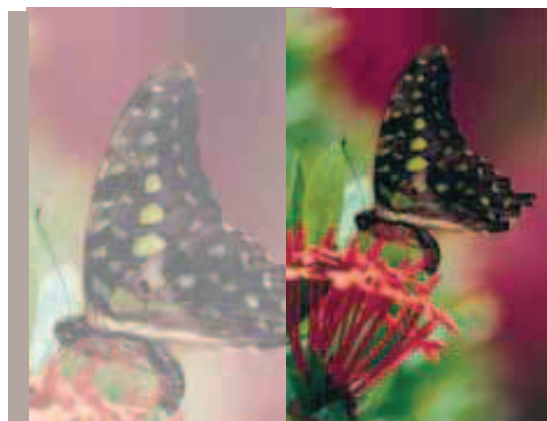


Generalidades Generalidades



Introducción

El Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia es una colección de mapas que muestra la distribución espacial del viento en superficie y el potencial eólico de Colombia. En los mapas de viento se presenta el promedio mensual y anual, acompañado de dos momentos estadísticos de orden superior como la desviación estándar y el sesgo para cada uno de los meses y, en el caso de la energía, se establece el valor promedio mensual y anual de la densidad de energía eólica a dos distintas alturas, que sirven como documento de referencia para Colombia, en el sentido de que aportan conocimiento para el uso de energías alternativas, indicando épocas del año y zonas de Colombia donde podría ser más aprovechable este recurso natural para dar soluciones a las necesidades energéticas de la nación.

Se aporta, a la vez, información local del comportamiento del viento para algunos sitios de referencia para dimensionar futuros proyectos como parques eólicos para la generación de energía eléctrica o sistemas de aerobombeo, particularmente en aquellas zonas donde las redes de transporte y distribución de energía no son asequibles.

Con esta edición se logran alcances que en el pasado pudieron ser más difíciles de obtener en cuanto al control de calidad de los datos y procesamiento de la información, la cual inicialmente fue evaluada, verificada y capturada en la Base de Datos Central del IDEAM desde las gráficas de anemógrafo. Los datos que no fueron rescatados de esta manera fueron complementados mediante procesamientos estadísticos en las series de tiempo. Se utilizó además mode-

lación física para establecer el potencial eólico en forma directa a partir del viento, con aportes de información suministrada por modelos meteorológicos globales y regionales de baja resolución junto con el conocimiento topográfico y físico del suelo colombiano. Asimismo, se trató al viento como vector: con sentido y magnitud.

Estructura del Atlas

El Atlas de Viento y Energía Eólica en Colombia está estructurado en 5 capítulos, de la siguiente manera:

El Capítulo I contiene una colección de 12 mapas mensuales y 1 mapa anual sobre la velocidad promedio del viento en superficie interpolada a una resolución de 10X10 kilómetros, los cuales representan una aproximación de la distribución espacial de dicha variable meteorológica sobre el territorio colombiano. Estos mapas fueron obtenidos con algoritmos basados en la física que utilizan modelos meteorológicos regionales junto con datos de anemógrafos tomados directamente de 111 estaciones del país y complementadas con información de modelos meteorológicos de baja resolución en 122 puntos de grilla.

El Capítulo II presenta una colección de 12 mapas mensuales de desviación estándar del viento en superficie, como información adicional que permite cuantificar el grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio.

El Capítulo III contiene una colección de 12 mapas mensuales de sesgo del viento en superficie. Este parámetro estadístico permite explicar acerca de la asimetría de esta variable meteorológica. Para tal fin, valores con asimetría negativa

indican que sí existe una frecuencia importante de velocidades altas.

El Capítulo IV muestra el ciclo diario mensual del viento para 16 lugares del país donde la persistencia del viento a lo largo del ciclo diario y/o para ciertas épocas del año puede llegar a ser aprovechable para la generación de la energía.

