

Estimación del potencial de energía solar en Venezuela utilizando sistemas de información geográfica

*Estimation of the solar energy potential in Venezuela
by using geographic information systems*

Posso Fausto¹, González Julio², Guerra Francisco² y Gómez Heriberto²

Recibido: febrero, 2013 / Aceptado: septiembre, 2013

Resumen

En este trabajo se hace una estimación de los montos de radiación solar y el cálculo del potencial de energía solar para Venezuela en kWh/m²día, utilizando geoestadística y programas de sistemas de información geográfica (SIG). La información base consistió de registros de radiación solar de 35 estaciones meteorológicas. Los mapas del potencial se generaron con una resolución de 4 km utilizando *Kriging* Ordinario, y se calculó el error de la estimación. Resultados demuestran que se posee un potencial de energía solar factible de aprovechamiento, con valores superiores a 5.1 kWh/m²día, en una extensión aproximada de 205.921,6 km² (20% del territorio), con máximos valores hacia la franja costera norte y región insular (5.8 a 7.3 kWh/m²), y diferentes regímenes de variabilidad temporal. La variación al azar del modelo es elevada, la generación de modelos con menor error de estimación, requeriría mayor densidad en la red de estaciones, la cual puede ser modelada a través de técnicas geoestadísticas.

Palabras clave: Potencial de energía solar; geoestadística; *kriging* ordinario; Venezuela.

Abstract

In this paper an estimation of solar radiation amount and the solar energy potential for Venezuela in kWh/m²día was carried out, by using geostatistic analysis and Geographic Information System (GIS). The information was based on historical records of solar radiation measurements from 35 meteorological stations. The maps of potential were generated with a resolution of 4 Km by using Ordinary Kriging, and the estimation error was calculated. Results show a solar energy potential feasible for using, with average values above 5.1 kWh/m² in an area of approximately 205,921.6 km² day, with maximum potential values in the northern coastline and island region (5.8 to 7.3 kWh/m²día), and different trends in temporal variability. The random variation of the model obtained is considered to be high. The generation of models using this tool and with a minimum estimation error would require a higher density in the network of surface observation points, which can be modelled by means of geostatistic techniques.

Key words: Solar energy potential; geostatistics; ordinary *kriging*; Venezuela.

1 Universidad de Los Andes, Núcleo "Pedro Rincón Gutiérrez", Departamento de Ciencias. Táchira-Venezuela. Correo electrónico: fausto@ula.ve

2 Universidad de Los Andes, Núcleo "Pedro Rincón Gutiérrez", Departamento de Ciencias Sociales. Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica (LABSIG). Correo electrónico: jtovar@ula.ve; fguerra@ula.ve; hgomez@ula.ve

1. Introducción

En gran medida, el progreso de la humanidad se ha basado en el aprovechamiento de las fuentes primarias de energía que la naturaleza provee; de esta manera, la madera y, principalmente, las fuentes fósiles han servido para satisfacer las necesidades de energía de la humanidad durante los últimos siglos y proveerla de confort. Sin embargo, el consumo desmedido en las recientes décadas, en todos los ámbitos geográficos y sectores de la sociedad, está teniendo efectos perjudiciales cada vez más intensos. De todos ellos, quizás el más importante, según Chiari y Zecca (2011), está asociado con la contaminación ambiental que amenaza la vida de todos los seres e incluso la del planeta mismo. Además, la certeza de la extinción de tales fuentes en el mediano plazo y su desigual distribución geográfica ha ocasionado, de acuerdo con Shahriar y Topala (2008), grandes desequilibrios económicos y sociales que atentan contra la paz mundial. Por tanto, el desarrollo de otras alternativas energéticas, representadas principalmente por las energías renovables (ER), que complementen y en el largo plazo sustituyan a las fuentes fósiles, se ha convertido en una necesidad ineludible y hacia lo cual se han dedicado importantes esfuerzos tecnológicos y recursos económicos.

Como su nombre lo indica, las ER, de acuerdo con Shahriar y Topala (2009), son aquellas fuentes primarias de energía que, o pueden reponerse al generarse por procesos cíclicos de periodicidad variable (desde horas hasta años), o son

inagotables, en contraposición a las fuentes fósiles que se consumen a una mayor velocidad de lo que la naturaleza puede reemplazarlas, de manera tal que la posibilidad de su reposición es remota. Entre las ER se incluyen la energía solar directa e indirecta, la geotérmica, la eólica y la de los océanos.

