

VARIACIONES DEL POTENCIAL DE ENERGÍA EÓLICA EN EL NORTE DE VENEZUELA, EN EL SIGLO XXI, BAJO LAS CONDICIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

Rafael Rebolledo Wueffer^{1} y Lelys Bravo de Guenni²*

¹Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico, Centro de Procesamiento Digital de Imágenes, Caracas, Venezuela. ²Universidad Simón Bolívar, Centro de Estadística y Matemática Aplicada, Caracas, Venezuela.

*rebolledo.wueffer@gmail.com

RESUMEN

Muchas de las formas de energía renovable son ambientalmente dependientes y en consecuencia, son susceptibles al cambio climático. Este artículo evalúa fuentes de energía eólica en Venezuela frente a los efectos previstos del cambio climático para el siglo XXI; en él se reúnen los resultados más resaltantes sobre las proyecciones de cambio en la disponibilidad de los recursos energéticos asociados a esta forma de energía; y se construyen los mapas del potencial energético eólico según tales proyecciones climáticas. Todo ello basado en definiciones y condiciones de los Escenarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero (SRES, por sus siglas en inglés (*IPCC Special Report on Emission Scenarios*)) y la reducción de escala en las salidas de diversos Modelos de Circulación Global, vigentes para el AR4 (*IPCC Fourth assessment report*). De esta investigación se confirmó que el elevado potencial eólico de la región del golfo de Venezuela y el estado Falcón prevalecerá en el siglo XXI. También se identificaron buenos potenciales ubicados al sur de los llanos orientales venezolanos.

Palabras clave: Energía renovable, Potencial Eólico, Cambio Climático, Potencial Energético.

Variations of the wind energy potential in the Northern region of Venezuela, in the 21th century upon climate change

Abstract

Many forms of renewable energy are environmentally dependent, for this reason they are susceptible to the consequences of climate change. This article evaluates the sources of wind energy in the northern part of Venezuela, taking into account the predicted implications of climate change for the current century. The most important findings on predicted changes in the availability of wind energy are reported. Maps on wind energy potential are prepared according to future climate projections. All these projections are based on definitions and guidelines from the IPCC Special Report on Emission Scenarios presented in the 4th Assessment Report (AR4), and the downscaling of diverse General Circulation Models in the region of study. This research confirmed that high wind potential in the region of the Gulf of Venezuela and Falcón state, will prevail along the 21th century. The results suggested good wind energy potentials in the Venezuelan south-east plains.

Keywords: Renewable Energy, Wind Potential, Climate Change, Energy Potential.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo e impulso de nuevas formas de energía renovable como alternativa a la producción de energía basada en la quema de combustibles fósiles, implica la redefinición de la matriz energética con criterios de sustentabilidad, para entre otras cosas reducir las emisiones de gases efectos invernadero (Labandeira *y col.*, 2012). Venezuela tiene un gran potencial de energías renovables cuyo aprovechamiento podría llegar a complementar el sistema energético actual e incluso sustituirlo en el largo plazo (Posso, 2004). Aunque Venezuela tenga entre sus mejores opciones la energía eólica, es necesario considerar que esta forma de energía está influenciada por diversos factores ambientales: viento, temperatura, humedad, presión y tormentas eléctricas (Trivedi, 1999). De este modo, los cambios que experimenta el clima a mediano y largo plazo, juegan un papel fundamental en el desempeño de este tipo de energía.

Ante esta situación, resulta limitado plantear un modelo de Desarrollo Sustentable, sujeto a formas de energías renovables, sin considerar su dependencia climática. Rodríguez y Escorche (2009) plantearon una primera aproximación a este planteamiento, evaluando el potencial energético en términos de la velocidad media del viento. Desde entonces poco se ha hecho en materia prospectiva. Este artículo presenta los aspectos más resaltantes que, en materia de variación del potencial energético eólico, se experimentarían en el futuro, considerando las condiciones de los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero y las salidas proyectadas por los modelos de circulación general para distintos periodos del siglo XXI. Producto de la discusión de los resultado, se plantean diversos escenarios de aprovechamiento eólico y se proponen investigaciones futuras.

MATERIALES Y MÉTODOS

(1) Descripción de los datos utilizados en este estudio.

(1.1) **Modelos Climáticos de Circulación Global.** Los modelos climáticos de circulación global, también conocidos como modelos de circulación general (MCG), son modelos espacio-temporales que representan los principales procesos físicos del clima en el planeta y sus interacciones con los demás componentes ambientales. Para momentos de la publicación del cuarto informe técnico del IPCC (AR4), el IPCC solo consideró 3 modelos de circulación global (http://www.ipcc-data.org/sim/gcm_clim/SRES_AR4/). Para efectos de este estudio se utilizaron las salidas del modelo inglés UKMO-HADCM3 y del modelo alemán MPIM-ECHAM5.

Se utilizaron las salidas de estos modelos, publicadas por el geoportal del Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria, conocido por sus siglas en inglés como CCAFS (Mitchel, 2001). Los datos espaciales proporcionados por el CCAFS, son de libre acceso y están proyectados esferoidalmente en grados decimales con datum y referencia global WGS84. El CCAFS ha procesado períodos mensuales en cuatro resoluciones espaciales diferentes para cuatro ventanas de tiempo o escenarios prospectivos durante el siglo XXI (centrados en los años 2030, 2050 y 2080). Es por ello que este estudio hace referencia a estos periodos de tiempo. En el caso de la variable velocidad media de viento, ésta es obtenida directamente del portal de datos CCAFS, y corresponde a la distribución espacial de su magnitud expresada en m/s, sin hacer referencia alguna a la dirección dominante en cada caso.

(1.2) Datos Locales Observados. Con la finalidad de validar los MCGs seleccionados para este estudio, se utilizaron datos locales de registros oficiales del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Venezuela (INAMEH, 2011), publicados en el Sistema Nacional de Información Hidrológica y Meteorológica (SINAIHME) en el año 2004. Los datos provienen de las estaciones meteorológicas del INAMEH, incluidas en la Tabla 1, y consisten de promedios mensuales para cada año de observación. Se recopilaron datos de 57 estaciones, de las cuales, 55 se ubican al norte del río Orinoco. Como primer paso en el análisis espacial, se obtienen los estadísticos muestrales, tales como promedio y desviación estándar (Viloria, 2012). A los efectos de este trabajo, y siguiendo las recomendaciones de Bañuelos-Ruedas (2008), se ha utilizado la variable velocidad media mensual del viento a 10 metros de altura como indicador alternativo del potencial de energía eólica; al respecto. La Tabla 2 muestra, de manera condensada, los principales indicadores estadísticos de cada grupo de los datos en cuestión. A partir de los datos de estas 57 estaciones y aplicando métodos geo-estadísticos se construyó la línea base del estudio. La línea base del estudio es un conjunto de superficies climáticas mensuales que se generan de registros climatológicos de un periodo histórico común (en este caso 1980 al 2000). Los criterios utilizados para la generación de estas superficies climáticas se basan en la estimación de valores no observados que maximicen la capacidad predictiva en los datos observados (Bravo *y col.*, 2005).

(2) Metodología para la estimación del potencial energético eólico. Para estimar la variación del potencial energético eólico en Venezuela para el siglo XXI se diseñó un procedimiento donde se destacan cuatro procesos metodológicos: (1) Comparación retrospectiva; (2) Evaluación de la calidad de los datos; (3) Estimación de velocidad media del viento y (4) Estimación de la densidad del aire derivada de otras variables climatológicas como la temperatura. La construcción de escenarios de estudio consiste en la determinación de escenarios

energéticos estimados para el siglo XXI, y la estimación de las variaciones del potencial energético. La Figura 1 muestra el modelo conceptual y los componentes de cada proceso en particular, así como también la manera en que estos se vinculan entre sí. Seguidamente se presentan algunos detalles de los procedimientos correspondientes.