El Capítulo V contiene una colección de 12 mapas mensuales y 1 mapa anual de la densidad de energía a 20 metros de altura interpolada a una resolución de 10X10 kilómetros y 12 mapas mensuales junto con 1 mapa anual de la densidad de energía a 50 metros de altura interpolada con la misma resolución, ya que los datos de vientos en superficie están con dicho espaciamiento. Estos mapas fueron obtenidos con la deducción de la velocidad del viento a mencionadas alturas y, dado que este cálculo requiere el valor de la densidad del aire, este se obtuvo a través de la ecuación de estado de gases ideales y se calculó usando los datos promedios mensuales multianuales de temperatura del aire de 685 estaciones y 38 estaciones para el caso de presión atmosférica, las cuales fueron complementadas para todo el país en función de la orografía e interpoladas con la resolución anteriormente mencionada.

Adicional a los capítulos, se presentan cuatro anexos con información complementaria:

El Anexo 1 explica los aspectos básicos para comprender el movimiento del aire y las causas que lo explican. En general muestra que el viento es el resultado de fuerzas que se generan inicialmente debido al calentamiento diferencial producido por el Sol sobre el aire en contacto con la superficie del planeta. Dicha energía radiante se transforma en energía cinética, la cual es el resultado principalmente de cuatro grandes fuerzas como son: la fuerza del Gradiente de Presión (variaciones de la presión atmosférica con la distancia), la fuerza de Coriolis (que surge por la desviación del viento ocasionada por la rotación de la Tierra), la fuerza centrífuga (que aparece por la existencia de trayectorias curvas en el movimiento del aire) y la fuerza de rozamiento o de fricción (esta última, importante en los primeros metros de altura ya que la superficie del suelo ofrece resistencia al movimiento del aire). No obstante, la topografía afecta tanto la velocidad como la dirección de donde sopla

el aire. Estas influencias de la orografía en el campo del viento se denominan vientos locales y como ejemplo de ello se presentan las brisas mar-tierra y tierra-mar, brisas de valle-montaña y montaña-valle, junto con el efecto Föhn. Con base en dicho marco teórico se hace una descripción de los vientos que rigen las condiciones meteorológicas en Colombia.

El Anexo 2 muestra que modelar el campo del viento en superficie es complejo, ya que este tiene variaciones diurnas y locales, embebidas dentro de una dinámica atmosférica de mayor escala. No obstante, una verificación del comportamiento de esta variable meteorológica está acompañada de las mediciones a través de anemógrafos que hacen parte de la instrumentación de las estaciones meteorológicas, las cuales miden y grafican continuamente las características vectoriales del viento como son la dirección y la velocidad. En dicho anexo se describen los resultados de los procesos de evaluación, verificación y captura de la información nacional utilizada y se muestra la red de referencia de estaciones meteorológicas finalmente utilizados para la elaboración del Atlas.

El Anexo 3 muestra el tratamiento estadístico realizado con los datos de viento. La primera fase comprende la complementación de datos a través de modelos autorregresivos integrados de media móvil denominados ARIMA, los cuales llevan consigo los tests estadísticos que debe pasar un dato de viento, interpolado temporalmente, para ser representativo y considerado homogéneo dentro de la serie de tiempo. Estos modelos incluyen un análisis de la estacionariedad de la información y un análisis descriptivo de la serie caracterizada por la tendencia, estacionalidad, ciclicidad y aleatoriedad. La segunda fase explica la metodología para determinar la distribución probabilística Weibull del viento; específicamente expone el modelo generado para hallar los parámetros de forma y escala que interesan en el diseño y proyección de parques eólicos.

Finalmente, el Anexo 4 describe el modelamiento físico llevado a cabo para generar la distribución espacial de los campos de viento y de la evaluación del potencial energético del recurso eólico en Colombia a distintas alturas. Aquí se muestran los campos mensuales de dirección de

viento y el algoritmo de cálculo para determinar la densidad de energía eólica, la cual necesitó de las características físicas del suelo (rugosidad superficial) y del conocimiento espacial y mensual de los campos de tres variables meteorológicas: la velocidad del viento, la presión atmosférica y la temperatura del aire. El análisis espacial descrito en este anexo está sustentado en el fundamento físico que describen los modelos meteorológicos regionales, los cuales sugieren que la resolución más fina a interpolar debe ser comparable con el distanciamiento de las estaciones meteorológicas. Teniendo en cuenta esto y la buena densidad de la red para la variable de temperatura del aire en Colombia, se forzó a llevar la interpolación para todas las variables a 10X10 kilómetros.