Para los autores antes mencionados, en los últimos treinta años, la utilización de las ER ha experimentado un constante crecimiento: por ejemplo, para el año 2009 ya representaban el 25 % de la capacidad mundial de generación de electricidad, es decir, 1.230 GW de un total 4.800 GW. Además, las proyecciones optimistas consultadas en REN 21 Global Statut Report (2012), estiman que las ER podrían suplir 50 % de la demanda mundial de energía para el año 2050, con la energía solar y la energía eólica proyectadas como las de mayor crecimiento mundial. Estas estimaciones toman en cuenta, según De Vries *et al.* (2007), las mejoras sustanciales logradas –y por lograrse– en las tecnologías de transformación y uso que han permitido aumentar la eficiencia energética y obtener costos de producción cada vez más competitivos, en especial en aplicaciones aisladas para los sistemas fotovoltaicos y en la generación de potencia eléctrica a mediana escala conectada a la red, para el caso de los aerogeneradores.

Otro aspecto importante en este avance ha sido la mejora en los métodos de estimación del potencial de las ER, ya que cualquiera sea el tipo de ER y su uso final, toda acción con vista a su aprovechamiento comienza por disponer

de estimados del potencial de la ER considerada, que sean fiables en su registro, robustos estadísticamente y lo más actualizados posible. El interés en el inventario de los recursos de las ER a escala mundial, regional y por países, se refleja en la gran cantidad de publicaciones obtenidas de una revisión bibliográfica sobre este aspecto y de la cual puede consultarse a Krauter y Kissel (2005). Estas investigaciones señalan la existencia de varios métodos de estimación del potencial de ER que difieren en procedimientos y en la manera de presentar sus resultados; de todos ellos, posiblemente el más útil y popular sea el mapa de potencial, el cual en esencia constituye una representación gráfica de la distribución espacial del potencial de una cierta ER para una región determinada, siendo lo deseable que además de su visualización permita la manipulación de la información contenida en ella. En este sentido, Domínguez y Amador (2007) señalan que los métodos basados en los sistemas de información geográfica (SIG) han demostrado ser los más adecuados, ya que toman en cuenta la distribución espacial del potencial, su dependencia intrínseca con las características de su ubicación geográfica y la relación directa de los costos totales de la tecnología de aprovechamiento del recurso con los atributos espaciales. Esto podría explicar por qué la utilización de los SIG en el campo de las ER ha crecido notablemente en los últimos 15 años, sirviendo para estimar el potencial de diversas ER, apoyar la planificación energética urbana y rural. Como resultado de estos y otros estudios, los mapas de potencial

basados en SIG se han elaborado para una gran cantidad de países, regiones e incluso continentes, varios de los cuales se encuentran disponibles en el sitio web del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) de EE.UU, permitiendo su visualización más no su manipulación.

En relación al potencial de ER de Venezuela, en un estudio oficial (Martínez, 2001) se estima, según el tipo de fuente renovable, un potencial total cercano a los 8,5 MMBEPD, equivalente energéticamente a una producción de alrededor de tres veces la producción diaria promedio de petróleo del país en los últimos cinco años, como puede consultarse en *BP Statistical Review of World Energy* (2011), lo cual indica la magnitud de este potencial y que motiva la realización de cualquier proyecto de aprovechamiento de las mismas, en especial en el sector rural o en zonas aisladas y fronterizas. No obstante, a pesar de estas condiciones favorables, existen muy pocos estudios posteriores sobre la estimación de los recursos renovables en el país, pudiéndose mencionar el trabajo de La Cruz (2005), en el cual se complementan algunos de los resultados de Martínez (2001).