Tabla 1. Registros de velocidad media de viento de estaciones del SINAHIME.

NOMBRE	Velocidad media del viento											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
BARCELONA	9,80	10,70	13,10	11,30	10,50	8,40	7,80	7,90	8,30	8,40	8,30	8,70
EL TIGRE-CIA-GUANIPA	19,50	21,20	22,10	21,70	20,00	17,60	14,90	13,00	13,30	13,70	15,90	17,40
MUSINACIO	13,80	14,90	15,30	13,80	10,90	9,60	8,90	8,10	8,20	8,70	10,40	12,30
GUASDUALITO	7,70	8,30	8,40	7,90	5,80	5,40	5,00	4,30	4,80	5,20	5,80	6,80
MANTECAL	7,70	8,60	8,10	10,60	7,80	7,30	6,90	4,30	7,30	6,50	9,00	11,90
ELORZA	11,10	12,00	11,50	7,70	5,60	5,20	5,00	5,00	5,00	5,90	7,20	10,10
BRUZUAL	10,30	11,50	11,00	9,00	6,60	6,30	6,40	5,70	5,50	5,60	6,70	8,90
HATO URANON	16,30	15,70	17,10	13,80	7,80	6,40	6,40	6,40	7,20	7,60	9,30	15,30
SAN FERNANDO AEROPUERTO	14,00	15,50	14,80	12,30	9,00	8,40	8,30	7,70	7,50	8,40	10,30	11,60
COLONIA TOVAR	3,50	3,30	3,50	3,10	2,90	3,20	2,90	2,60	2,60	2,40	2,80	3,00
MARACAY BASE AEREA	4,90	5,10	5,60	5,00	4,50	4,60	4,30	3,90	3,90	3,80	4,00	4,20
SANTA CRUZ EDAFOLÓGICA	10,60	11,30	11,90	9,50	7,60	7,10	6,60	5,90	5,30	5,70	5,80	8,50
EMBALSE DE CAMATAGUA	9,00	9,00	10,00	8,00	5,00	4,00	0,00	0,00	10,80	14,40	18,00	7,00
CARRIZAL B.A.	10,30	11,80	12,10	11,20	8,30	7,00	6,20	5,70	5,60	6,00	6,80	8,50
BARINAS AEROPUERTO	8,60	9,80	9,50	9,10	8,00	7,30	7,60	7,20	7,70	7,30	8,30	8,10
SANTA ELENA DE UAIREN AEROPUERTO	6,00	6,50	6,50	5,90	5,00	4,80	4,80	4,90	5,00	5,20	5,20	5,50
TUMEREMO AEROPUERTO	6,90	7,50	8,30	8,10	7,70	6,60	5,90	5,90	6,60	7,00	7,00	6,70
PUERTO CABELLO BASE NAVAL	10,50	12,20	12,70	11,20	9,20	8,90	9,10	7,10	6,50	6,10	6,70	8,80
SAN CARLOS UNELLEZ	3,90	4,60	4,70	4,40	3,80	3,60	3,20	3,50	3,10	3,00	3,00	3,10
TUCUPITA GRANJA	6,80	7,80	8,20	8,40	7,40	6,40	5,60	5,50	5,80	6,00	5,90	5,90
MAIQUETIA AEROPUERTO	7,50	8,60	8,70	8,50	7,70	7,90	7,40	6,70	6,20	5,80	6,10	6,50
MAMO-ESCUELA NAVAL	13,00	13,70	13,30	11,60	9,90	11,50	11,90	11,60	8,70	8,50	9,90	12,30
PUNTO FLJO OBSERVATORIO CAGIGAL	12,10	13,80	13,50	12,70	12,60	15,00	13,80	13,10	11,30	10,00	10,90	10,80
CORO	20,00	22,00	23,50	23,50	23,00	23,00	22,50	22,30	21,40	18,30	17,10	18,10
SAN JUAN DE LOS MORROS	6,50	7,00	7,20	6,30	5,10	5,10	4,90	4,40	4,30	4,10	4,60	5,30
RIO VERDE	12,00	12,70	12,70	10,10	8,30	8,10	7,40	6,70	7,10	7,60	8,30	9,70
BIOLOGICA DE LOS LLANOS	12,10	11,70	13,00	10,80	8,50	7,20	6,60	6,00	6,00	6,80	8,60	10,00
GUANAPTO	11,10	12,40	13,80	12,50	9,50	7,70	7,30	6,70	6,40	6,70	7,80	9,40
PRESA TAMANACO	12,30	12,50	13,30	11,80	9,10	8,30	6,40	5,70	5,90	6,60	8,50	10,20
VALLE DE LA PASCUA	13,40	14,50	15,40	14,50	12,30	10,50	9,30	8,40	8,70	9,40	10,80	12,20
MAYALITO-CUJIALOTE	10,10	11,10	11,30	11,20	9,00	7,40	6,50	5,80	5,60	6,10	7,20	8,40
MOROTURO	1,10	1,60	2,30	2,20	1,70	1,80	1,20	1,30	1,20	0,90	0,90	1,20
BARQUISIMETO	10,80	11,60	12,20	12,40	14,30	15,00	15,00	15,20	14,40	12,60	11,10	10,50
CARACAS LA CARLOTA	7,30	7,90	8,10	8,00	8,60	9,10	8,70	7,30	6,70	6,40	6,60	6,80
TEMBLADOR	11,40	12,60	13,80	14,30	12,80	10,70	9,00	8,40	8,90	9,40	9,90	10,40
MATURIN AEROPUERTO	11,10	12,00	12,50	12,20	10,90	9,20	8,20	7,50	8,00	8,80	9,10	10,20
PUNTA DE PIEDRAS	26,80	26,90	27,30	28,00	28,60	28,30	28,30	28,60	29,00	29,00	28,40	27,20
PORLAMAR AEROPUERTO	23,20	26,20	28,20	29,70	28,80	25,80	22,40	20,60	21,10	21,20	21,70	21,00
ACARIGUIA AEROPUERTO	6,70	7,50	7,80	6,00	4,20	3,50	3,40	3,50	3,40	3,70	4,30	5,30
BANCO DE LOS CEDROS	6,30	6,30	6,70	5,70	5,00	5,00	4,50	4,40	4,80	5,30	5,80	5,80
GUANARE AEROPUERTO	7,20	8,10	8,10	7,40	7,00	6,50	6,10	6,00	6,00	6,00	6,10	6,30
MESA DE CAVACAS	4,10	4,70	5,10	4,90	4,70	3,60	3,20	3,10	3,30	3,60	3,30	3,50
GUIRIA AEROPUERTO	5,20	5,40	6,50	7,10	7,00	6,00	5,20	4,40	4,70	4,90	4,40	4,40
CARUPANO	6,40	7,10	7,90	7,90	7,30	6,10	5,80	5,80	6,00	5,70	6,20	6,40
CARIACO	8,10	10,00	12,00	13,20	13,90	10,70	8,70	8,10	8,60	8,80	8,30	7,20