Etapas del trabajo

La realización de este trabajo fue llevada a cabo en diversas etapas, a saber:

1. Recolección de la información meteorológica de dirección y velocidad del viento en el ámbito nacional de las gráficas de anemógrafos de las estaciones a cargo del IDEAM y posteriormente de entidades de carácter privado como el caso de CENICAFE y de la Corporación Autónoma Regional, CAR. En el ámbito internacional, se recopilaron los resultados de los modelos regionales de baja resolución como los ofrecidos por el Reanálisis del Centro Nacional para Investigaciones Atmosféricas (National Center for Atmospheric Research, NCAR), del NOMADS (NOAA Operational Model Archive Distribution System) que depende de la Administración Nacional de Océano y Atmósfera (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) y del Centro Nacional para Predicciones Ambientales (National Center for Environmental Prediction, NCEP) estos dos últimos de los Estados Unidos, información producida por el Modelo Regional de Alta Resolución desarrollado en el Instituto de Investigaciones Meteorológicas del Japón (Meteorological Research Institute, MRI) e información de viento para 3 estaciones meteorológicas suministrada por SENAMI de Perú. Adicionalmente, se obtuvo la información de los promedios mensuales multianuales de
- la línea base periodo 1961-1990 para las variables de temperatura del aire y presión atmosférica. El IDEAM solicitó a Cenicafé la información de viento, sin resultados positivos, y tampoco fue posible obtener la información de otros países fronterizos como Venezuela, Brasil y Ecuador.
2. Se realizó la evaluación, verificación y captura a la base de datos de viento para 7.292 meses que involucraron tres tipos de gráficas: Fuess-Casella tipo mecánico, Lambrecht tipo Woelfle y Thiess, obteniendo promedios horarios de dirección y velocidad del viento, los cuales se almacenaron inicialmente en la base de datos SISDHIM (Base de datos hidrometeorológica), migrados posteriormente a la base de datos central Oracle 9i (Base de datos del Sistema de Información Ambiental) para su posterior análisis estadístico y modelamiento físico.
3. El tratamiento estadístico de la información de viento se llevó en dos fases: la primera en la complementación de datos con el uso del software TRAMO (Time Series Regression with ARIMA Noise, Missing Observations, and Outliers), debido a la existencia considerable de vacíos en las series, y la segunda en la obtención de las distribuciones de probabilidad de la velocidad del viento con las funciones ofrecidas por la Hoja de Cálculo de Microsoft Excel en su librería matemática.
4. Para implementar el modelo físico, se desarrolló un software en lenguaje de programación Delphi 5.0 bajo plataforma Windows, que permitió el acceso directo a la base de datos central y escribir el código fuente para generar el algoritmo de cálculo, así:
 - Con la conexión del software diseñado a la base de datos, se realizaron consultas a través del lenguaje SQL (Structured Query Language) para obtener los promedios, las desviaciones estándar y los sesgos sobre el campo de la velocidad del viento.
 - El modelo físico desarrollado tiene involucrado un algoritmo de corrección

horizontal del viento por orografía deducido de forma similar al realizado por el modelo meteorológico de mesoescala MM5 (Mesoscale Model Version 5) en su módulo INTERP (Interpolación Vertical). Además, incluyó la ecuación del perfil vertical del viento diseñado por Lysen, la cual hace parte del algoritmo de la ecuación de densidad de energía a distintas alturas y, teniendo en cuenta que en dicha ecuación, la densidad de energía eólica, también necesitó el cálculo de la densidad del aire, se escribió dentro de la formulación la ecuación de estado de gases ideales, la cual es función de la temperatura del aire y la presión atmosférica. Estas dos últimas ecuaciones fueron modeladas del estado base hidrostático del MM5 y calibradas con información promedio de la línea base 1961-1990, a través de regresiones lineales para cada uno de los meses.

