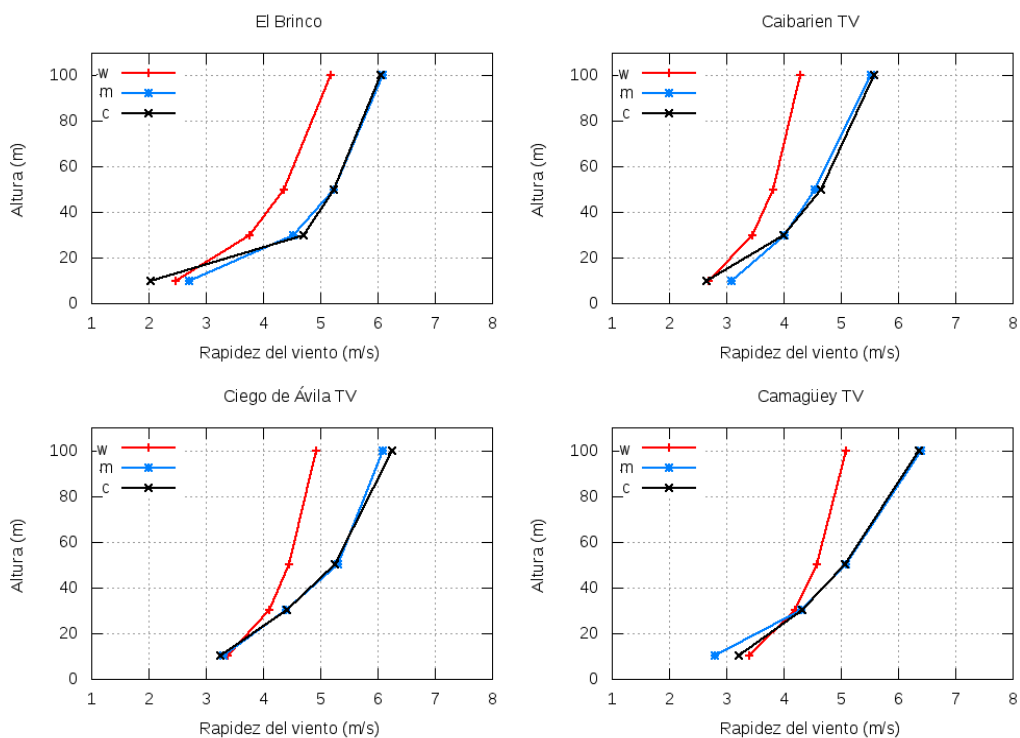


Fig. 13. Perfiles verticales del viento para diferentes sitios de Cuba dados por los modelos WEST (rojo), WEST- C (negro) y las mediciones (azul). Alonso *et al.*, 2018.

Comparación entre los diferentes mapas elaborados (WASP, WEST- C y NREL)

La comparación entre los diferentes mapas eólicos de Cuba, resulta difícil, puesto que todos han sido desarrollados por distintas metodologías, no obstante pueden compararse en principio, de acuerdo a la localización del recurso eólico en Cuba más que en magnitud y en este sentido comentaremos al respecto. Al comparar los resultados obtenidos se encuentran diferencias y similitudes entre los diferentes resultados.

Tanto el mapa elaborado por NREL como el obtenido por medio del modelo WEST, de manera general, subestiman el recurso eólico en la costa norte, desde Camagüey hasta Guantánamo, lo que no sucede con el obtenido por el modelo WASP, lo cual ha sido además, confirmado por mediciones realizadas con mástiles anemométricos (Soltura, 2011), aunque se observa una coincidencia, en cuanto a representación del recurso, entre el mapa WASP y el mapa WEST en los cayos de la costa norte de Cuba y del WASP con NREL en la zona de Cabo Lucrecia en la provincia de Holguín. Sin embargo cuando se compara el WEST-C con el WASP, entonces los resultados son más coincidentes, especialmente en toda la costa norte centro – oriental de la Isla.

Otra diferencia notable entre los diferentes mapas lo constituye el recurso eólico en terreno complejo. Aquí hay que destacar que resulta vital para hacer una correcta estimación del recurso eólico, el poder contar con un mapa de rugosidad y orografía con la mejor resolución posible y datos de mayor calidad, y en nuestro caso, el empleado en el modelo WASP, fue mucho mejor que en los otros mapas. Esto puede confirmarse al observar las figuras 5 y 7, donde en el empleado por el WEST las elevaciones están pobremente definidas, pues las mayores alturas apenas superan los 1200m sobre el nivel del mar, mientras que en el mapa WASP, estas llegan a superar los 1900m. No se cuenta información con el empleado por NREL.

Un hecho notable es la coincidencia por parte de todos los mapas del recurso eólico en el este de la Isla de la Juventud, lo que conllevó a la instalación de un parque eólico en dicha zona como medio de confirmación y como prueba ante el azote de huracanes con alta incidencia de afectación en esa zona. Otras zonas con iguales características se encuentran al sur de La Habana, en la ahora actual provincia de Mayabeque y en el suroeste de la provincia de Pinar del Río.