CUMANA UDO	15,00	16,20	16,70	15,40	13,80	13,50	12,10	10,60	10,10	10,30	11,50	13,10
CUMANA AEROPUERTO	19,60	20,30	21,20	20,40	18,40	17,40	13,90	9,60	8,60	8,40	11,70	16,40
SANTO DOMINGO DEL TACHIRA B.A. 1	4,40	5,10	5,50	4,30	4,50	4,50	4,70	4,80	5,00	4,80	4,60	4,10
HACIENDA BETANIA	6,60	6,50	6,10	4,50	5,00	5,60	6,10	6,40	5,90	5,40	5,50	6,00
SANTO DOMINGA DEL TACHIRA B.A. 2	7,50	7,30	7,60	7,90	13,50	19,30	22,20	20,70	17,20	10,30	7,10	6,90
EL ZUMBADOR	10,10	12,80	10,20	14,20	15,20	17,20	16,50	16,70	13,10	10,90	8,30	9,40
GUARABAO	15,80	17,60	19,20	16,50	12,00	10,30	9,20	9,00	8,30	10,40	10,60	14,00
SANTA BARBARA	3,60	4,10	4,20	4,20	4,00	4,10	4,20	4,20	4,30	4,00	3,90	4,00
BARRANQUITAS	5,40	5,80	5,60	4,20	5,30	3,20	2,80	3,40	3,60	4,70	3,20	4,50
MACHIQUES GRANJA MAC	7,10	8,30	8,60	7,10	5,40	5,70	6,20	5,90	5,40	5,30	5,50	7,60
MANUELOTE	10,20	10,70	11,60	10,50	8,70	9,10	10,00	9,10	8,20	6,60	7,50	8,70

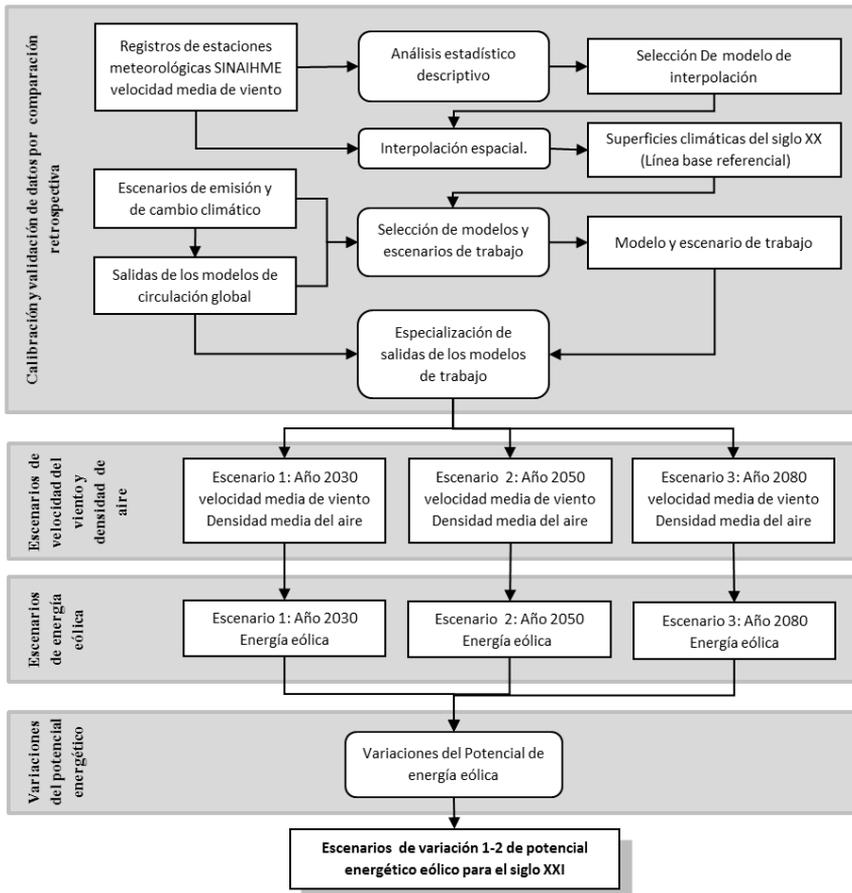


Figura 1. Esquema conceptual del procedimiento metodológico.

Tabla 2. Estadísticos de la velocidad media de viento (m/s).

MES	Máx.	Mín.	Moda	Pro.	Med.	SDv.	1er Crtil	3er Crtil	Curtósis
ENERO	26,80	1,10	11,10	10,14	9,80	5,34	6,63	12,10	4,23
FEBRERO	26,90	1,60	10,70	10,99	10,70	5,62	7,15	12,78	3,97
MARZO	28,20	2,30	8,10	11,45	11,00	5,91	7,65	13,45	4,07
ABRIL	29,70	2,20	7,90	10,68	9,50	5,96	7,10	12,75	4,81
MAYO	28,80	1,70	5,00	9,50	8,30	5,70	5,33	11,73	5,83
JUNIO	28,30	1,80	8,40	9,06	7,30	5,79	5,25	10,45	5,00
JULIO	28,30	0,00	6,40	8,57	6,60	5,74	5,00	9,18	5,32
AGOSTO	28,60	0,00	5,70	7,88	6,40	5,40	4,50	8,40	6,43
SEPTIEMBRE	29,00	1,20	5,00	7,86	6,50	4,98	5,00	8,60	8,20
OCTUBRE	29,00	0,90	8,40	7,72	6,60	4,60	5,30	8,80	10,44
NOVIEMBRE	28,40	0,90	8,30	8,25	7,20	4,79	5,57	9,90	7,72
DICIEMBRE	27,20	1,20	8,70	9,06	8,50	4,84	5,93	10,73	5,37

(2.1) **Comparación Retrospectiva.** El estudio de escenarios de cambio climático supone el utilizar modelos de circulación general distintos con proyecciones diferentes, pues cada uno de ellos utiliza distintas parametrizaciones y distintas condiciones de borde que actúan como forzamientos distintos. De allí que derivar escenarios prospectivos regionales de cualquier condición climática sea una tarea compleja, pues antes que nada, se hace necesario entender cuál modelo representa mejor las condiciones climáticas históricas (Acevedo, 2005). La semejanza retrospectiva constituye el criterio analítico para la búsqueda del modelo que mejor se adapte a la realidad local de Venezuela. Este criterio ya fue utilizado en la 1era Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (Martelo, 2003). La comparación retrospectiva consiste en cuantificar las diferencias entre los resultados retrospectivos de un MCG (experimento siglo XX) y los registros históricos producto de las observaciones locales (registros SINAHIME) para el mismo periodo. En la medida en que las simulaciones de un MCG del clima en el pasado sean similares a los datos climáticos históricos, en esa misma medida se espera que el modelo sea capaz de simular las proyecciones climáticas del futuro. Esto permite además seguir la premisa de establecer estrategias de calibración y validación de modelos ambientales (Clarke *y col.*, 2004).

La sistematización de la comparación retrospectiva se lleva a cabo mediante la implementación de dos enfoques diseñados especialmente para esta investigación: el enfoque descriptivo y enfoque espacio-temporal del fenómeno.

El primer enfoque analiza directamente los datos que representan tanto a la proyección retrospectiva del MCG como los que constituyen las observaciones locales, mediante dos procedimientos: (1) las diferencias individuales directas entre los datos correspondientes y (2) el análisis de dispersión entre ambos grupos de datos. Este segundo procedimiento verifica qué tan lejana esta la tendencia de la dispersión de los datos de la recta $y=x$ (la recta $y=x$ representaría condiciones de igualdad absoluta entre las estimaciones y las observaciones). El enfoque descriptivo de datos se lleva a cabo mediante la elaboración de dos gráficos: la serie de

posición y el diagrama de dispersión. La serie de posición superpone la secuencia de los 54 puntos de estudio para cada modelo (chequeo) y la referencia de estudio (control). El segundo gráfico es un diagrama de dispersión que relaciona el valor de cada uno de los 54 puntos según el modelo con el valor del mismo punto para la línea base de estudio. La Figura 2 es un ejemplo que ilustra los gráficos generados para el enfoque descriptivo de los datos.