- Desde el aplicativo de Delphi 5.0 y con los resultados obtenidos, se generaron archivos de entrada para el software SURFER con el fin de que se hicieran mapas de forma automatizada, permitiendo así varias corridas, correcciones y validaciones a los resultados. La ventaja de trabajar con SURFER radica en que permite manipular resoluciones espaciales, decidir opciones en los métodos de interpolación y hacer trazados de líneas de corriente para viento, facilitando un tratamiento vectorial de dicha variable meteorológica, tal como se muestra en el Anexo 4.
5. Con la metodología descrita en el punto 4, las imágenes ráster que se generaron en el Software SURFER a una resolución de 10X10 kilómetros, se visualizaron en Arc-Map ArcView 9 en una escala 1:7.000.000 y se obtuvieron los resultados que se presentan en los capítulos I, II, III y V.
 6. Para la preparación del capítulo IV, se incluyó dentro del software desarrollado en Delphi 5.0 un procedimiento que permitió el cálculo y la graficación bajo SURFER de

los promedios horarios para los 12 meses del año en 111 estaciones meteorológicas, de las cuales se seleccionaron 16 lugares de Colombia donde el viento es significativo y puede ser aprovechable la energía eólica en algunos periodos del año y/o en determinadas horas del día. Estos gráficos están acompañados de la rosa de viento característica, la cual permite visualizar las direcciones más persistentes de donde sopla el viento. Para la elaboración de dichas rosas de vientos, el algoritmo suministró las tablas de frecuencia y de porcentajes de 8 direcciones de donde sopla el viento para 13 intervalos de velocidades.

Resultados

Con el trabajo realizado, el Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia suministra una aproximación de la disponibilidad del recurso energético del viento, así como un conocimiento de la circulación general de los vientos en Colombia, teniendo en cuenta los siguientes aportes:

- Mapas de velocidad del viento, densidad de energía eólica a 20 y 50 metros de altura sobre el territorio colombiano que permiten identificar lugares donde se pueden aportar soluciones energéticas apoyadas por el viento, con aplicaciones útiles en el sector industrial y eléctrico a fin de ayudar a emplear racionalmente los recursos naturales. Asimismo, se cuenta con resultados de las características estadísticas del viento como la desviación estándar y el sesgo.
- Localmente se identificaron 16 lugares, como puntos de referencia, donde el recurso natural viento puede ser aprovechado en determinadas épocas del año y en algunas horas del día.
- Actualización de la base de datos de dirección y velocidad del viento con información altamente calificada: variable importante para el dimensionamiento de sistemas y tecnologías que aprovechan este recurso como aerogeneradores eléctricos, molinos para bombeo de agua, entre otros.

- Aplicación de métodos de complementación de datos de viento a través de modelos ARIMA en el caso temporal y a través de modelación física para el caso espacial. Con los modelos ARIMA se obtuvieron series de tiempo para dirección y velocidad del viento, los cuales permitieron hacer análisis de distribución horaria y frecuencias de velocidades de viento a nivel horario y a través del año. Con el modelo físico se logró la base teórica de la distribución espacial del viento y sus variaciones en el flujo caracterizadas por su dirección.
- Aplicación de distintos tipos de distribución de probabilidades para la velocidad del viento.
- Disponibilidad de información energética para analizar y planear proyectos de energía eólica.
- Elaboración de documentos anexos como referencia de consulta en temáticas relacionadas con principios físicos del viento, instrumentación en la medición del viento, series de tiempo y distribuciones de probabilidad, junto con modelación física del viento y la energía.
- Disponibilidad del viento como fuente renovable de energía y como variable dinámica para estudios que explican la ocurrencia de fenómenos meteorológicos como la precipitación y en el seguimiento de la dispersión de contaminantes y la calidad del aire.