Una de las grandes ventajas dadas por el modelo WEST, fue el de ofrecer mapas para diferentes niveles de altura (Atlas Eólico de Cuba, Roque *et al.*, 2013), teniendo por tanto un mayor valor agregado con respecto a los otros mapas, ya que puede ser empleado para diferentes propósitos, tales como el bombeo de agua para la agricultura y la ganadería, la producción de electricidad con pequeños y medianos aerogeneradores y la ya mencionada instalación de grandes aerogeneradores conectados al SEN.

La comparación de los mapas eólicos, indica que la evaluación del recurso eólico de Cuba no es un tema agotado. El mapa WEST-C a 100m de altura reveló nuevas zonas de interés que deben ser confirmadas, sobretodo en el occidente del país.

En resumen, esfuerzos adicionales en la esfera de la modelación numérica, acompañado con datos de mayor calidad, mapas de orografía y rugosidad actualizados y con mayor resolución, pudieran revelar nuevas zonas con recurso eólico de interés con una mayor precisión y confirmar las ya encontradas.

Conclusiones y recomendaciones

- 1- Los mapas eólicos que sobre Cuba se han elaborados han facilitado la toma de decisiones sobre el empleo de esta fuente renovable con fines de generación de electricidad conectada al Sistema Electroenergético Nacional (SEN).

- 2- Los mapas elaborados encuentran sus diferencias desde la aplicación de la metodología y los datos utilizados, por lo que en todos los casos hay ventajas y desventajas, aunque el modelo WEST produjo mayor valor agregado al ofrecer mapas para otros niveles de altura (10, 30 y 100m).
- 3- Se recomienda el uso combinado de modelos de mesoescala con microescala y el uso de técnicas estadísticas tal y como establece la práctica internacional.

Referencias Bibliográficas

Alonso, Y., Y. Martínez, A. Roque, W. Yu, y I. Borrajero (2019): A post-processing module based on Cressman's analysis to improve the Wind Energy Simulation Toolkit mapping system. *Wind Engineering*, 43 (3), 277–298, doi:10.1177/0309524X18780400, URL <https://doi.org/10.1177/0309524X18780400>. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0309524X18780400>

GWEC, (2019): Global-Wind-Report-2018. Global Wind Energy Council, April 2019. <https://gwec.net/wp-content/uploads/2019/04/GWEC-Global-Wind-Report-2018.pdf>.

NREL, (2004): <http://www.nrel.gov/wind/pdfs/cuba.pdf>, http://en.openei.org/datasets/files/716/pub/cubawindreport_243.pdf

Petersen, E.L y Troen, I. (1989): European Wind Atlas. European Wind Energy Association, Conference and Exhibition, Roma, Italy. https://orbit.dtu.dk/files/112135732/European_Wind_Atlas.pdf.

Roque A., W. Yu, Y. Alonso, I. Borrajero, Y. Martínez, A. Bezanilla y L. Chardon (2013): Atlas Eólico de Cuba. Workshop Wind Resource Assessment - Wind Atlas for Cuba, en el marco de la 12th World Wind Energy Conference & Renewable Energy Exhibition WWEC2013, Palacio de Las Convenciones de La Habana. 3-5 de Junio 2013.

Roque A., M. Carrasco y P. Reyes (2015a): Perfil vertical del viento en la capa superficial atmosférica sobre Cuba. Aplicación al estudio del viento como fuente de energía. *Rev. Cub. Met*, Vol. 1 No.1.2015. <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/188/0>

Soltura R., A. Roque, I. Rivero, A. Wallo, R. Báez, R. Vázquez, R. Rivero, L. Ayala, G. Rodríguez, H. Carrasco, A. Curbelo, A. González, O. Herrera, G. Martín, J. Carlos, G. Hernández (2007): Primera edición del Mapa de Potencial Eólico de Cuba. *Rev. Ecosolar* jul-sep 2007, ISSN: 1028-6004.

Soltura R., A. González R. Novo, G. Leiva, O. Vera, E. Ochoa (2011): Resultados del Programa de Prospección Eólica 2005-2010. Certificación de los datos de viento y optimización de la red. Convención Internacional de Energía Renovable, Ahorro de Energía y Educación Energética CIER Palacio de Las Convenciones, La Habana, 2011.

Sánchez P., (2019): Fuentes Renovables de Energía. Desafíos para la generación de electricidad en Cuba. Presentación en el VI Taller Internacional de Energía Eólica CUBAEÓLICA 2019. 10-12 de julio, Hotel Meliá Habana. Cuba.

Technical Note No. 175 (1981): Meteorological Aspects of the Utilization of Wind as an Energy Source. World Meteorological Organization. WMO–No. 575. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=883

Zhang, D., Z. Rong, L. Yong, y Y. Wei (2007): The Numerical Simulating of Wind Energy Resources in China. Proceedings of ISES World Congress, Vol. I – V. <https://ru.b-ok2.org/book/1001786/b80d53>

Yu, W., R. Benoit, C. Girard, A. Glazer, D. Lemarquis, J. R. Salmon, y J. P. Pinard (2006): Wind Energy Simulation Toolkit (WEST): a wind mapping system for use by the wind-energy industry. Wind Engineering, 30, 15–33.
https://www.researchgate.net/publication/228956471_Wind_Energy_Simulation_Toolkit_WEST_A_Wind_Mapping_System_for_Use_by_the_WindEnergy_Industry