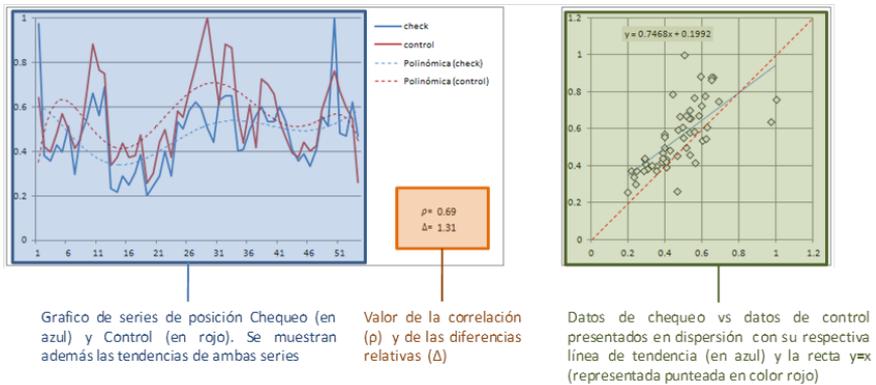


Figura 2. Enfoque descriptivo de los datos: Análisis comparativo de la línea base propuesta por cada modelo y la referencia de estudio desde SINAIHME.

El segundo enfoque valora la continuidad espacio-temporal del fenómeno representado tanto por las simulaciones como por las observaciones. Esto supone un análisis poco común que va más allá de lo meramente estadístico, por lo que es un aporte novedoso al análisis. Para este enfoque, se escoge un subconjunto de 14 estaciones a partir del conjunto original de 54 puntos. Con ellos se construyen series de tiempo donde se refleja el valor que cada punto toma (según cada modelo y línea base del estudio) durante los 12 meses del año. Se estudian las secuencias y las correlaciones que cada valor simulador tiene con respecto a la línea base, obteniéndose 12 diferencias relativas (ver Figura 3). Entendiendo que en condiciones ideales las salida del modelo debe describir el mismo comportamiento temporal de la línea base, la comparación se cuantifica de dos formas: la cuantificación de la Estrechez: Diferencia máxima absoluta entre la serie del modelo y la serie de la línea base, y cuantificación la Coherencia funcional: La orientación de las pendientes de los segmentos de ambas series.

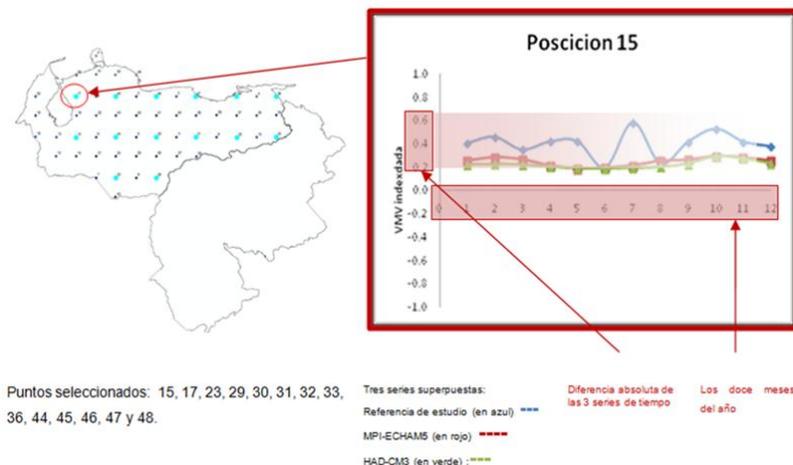


Figura 3. Ubicación geográfica de los sitios para el análisis de las series de tiempo.

(2.2) **Estimación de la Densidad del Aire.** La densidad del aire es un elemento determinante en la producción de energía eólica porque promueve el trabajo mecánico en los aerogeneradores. Siendo que la densidad del aire no es un valor constante, esta depende indirectamente de la temperatura, la presión y el contenido de humedad del aire. El Comité Internacional de Pesos y Medidas (CIPM), produjo una ecuación empírica que permite estimar la densidad del aire a partir de tales parámetros (la fórmula conocida como CIPM-1981/91). Aún cuando son pocas las investigaciones que consideran el efecto de la densidad del aire en la estimación de la energía eólica, esta debería ser tomada en cuenta sobre todo en países tropicales, ya que el aire suele ser menos denso que en altas latitudes. La fórmula CIPM-1981/91 (ecuación 1), fue propuesta ante el CIPM por P. Giacomo en 1982 y revisada y mejorada posteriormente por R. S. Davis en 1992).

$$\rho = \frac{p \cdot Ma}{Z \cdot R \cdot T} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{Mv}{Ma} \right) \right] \quad (1)$$

donde:

ρ : Densidad de aire en kg/m³

p : Presión atmosférica en Pa
 Ma : Masa molar de aire seco
 Z : Factor de compresibilidad

T : Temperatura termodinámica en °K
 R : Constante de los gases ideales
 x_v : Fracción molar de vapor de agua
 Mv : Masa molar de vapor de agua

Para estimar la densidad del aire en los escenarios prospectivos definidos para el siglo XXI (años 2030, 2050 y 2080), se incorporaron las salidas correspondientes a la temperatura y a la humedad relativa del

MCG seleccionado. Además se asumieron condiciones normales de presión atmosférica para la implementación de la fórmula CIPM-1981/91.

(2.3) **Estimación del Potencial Energético.** Según el Programa de las Naciones Unidas para la Estimación y Análisis de los Recursos Energéticos Eólico y Solar (conocido por sus siglas en inglés como SWERA), el indicador de potencial energético eólico es la densidad de potencia de viento, que es la potencia mecánica producida en un aerogenerador por unidad de superficie de aspas. El trabajo de Iannini y colaboradores (2009) es explícito en indicar cómo la velocidad media del viento y la densidad del aire interactúan para generar energía en aerogenerador. La ecuación 2 indica cómo se obtiene la densidad de potencia en función de la densidad del aire y la velocidad media del viento.

$$\frac{P}{A} = \frac{\rho A v^3}{2} \quad (2)$$

donde:

- P : es potencia de viento en vatios
- A : es el área de envergadura del molino de viento en m²
- v: es la velocidad del viento en m/s.
- ρ: es la densidad del aire en kg/m³

Para efectos de esta investigación y en el contexto geoespacial de un sistema de información geográfica (SIG), se desarrolló una rutina de álgebra de mapas ráster (de velocidad media de viento y densidad del aire), para implementar y evaluar la ecuación 2. La rutina de álgebra de mapas establece calcular el cubo del valor de cada píxel de mapa de velocidad de viento y multiplicarlo por 1/2 del valor del píxel del mapa de densidad de aire correspondiente a la misma ubicación geográfica.

(2.4) **Variación del Potencial Energético.** El criterio para evaluar el cambio de potencial energético durante el siglo XXI, se basa en la determinación de las diferencias entre la potencialidad de cada escenario futuro y las potencialidades futuras estimadas. Implementar este criterio en SIG, implica desarrollar una rutina en álgebra de mapas tal y como se hizo en el punto anterior, pero calculando una diferenciación progresiva de píxeles espacialmente coincidentes pero correspondiente a escenarios futuros distintos (ver ecuación 3).

$$VPe_{(1-0)} = \frac{P}{A}(t_1) - \frac{P}{A}(t_0) \quad (3)$$

donde:

- P/A (t₁): es el potencial energético en el escenario t₁
- P/A (t₀): es el potencial energético en el escenario t₀
- VPe (1-0): Variación del potencial energético entre escenarios futuros t₀ y t₁.