Conclusiones

- Las isotacas del Capítulo I e isovelas que se presentan en el Anexo 4 fueron trazadas con los datos de la red de anemógrafos e información internacional comprendida para el periodo 1980-2000, lo cual permitió establecer una visión general de la distribución del recurso eólico en el país.
- El análisis espacial mostró que en algunos sectores de Colombia prevalecen vientos con intensidades iguales o superiores a 5 m/s y persistentes a lo largo del año. Por lo tanto, existe un buen potencial de energía eólica a

lo largo de la península de La Guajira, Isla de San Andrés, sectores de Boyacá y, centro del litoral Caribe en el departamento de Bolívar. No obstante, en otros sectores del país, aunque no se presenta la misma persistencia de vientos en el ciclo anual, sí la hay para una determinada época del año especialmente en zonas de Norte de Santander, límites entre Risaralda, Quindío y Tolima, límites entre Cundinamarca y Boyacá, límites entre Cundinamarca, Tolima y Huila sobre la Región Andina, así como sobre el Piedemonte Llanero y Casanare para los Llanos Orientales.

- Localmente, se destacaron 16 lugares de Colombia donde las intensidades del viento son importantes para el aprovechamiento del recurso eólico. 3 sitios donde los vientos son persistentes y superiores a 5m/s durante todo el año: Galerazamba en el Departamento de Bolívar, Gachaneca en Boyacá y la isla de San Andrés en el mar Caribe colombiano. 3 sitios donde las velocidades son persistentes pero en el rango entre los 4 y 5m/s: La Legiosa en el Huila, Isla de Providencia en el Mar Caribe y Riohacha en La Guajira. Los restantes 10 lugares no guardan una gran persistencia en la velocidad del viento excepto para determinadas épocas y/u horas del año como son: Villacarmen en Boyacá, Obonuco en Nariño, Cúcuta y Ábrego en Norte de Santander, Urrao en Antioquia, Soledad en Atlántico, Santa Marta en Magdalena, Bucaramanga en Santander, Anchique en Tolima y Bogotá en Cundinamarca.
- La intercomparación entre los datos medidos por el anemómetro ultrasónico triaxial, tomada como patrón de referencia debido a su alto grado de precisión, con los datos suministrados por una estación anemográfica convencional, permitió ver que los errores de medición son del orden de ± 0.1 m/s, lo que repercute teóricamente en incertidumbres para el cálculo de la densidad de energía eólica así: superiores al 30% cuando los vientos son menores o iguales a 1.5 m/s, 18% para vientos alrededor de los 3.5 m/s, 16% si los vientos son cercanos a 5 m/s y menores del 13%,

cuando los vientos son intensos y superiores a 10 m/s.

- El presente trabajo es una base técnica y científica útil en disciplinas como la ingeniería mecánica y energética, la arquitectura y estudios ambientales, entre otros.

Recomendaciones

- Es aconsejable para la realización de estudios particulares conocer rigurosamente la intensidad de los vientos en dicha región, ya que los resultados presentados en este Atlas son una referencia nacional, pues la variabilidad de la dirección y la velocidad del viento en superficie, es un caso que le compete a la rama de la micrometeorología y la pobre densidad de 111 estaciones que miden viento junto con la complicada orografía colombiana, no permite obtener cálculos muy exactos en sitios alejados de las estaciones de referencia.
- Considerando las 111 estaciones para la medición del viento, se hace necesario aumentar el número de estaciones en todo el país pero especialmente sobre los Llanos orientales y la Amazonia, contar con torres meteorológicas que suministren datos meteorológicos al menos hasta 50 metros de altura o contar con radiosondas cautivos que permitan observar perfiles verticales de vientos con el fin de ajustar los modelos ya existentes o, en su defecto, desarrollar uno propio para Colombia.
- Se requiere mejorar el modelamiento espacial del viento en superficie, teniendo en cuenta que este depende de diferentes procesos físicos interrelacionados con fenómenos que ocurren en los distintos niveles de la atmósfera como la radiación, la microfísica de nubes, procesos de capa límite planetaria, balances energéticos y de características del suelo como la topografía, la rugosidad, el albedo, etc. Por lo tanto, es importante contar con modelos que involucren dichos procesos de mesoescala bajo una atmósfera dominada mayormente por movimientos ascendentes del aire conocidos como convección dentro de la Celda Ascendente de

Hadley. Esto, por su parte, involucra costosa tecnología de alto rendimiento, como la construcción de cluster de computadores para correr procesos en paralelo, alta capacidad de almacenamiento tanto de datos de entrada y salida y, por supuesto, años de experimentación en investigación.