En el caso de la energía solar, Urdaneta (2005) presenta un mapa de potencial con valores promedio por regiones geográficas, mientras que Fumo y Colmenares (2005) construyen mapas de la radiación solar promedio mensual para todo el país a partir de mediciones satelitales; sin embargo, sus resultados presentan desviaciones importantes respecto a las mediciones obtenidas en las estaciones meteorológicas en tierra, probablemente

debido a una baja resolución de la malla con la cual dividen el territorio nacional y a los procedimientos estadísticos utilizados para la interpolación de la información recibida del satélite. Por último, el Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea presenta en su portal web (www.meteorologia.mil.ve), un conjunto de mapas de radiación solar promedio mensual para todo el país, pero se desconoce a qué periodo corresponden, así como las herramientas utilizadas para su elaboración. En cuanto a la utilización de los SIG para estimar los potenciales de energía solar en Venezuela y su representación en forma de mapas de potencial, en la revisión documental efectuada se ha encontrado poca información.

De todo lo anterior se puede advertir una importante limitación al desarrollo de la energía solar en Venezuela, como lo es la ausencia de mapas de potencial de energía solar fiables, actualizados y con el detalle suficiente para que sirvan de soporte al diseño, ejecución y operación de sistemas de aprovechamiento de las energías renovables, principalmente en el sector rural. Por tanto, el principal objetivo de este artículo es realizar una estimación del potencial de la energía solar de Venezuela y su representación en forma de mapas utilizando SIG, tomando como información base un registro histórico de mediciones de radiación solar e insolación en 35 estaciones meteorológicas diseminadas en toda la geografía del país y para un período de 30 años. Los mapas georreferenciados, según Gómez y Montero (2010), podrían servir de soporte inicial en el diseño de proyectos de

energización rural en aquellas regiones que no disponen de servicios de energía y cuya satisfacción por el sistema energético tradicional resulta difícil técnicamente, costosa económicamente y por tanto, improbable de llevarse a cabo. La implantación exitosa de tales proyectos permitiría la autonomía energética de estas zonas aisladas y deprimidas, mejorando su calidad de vida, estimulando la economía local al ser intensivas en empleo, preservando la cultura propia y el desarrollo endógeno sustentable.

2. Materiales y métodos

El tratamiento de la base de datos sobre radiación solar consistió en estimar datos faltantes en las series mensuales para 35 estaciones operadas por el Servicio Meteorológico de la Fuerza Aérea Venezolana, siguiendo el método racional (Guevara, 1987), (Figura 1). Para verificar la homogeneidad o aleatoriedad de las series se utilizó el test no paramétrico de las rachas, específicamente, las pruebas de las rachas de Sidney Siegel (Perdomo y Márquez, 1979), para series menores y mayores a veinte datos. La homogeneidad de las series permite verificar tanto la aleatoriedad de las series, así como también, si los datos no han sido afectados por factores externos que incidan en la distribución de los valores de la serie.

De manera general, los criterios de selección de los métodos de estimación del potencial de ER consideran el tipo de energía, la localización del sitio donde se quiere conocer la cuantía del recurso, la

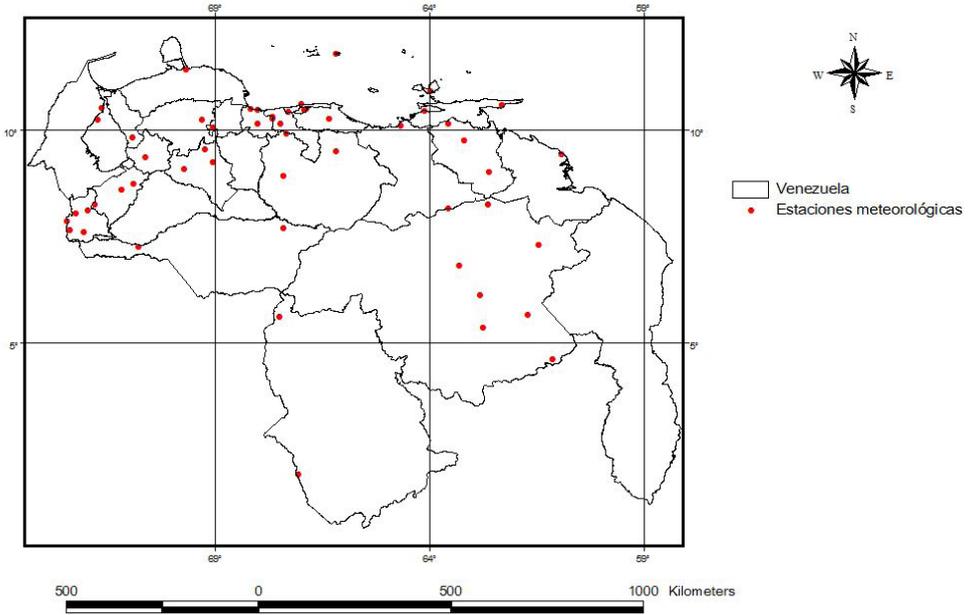


Figura 1. Distribución espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas en la investigación

información base y las herramientas de estimación utilizadas. En el caso de la energía solar, el criterio de selección más usado es la disponibilidad de registros directos de la radiación solar. De esta manera, se distinguen:

Métodos de utilización directa de la data de radiación solar generada en estaciones meteorológicas cercanas al sitio bajo estudio. Este procedimiento, para Angelis *et al.* (2011), es adecuado si se trata de un terreno plano y la distancia a la estación es menor a 10 km.

Métodos de interpolación de la información generada en una red de estaciones meteorológicas, siendo lo ideal que exista una alta densidad de estaciones. Según

las herramientas utilizadas para realizar la interpolación pueden distinguirse dos procedimientos: el primero utiliza herramientas matemáticas y estadísticas ayudadas por aplicaciones computacionales como MATLAB. La segunda utiliza procedimientos y aplicaciones basadas en SIG, como es el caso del estudio planteado, donde se utilizan los conceptos de las variables regionalizadas.

Modelos de tratamiento de imágenes de satélites geostacionarios, tales como Meteosat, GOES, MSAT o MSG; estas imágenes son el resultado de la reflexión de los rayos solares en la superficie de la Tierra, por lo que ya llevan implícitos los posibles efectos de la topografía así como de los principales fenómenos atmosféricos.

ricos que se producen cuando los rayos solares atraviesan la atmósfera. En este caso, pueden distinguirse modelos físicos y modelos estadísticos (Angelis *et al.* 2011), un ejemplo de la aplicación de éste último en Venezuela es el estudio de Urdaneta (2005).

En este estudio se elaboró una base de datos en *Microsoft Office Excel*, que incorpora, entre otros campos, la posición geográfica de cada una de las 35 estaciones meteorológicas utilizadas para la elaboración del mapa de referencia, incluyendo su código, así como los datos mensuales de radiación solar expresados en kWh/m²día. Posteriormente, la información fue importada a *MapInfo*, versión 6.5, software para sistema de información bajo ambiente Windows, sobre el cual se creó un mapa de puntos, que tiene como marco el perímetro de Venezuela, de acuerdo al mapa digital elaborado por el Instituto Nacional de Estadística (INE).

A partir de estos datos se genera, por interpolación, una estructura numérica que representa la distribución espacial de la radiación en el país, con una resolución espacial de 4 km. Para ello fue necesario transformar el mapa de puntos al formato *.shp* y luego iniciar el procesamiento con el módulo Análisis Espacial de la versión 3.1 de *ArcView*. De acuerdo con Martínez *et al.* (2006), la interpolación puede efectuarse por varios métodos; en este sentido, Vilches (2000) señala los siguientes: las ponderaciones en función a la distancia, *Kriging*, las Funciones básicas radiales y las superficies respuesta. De éstos, el *Kriging*, sigue siendo una

de las metodologías más utilizadas para explicar la variabilidad de los elementos del clima, en especial la precipitación y la radiación, debido a que el semivariograma permite identificar la naturaleza de la variabilidad espacial de las propiedades en estudio. De acuerdo con Ovalles (1992), el semivariograma contiene toda la información referente a la variable regionalizada, tal como: el rango (zona) de influencia, que indica la región en la cual existe una dependencia espacial; Anisotropía, que expresa el comportamiento de la variación de la propiedad en diferentes direcciones y continuidad de la variable en el espacio, expresada por el comportamiento del semivariograma en el origen.

Los puntos que conforman el semivariograma deben ajustarse a un modelo (análisis estructural), y las funciones matemáticas que se utilizan con el objeto de explicar su comportamiento, deben cumplir una serie de supuestos, que solo son satisfechos por un grupo limitado de funciones. En el caso de este trabajo, se aplicaron los modelos disponibles en el módulo análisis espacial de *ArcView*: esférico, circular, exponencial, gaussiano y lineal con sill; seleccionando, entre ellos, el modelo circular dado que presentó el mejor ajuste visual a la dispersión de los datos.