RESULTADOS

Análisis Retrospectivo. Dado que la estrategia de análisis retrospectivo se planteó en base a los dos enfoques planteados en la sección 2.1, su implementación produjo resultados en dos direcciones distintas:

Análisis Descriptivo. Para ambos modelos (UKMO-HADCM3 y MPIM-ECHAM5) en once de los doce meses del año se observa coherencia entre valores de control (referencia SINAHIME) y los valores de chequeo (salidas de los modelos de circulación global), lo cual confirma la pertinencia de los datos de referencia local para el análisis comparativo. El estudio de las tendencias respecto a la recta $y=x$ muestra resultados coherentes aun cuando en la mayoría de los casos la dispersión es significativamente alta (coeficiente de determinación de tendencia lineal inferior a 0,70), excepto el caso de los valores simulados por UKMO-HADCM3 para junio y agosto, donde la dispersión es ideal a fines comparativos.

Análisis Temporal del Fenómeno. En este estudio se confirma una anomalía alrededor del mes de julio, tal y como lo refleja el análisis descriptivo de los datos, observándose además un efecto transicional que para algunas localidades comienza desde el mes de abril y se prolonga hasta septiembre. Para los meses extremos (enero – febrero – marzo y octubre-noviembre y diciembre) se observa coherencia y estrechez entre las series de tiempo; también se observa coherencia de las tendencias de ambos modelos respecto a la tendencia de la referencia del estudio. Para ambos modelos el mes de julio presenta resultados incoherentes entre el chequeo y el control; tal situación sugiere la influencia del cambio estacional de temporada seca a lluviosa. Desde el punto de vista geográfico se identificó un patrón de resultados positivos asociado a la zona central del área de estudio y al eje centro-norte-costero. Las coherencias entre los modelos y la referencia de estudio fueron máximas en todos los meses del año.

Características del modelo seleccionado. Considerando los resultados del análisis comparativo, y las semejanzas desde una perspectiva general, el modelo escogido fue el HADCM3, pues ofreció un mejor ajuste a las características de la referencia de estudio que el modelo ECHAM5. En la Tabla 3 se presenta una descripción de las características principales de este modelo.

Tabla 3. Ficha de características principales del modelo UNKO-HAD-CM3.

Nombre	UNKO-HAD-CM3
Institución patrocinante	Hadley Centre for Climate Prediction and Research. Met Office. United Kingdom.
Fecha de publicación	2000
Referencias de publicación	Gordon, C., C. Cooper, C.A. Senior, H.T. Banks, J.M. Gregory, T.C. Johns, J.F.B. Mitchell and R.A. Wood, 2000. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. <i>Clim. Dyn.</i> , 16, 147-168. Pope, V., M.L. Gallani, P.R. Rowntree, R.A. Stratton, 2000, The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. <i>Clim Dyn</i> 16: 123-146.
Sensibilidad climática	0.89 Kw-1 m2 Slab 2xCO2.

Estimación de la densidad del aire expresado en mapas. La Figura 4 muestra los 36 mapas de densidad de aire producidos para los tres escenarios futuros de este estudio. Cada mapa representa la estimación del valor de densidad de aire proyectado en cada mes del año correspondiente al escenario futuro en cuestión (año 2030, año 2050 y año 2080).

En los mapas resultantes de las condiciones de la densidad del aire para los escenarios proyectados del siglo XXI, se aprecia claramente la relación entre las variaciones del relieve y la densidad del aire. De este modo se aprecia como el aire se hace más denso en zonas de mayor altitud y menos denso en zonas llanas. Este patrón se repite en todos los mapas resultantes, independientemente de los valores absolutos que se estiman para densidad de aire en cada uno de los escenarios planteados. Esta relación entre relieve y densidad del aire tiene a priori, dos vínculos claros: la dependencia de la densidad del aire de la temperatura y la presión; y a su vez la vinculación entre la hipsometría y las variaciones de presión y temperatura en el aire. Más allá de la persistencia de este patrón en todos los casos, existen aspectos particulares que destacan claramente. Aun cuando es de esperarse, la densidad del aire en la franja llanera es baja, pero es relativamente menor a la de la franja norte costera, durante todo año. Esta diferencia puede deberse a la influencia del contenido de humedad en el aire. Del mismo modo, era de esperar que las regiones andinas contaran con un aire más denso en las estimaciones; sin embargo la diferencia en la densidad de aire llanero y andino no es muy alta, en el peor de los casos se tiene una diferencia absoluta de alrededor del 10%.

Mapas de velocidad media del viento. Las Figuras 4, 5 y 6 muestran respectivamente, las estimaciones de la distribución espacial de la velocidad del viento expresada en metros por segundo para los doce meses de los escenarios de estudio años 2030, 2050 y 2080.

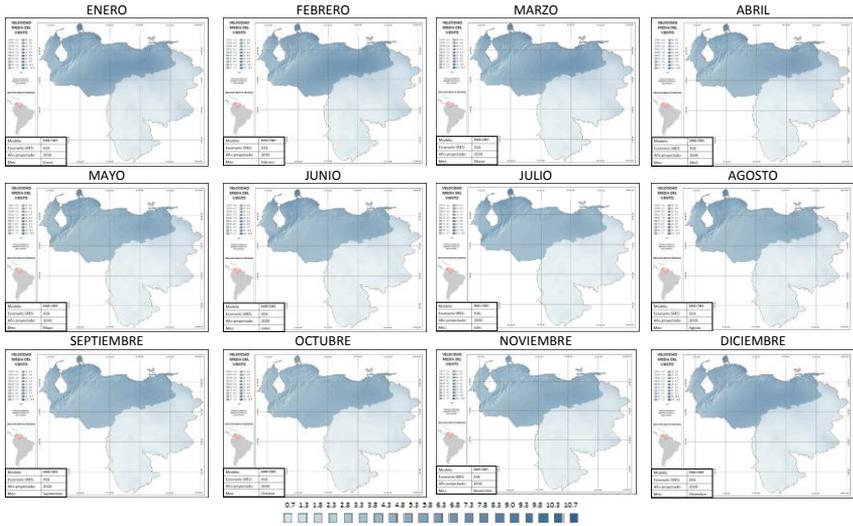


Figura 4. Mapas de velocidad media del viento en m/s estimados para cada mes del escenario de estudio año 2030.

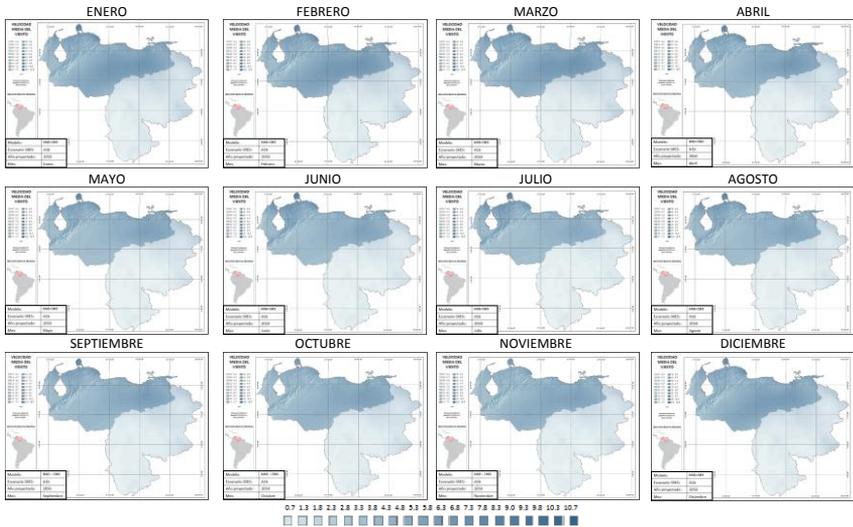


Figura 5. Mapas de velocidad media del viento en m/s estimados para cada mes del escenario de estudio año 2050.