- Completar trabajos posteriores con experimentación en laboratorio para fluidos tipo túnel de viento, los cuales permiten realizar análisis de representatividad en la modelación física y aporta información detallada para conocer la influencia de modificaciones en el entorno de las estaciones meteorológicas.
- Mantener el control de calidad que se ha establecido en el proceso de evaluación, captura y verificación de información con el fin de actualizar en el futuro cercano las evaluaciones del potencial eólico en el país.
- Para este tipo de investigaciones, resulta necesario establecer una política de gestión de la información meteorológica con fines energéticos.
- Hacer partícipes a los ámbitos universitario e investigativo en la adquisición de conocimiento del modelamiento del viento para aportar mejoras al presente trabajo.

¿Cómo utilizar los mapas de viento y densidad de energía eólica?

Para ilustrar sobre el uso de los mapas de viento y energía hay que considerar lo siguiente:

1. Tener en cuenta que los resultados obtenidos son una aproximación de la realidad, en especial sobre los Llanos Orientales y la Amazonia colombiana donde la red de estaciones de viento es de poca densidad, lo que afecta sensiblemente los resultados de esta investigación y, por lo tanto, indica un acercamiento de lo que ocurre en estas zonas del territorio nacional.
2. Todos los valores son referidos en unidades de metro por segundo (m/s) para velocidad del viento y Watts por metro cuadrado (W/m^2) para la densidad de energía eólica en promedio mensual y anual.

3. En los mapas de viento en superficie del Capítulo I la velocidad fluctúa entre 0 y 11 m/s. Los vectores de la dirección del viento, que se presentan en las figuras 4-5, 4-6 y 4-7 del Anexo 4, indican **de dónde sopla el viento**, no hacia dónde va.
4. Los mapas de desviación estándar del viento del Capítulo II varían entre 0 y 5 m/s, indicando el grado de dispersión que tienen los datos alrededor de la media.
5. Los mapas de sesgo del Capítulo III representan el tercer momento estadístico del viento. Este valor adimensional oscila entre -10 y 20, de los cuales los valores positivos indican que, a pesar de que la mayor concentración de los datos se encuentra alrededor de los valores medios, el resto de los valores corresponde a vientos superiores, mientras que valores negativos indican que los valores medios de velocidad de viento son más persistentes y, por lo tanto, si mantienen cierta intensidad, habrá un mejor aprovechamiento del recurso viento para la generación de energía eólica.
6. Los gráficos del Capítulo IV presentan al lado izquierdo el promedio horario de la velocidad del viento en m/s, para 16 lugares del país, dejando en el eje horizontal los meses del año y en el eje vertical las 24 horas del día. Al lado derecho se muestran, para cada uno de los sitios, las rosas del viento con las frecuencias de donde sopla el viento en ocho direcciones:
 - N – Vientos procedentes del Norte
 - NE – Vientos procedentes del Noreste
 - E – Vientos procedentes del Este
 - SE – Vientos procedentes del Sureste
 - S – Vientos procedentes del Sur
 - SW – Vientos procedentes del Suroeste
 - W – Vientos procedentes del Oeste
 - NW – Vientos procedentes del Noroeste
7. Los mapas de densidad de energía del Capítulo V se encuentran en una escala entre 0 y 3.375 W/m², espaciados proporcionalmente mediante una relación del cálculo del viento elevado al cubo. Para estimar la potencia teórica de un aerogenerador conociendo el área del rotor, simplemente hay que multiplicar el dato ofrecido en los mapas por el área del aerogenerador, que es igual a πR^2 , donde R es el radio del aspa.