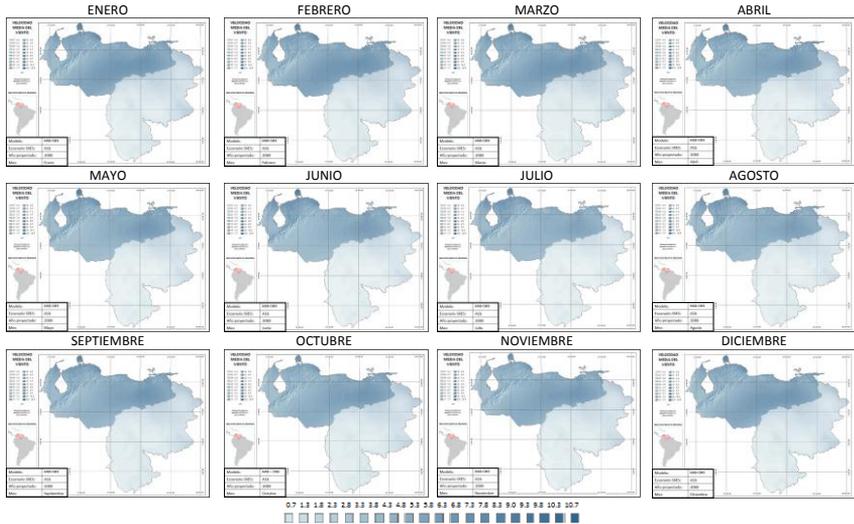


Figura 6. Mapas de velocidad media del viento en m/s estimados para cada mes del escenario de estudio año 2080.

Mapas de potencial de energía eólica. Los mapas de potencial energético se generan a partir de los mapas del recurso ambiental asociado a la producción de energía eólica. En el caso de la energía eólica, estos recursos ambientales lo constituyen tanto la velocidad del viento como la densidad del aire (ver ecuación 2). Los mapas de potencial energético se plantean en términos de la capacidad de producir energía mecánica en las aspas de los aerogeneradores; de allí que se mida en unidades de densidad de potencia (W/m^2 , potencia por unidad de área), entendiéndose que en el caso de la energía eólica estas unidades de área se refieren a la que produce la envergadura de las aspas de un aerogenerador en marcha, y no a las unidades de superficie. Por cada escenario de estudio (años 2030, 2050 y 2080) se producen mapas mensuales que en conjunto dan un panorama de cómo se estima el potencial energético en ese momento específico. De este modo se generaron los 36 mapas del potencial de energía eólica a escala 1:7.000.000, para los tres escenarios de estudio. Las Figuras 7, 8, 9 y 10 muestran la distribución espacial del potencial de energía eólica tanto para la referencia del siglo XX (línea base de este estudio) como para las estimaciones futuras de los tres escenarios de estudio (años 2030, 2050 y 2080).

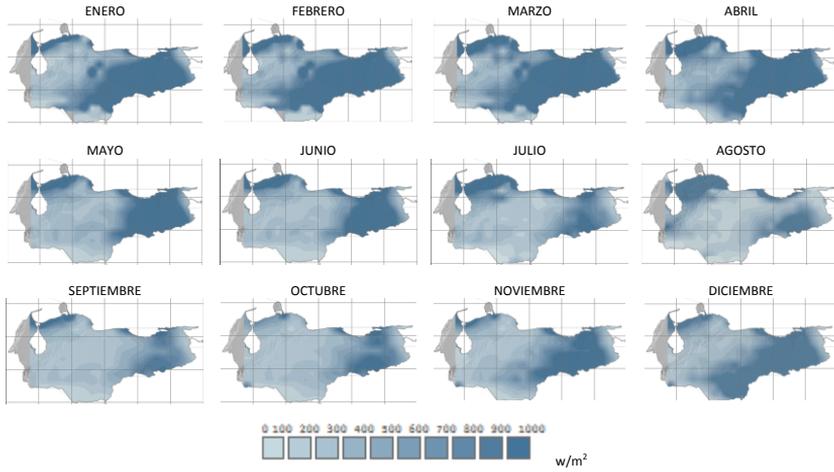


Figura 7. Distribución espacial de densidad de potencia de viento estimada para la referencia siglo XX.

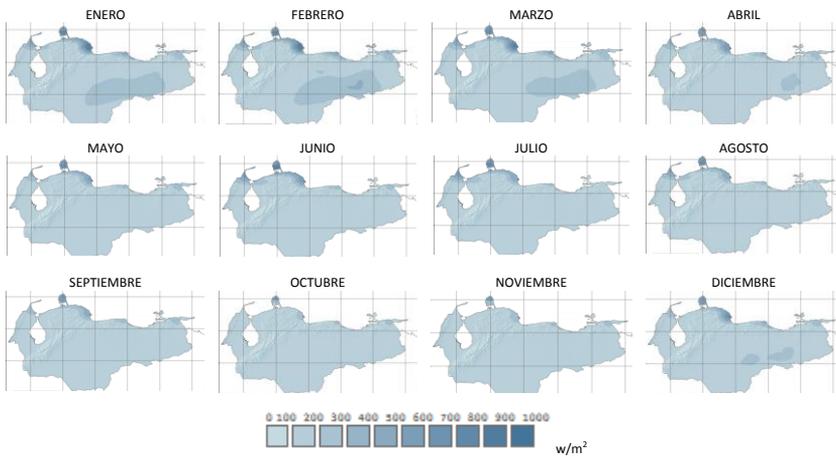


Figura 8. Distribución espacial de densidad de potencia de viento estimada para el escenario 2030.

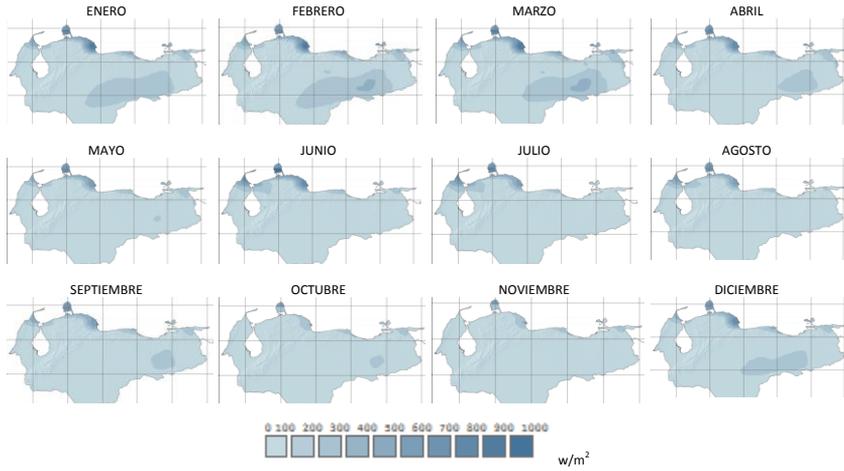


Figura 9. Distribución espacial de densidad de potencia de viento estimada para el escenario 2050.

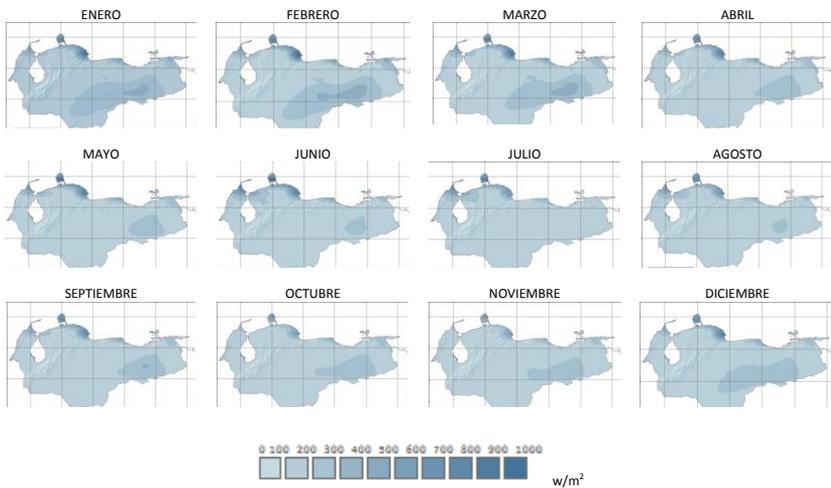


Figura 10. Distribución espacial de densidad de potencia de viento estimada para el escenario 2080.

Mapas de variación del potencial energético. Asumiendo condiciones normales entre cada escenario de estudio, se pueden generar los mapas de variación del potencial energético eólico como la diferencia absoluta de los valores de potencial que asume cada celda representativa de una localidad geográfica, entre un escenario y otro. Incrementos del potencial energético se identifican con diferencias positivas y las pérdidas de potencial energético están representadas por diferencias negativas. Las variaciones del potencial energético eólico se representan nominalmente, por lo que se expresan en unidades de densidad de potencia (W/m^2). Las Figuras 11 y 12 muestran la distribución espacial de las variaciones del potencial energético mensual entre los escenarios de estudio en W/m^2 . Asimismo, las condiciones de normalidad permiten establecer modelos de la dinámica de la variación del potencial energético.

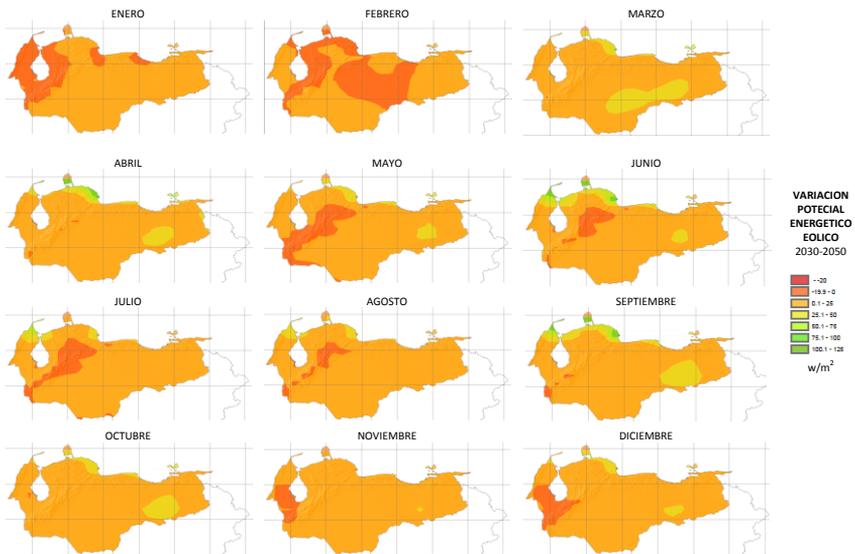


Figura 11. Distribución espacial de las variaciones de la densidad de potencia de viento entre los años 2030 y 2050.

El criterio base del análisis de la dinámica de la variación del potencial energético considera un crecimiento lineal de la variación de potencial energético. Esta situación se corrobora cuando se estudia el comportamiento de la tasa de variación intermensual del potencial energético a partir de cada estimación mensual; de este modo se logra una referencia objetiva sobre la dinámica de las variaciones en los períodos comprendidos entre escenarios de estudio, y se puede establecer una tasa

de variación para cada mes a lo largo del siglo XXI, más allá de las situaciones estimadas para cada escenario en particular. Observando los resultados expuestos en la Figura 12, se demuestra que para mediados del siglo XXI (2030-2050) se experimentarían disminuciones localizadas del potencial energético, aun cuando, en general se esperan más incrementos que pérdidas de densidad de potencia del viento. La mayoría de esos incrementos esperados son inferiores a 25 W/m², que equivalen alrededor del 5% de la densidad de potencia promedio esperada para el año 2030. La máxima diferencia observada es cercana a los 125 W/m², que equivalen a un incremento de aproximadamente el 25%. La pérdida de potencia estimada para este periodo es inferior al 4%. Del análisis de los resultados presentados en la Figura 13 se puede inferir que para finales de siglo, las tendencias de mediados de siglo se acentúan tanto en magnitud como en cobertura espacial; esto quiere decir que se esperaran más incrementos del potencial energético y de mayor intensidad, mientras que las disminuciones del potencial serán menores y más localizadas. La mayoría de esos incrementos son inferiores a 25 W/m²; aun cuando los incrementos por encima de los 50 W/m² son superiores al 25% del promedio para la superficie de estudio. La máxima diferencia observada es cercana a los 200 W/m², que equivalen a un incremento de aproximadamente el 40% del promedio. Para el caso de las pérdidas, las disminuciones aun cuando son localizadas, se incrementan respecto al periodo anterior pero continúan siendo menores al 4%.

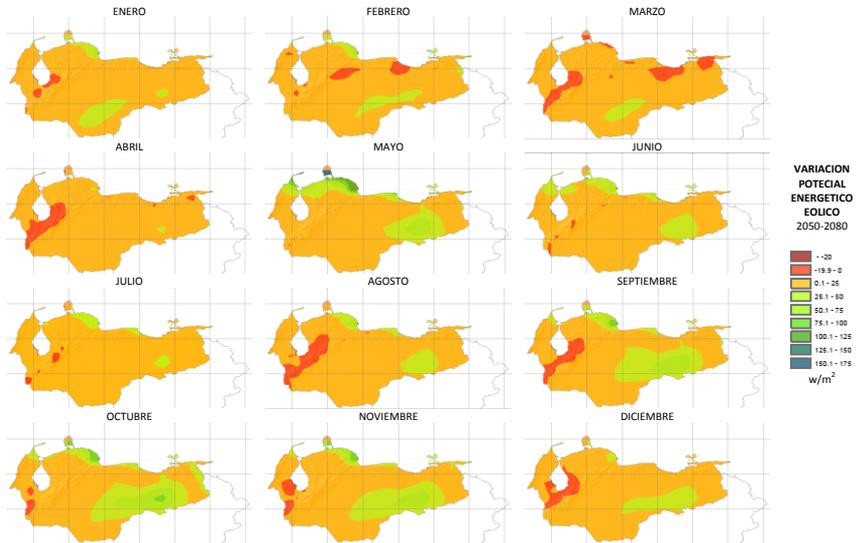


Figura 12. Distribución espacial de las variaciones de la densidad de potencia de viento entre los años 2050 y 2080.

DISCUSIÓN

Rol de la Densidad del Aire. El trimestre diciembre- enero- febrero suele ser el periodo donde el aire es más denso; casualmente, por lo regular, son estos los meses más fríos del año para Venezuela. Aun cuando este comportamiento se repite en todos los escenarios, se espera una reducción relativa generalizada de la densidad de aire a lo largo del siglo XXI. Dicha reducción se puede estimar entre el 16 y el 20% aproximadamente. A pesar de la relativamente baja influencia que la densidad del aire tiene en la estimación de la densidad de potencia respecto a la velocidad; se espera que esta disminución afecte la capacidad de generar trabajo mecánico del viento, promoviendo pérdidas de energía, sobre todo en zonas donde el potencial energético es mayor, pues es justamente allí donde la disminución de la densidad de aire se experimentará en mayor medida.

Consideraciones sobre el Potencial Energético. Para cada uno de los tres escenarios planteados para este estudio, los resultados demostraron un patrón espacial donde destaca el predominio de valores de alta densidad de potencia de viento a lo largo del año en la franja costera especialmente la costa oriental del estado Falcón, la península de Paraguaná y la región de Sinamaica - La Goajira venezolana. Además de ello, destaca un potencial energético relativamente alto en los llanos orientales. Según esto, se puede inferir que los potenciales de producción eólica son favorables, a pesar de la disminución proyectada en la densidad del aire a lo largo del siglo. Ello confirma la poca influencia que tiene la variación de la densidad del aire en el potencial energético eólico.

Análisis de la Variación del Potencial Eólico. Análisis en términos de magnitud: Al analizar los resultados, se puede inferir que Venezuela experimentará un incremento generalizado con pocas disminuciones de potencial energético eólico mensual a lo largo del siglo XXI; siendo mayores los incrementos en los meses de marzo, abril, septiembre y octubre. Para el último tercio del siglo XXI se espera que las tendencias de aumento del potencial energético se aceleren. Análisis generalizado en términos territoriales: Desde el punto de vista espacial, se experimentará una expansión generalizada de los recursos eólicos durante el siglo XXI, sobre todo en la región sur los llanos orientales que se perfila como un nuevo polo de potencial energético. El análisis también confirmó la existencia de un patrón de concentración de picos, asociados a las mismas localidades geográficas para cada uno de los escenarios contemplados en este estudio. En función a esto se logran identificar dos regiones favorables: una al noroeste del área de estudio, comprendiendo gran parte del estado Falcón y el norte del estado Zulia, y la otra al sureste del área de estudio, al sur de los estados Anzoátegui y Monagas, tal como se muestra en el mapa de la Figura 14. Análisis generalizado en términos temporales: El estudio del comportamiento de la variación intermensual del potencial energético demostró un incremento prácticamente lineal progresivo de las tasas de

variación todos los meses del año, lo que permite extrapolar estas tendencias intermensuales para todo el siglo en base a una tasa de variación única para cada mes.

El hecho de que todas las tendencias intermensuales tuviesen la misma orientación y pendientes similares, permite la generalización de las tendencias en un valor anualizado que es representativo de la dinámica de variación del potencial energético eólico sin muchas limitaciones. Como toda generalización, la construcción de una curva anualizada es menos precisa que los resultados mensuales, pero facilita el análisis al obtenerse una sola tendencia que caracterice el potencial energético eólico durante el siglo XXI. La Figura 15 muestra la dinámica temporal de la variación energética eólica anualizada para todo el siglo XXI.

Considerando la representatividad de la tendencia, y con base en la presunción de progresividad lineal de la variación del potencial energético, y teniendo en cuenta además la desviación estándar de estas estimaciones, este estudio plantea una región de resultados donde cualquier escenario es posible. En función a esto, para el primer periodo se estima un incremento promedio sostenido 610 W/m^2 por año. En el último periodo, el incremento estimado comenzará a desacelerarse al punto de que en condiciones promedio se proyecta una tasa de variación máxima de 528 W/m^2 por año. La franja-solución permite generar infinitos escenarios de la dinámica de variación del potencial, en condiciones ideales (un escenario que contemple solo incrementos sostenidos) plantea una tasa de incremento de potencial anual que se encuentra entre los 104 W/m^2 por año y los 165 W/m^2 por año, para todo el siglo.

CONCLUSIONES

Este estudio incluye diversos planteamientos metodológicos que aseguran la robustez en el alcance de los resultados. He aquí algunos de ellos: (1) Las condiciones de los escenarios de cambio climático, y sus salidas en diversos modelos de circulación general, (2) La linealidad en la variación del potencial energético para la determinación de las tasas de incremento del potencial.

Dentro de estas limitaciones, se implementaron diversas estrategias para la estimación de parámetros relevantes para este estudio, entre ellas se destacan: (1) La propuesta de calibración y validación de los modelos de circulación global basada en comparación retrospectiva evaluada en dos enfoques (análisis descriptivo de datos y análisis espacio-temporal), (2) La estimación de la densidad de aire, y su influencia en el potencial energético, (3) La estrategia de identificación de regiones geográficas favorables para el desarrollo del potencial energético en base a la

abundancia del recurso natural asociado, la consistencia temporal y la concentración espacial del recurso.

A pesar del efecto adverso que el cambio climático pareciera tener en la densidad del aire y en su capacidad para generar trabajo mecánico, el incremento del potencial energético eólico a lo largo del siglo XXI se plantea como una firme posibilidad. Esto lo confirma la curva anualizada de variación del potencial energético eólico. El hallazgo de una zona de elevado potencial energético eólico en los llanos orientales no corresponde a las zonas que tradicionalmente se han estado explorando en Venezuela para la explotación de la energía eólica. Esta situación genera muy buenas expectativas, sobre las posibilidades de producción energética a futuro, sobre todo si se considera este factor dentro del plan de desarrollo socio-productivo que actualmente se está proyectando en la faja petrolífera del Orinoco.

En necesario recalcar que estos resultados están obviamente influenciados por las características benignas del escenario de emisión utilizado para este estudio (escenario A1B). En términos sencillos se puede decir que el escenario de emisión A1B es un escenario intermedio entre un futuro optimista y pesimista; donde se supone que ciertas medidas han sido tomadas para corregir la incidencia de factores condicionantes del cambio climático. En consecuencia los resultados expresados en este trabajo, referentes a las expectativas del potencial energético eólico, deben ser interpretados cautelosamente.

LITERATURA CITADA

- Acevedo, L.A. y G. Poveda. 2008. Comparación de series de precipitación con los GCM CCSM3, ECHAM5, HADGEM1 y MIRO -C3.2 HIRRES; para el siglo XX en Colombia. Grupo red de Cooperación en Investigación sobre el agua (GRECIA), Escuela de Geociencias y Medioambiente de la Universidad Nacional de Colombia. Congreso latinoamericano de hidráulica, septiembre 2008.
- Bañuelos-Ruedas, F., C. Ángeles-Camacho, A. Serrano-García A. y Muciño-Morales. 2008. Análisis y Validación de Metodología Usada Para la Obtención de Perfiles de Velocidad de viento. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Reunión del Capítulo de Potencia IEEE, México, 2008.
- Bravo de Guenni, L., Degryze y Alvarado. 2008. Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitación mensual en Venezuela. *Revista Colombiana de Estadística* 31(1):41-65.
- Clarke, Keith y Bradley Parks. 2004. *Geographic Information Systems and Environmental Modeling*. Prentice-Hall India. New Delhi.
- Iannini, R., J. González y S. Mastrángelo. 2009. Energía Eólica: Teoría y Características de Instalaciones. *Boletín Meteorológico Argentino* Nro. 13.
- INAMEH. 2011. SINAIHME: Sistema Nacional de Hidrología y Meteorología. Dirección General de Cuencas del Ministerio del poder popular para el Ambiente.
- Labandeira, X., P. Linares y K. Würzburg. 2012. Energías Renovables y Cambio Climático. *Cuadernos Económicos de Ice* 83:37-59.

- Martelo, M.T. 2013. Metodología para la selección de modelos y escenarios a incluir en la Primera Comunicación Nacional de Venezuela. Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales, Caracas.
- Martínez B., C. 2006. *Estadística Básica Aplicada*. ECOE Ediciones.
- Mitchel, T.D. 2001. Dataset CRU TS 2.1. Consorcio para Información Espacial del Centro Global del Grupo Consultivo Internacional de Investigaciones Agrícolas.
- Ott, T. y F. Swiaczny. 2001. *Time-Integrative Geographic Information Systems*. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg.
- Posso, F. 2004. Estudio del desarrollo de energías alternativas en Venezuela. *Anales Universidad Metropolitana* 4(1):147-164.
- Rodríguez, C. y Á. Escorche. 2009. Escenarios de Cambio Climático en Venezuela para el siglo XXI. Universidad de los Andes. Mérida.
- Viloria, J. 2012. Curso de interpolación de variables ambientales. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía. Maracay.