La función matemática ajustada a los datos experimentales encontrados para la semivarianza en el semivariograma, es utilizada posteriormente para calcular estimados de la semivarianza a diferentes distancias, y es la clave para describir cuantitativamente la variación espacial

de una propiedad. Por ello, es utilizada para interpolación y predecir valores de una propiedad en áreas no muestreadas, mediante un promedio móvil ponderado, desarrollado por Krige (1951) en las minas de Sudáfrica, y conocido como *kriging* o *krigeado*. En este caso se utilizó el *Kriging* Ordinario, para interpolar montos medios anuales de radiación y generar el mapa de potencial energético obtenido.

Para el análisis de la variabilidad temporal y espacial del potencial de energía solar se utilizó el Índice de Dispersión, expresado en función de la Desviación Estándar y del Coeficiente de Variación del potencial de energía solar.

3. Resultados y discusión

En la figura 2 se muestra el semivariograma (modelo circular) no direccionado, seleccionado para explicar la variabilidad

de los montos medios de radiación solar para Venezuela.

Como se puede observar, el comportamiento del semivariograma en el origen (efecto *nugget*), corresponde aproximadamente a un 80% de la varianza total, lo que obviamente indica la necesidad de contar con mayor número de estaciones en la red meteorológica nacional, para lograr una estimación confiable de la radiación solar en el país. Asimismo, la forma general del semivariograma calculado no muestra una clara dependencia espacial de la propiedad estudiada, tal como se observa en el comportamiento del semivariograma con la distancia entre puntos de observación (eje X del semivariograma). Esto explica el porqué los mayores errores calculados en las estimaciones ocurren en las áreas con baja densidad de estaciones de medición, correspondiendo, por consiguiente, los menores errores en la estimación con las áreas de mayor densidad de estaciones meteorológicas.

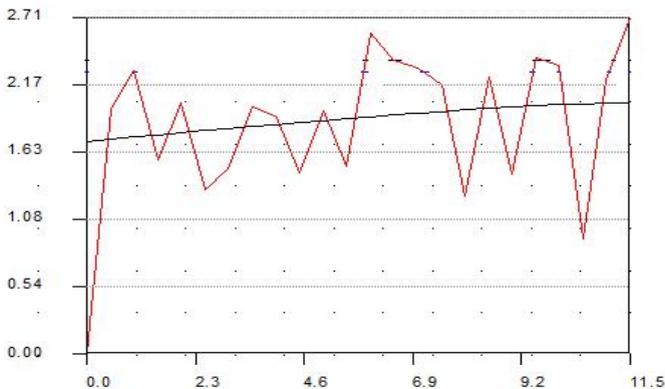


Figura 2. Semivariograma ajustado al modelo circular, seleccionado para efectuar la interpolación mediante *Kriging* Ordinario

Una de las características del promedio móvil ponderado o *Kriging*, es la posibilidad de calcular el error en la estimación, tal y como se muestra en la figura 3. Además, se estimó la diferencia entre los valores medidos en estaciones seleccionadas al azar y los valores obtenidos por interpolación sin tomar en cuenta las mencionadas estaciones.

Para ello, se seleccionaron al azar 15% del total de estaciones consideradas, correspondiendo a las 6 estaciones siguientes: Maiquetía, Calabozo, Puerto Ayacucho, Barcelona, Temblador, Maturín. Las mencionadas estaciones se borraron de la base de datos para generar nuevamente el modelo mediante el *Kriging* ordinario (validación cruzada). Posteriormente se efectuaron los cálculos del error medio cuadrático, con los datos estimados por

el modelo y los medidos en las estaciones, obteniendo un valor total de 1,5.

3.1 Distribución espacial del potencial de energía solar en Venezuela

El mapa de radiación obtenido se muestra en la figura 4; el mismo fue derivado con nueve rangos, al considerar los estrechos márgenes de variación del potencial de energía existente en el país (2,73 - 7,39 kWh/m²día). Para la elaboración del modelo de distribución espacial del potencial de energía solar se utilizaron los datos de radiación solar de las 35 estaciones meteorológicas que se encuentran bajo la responsabilidad del Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana (SE-METFAV), (Cuadro 1).

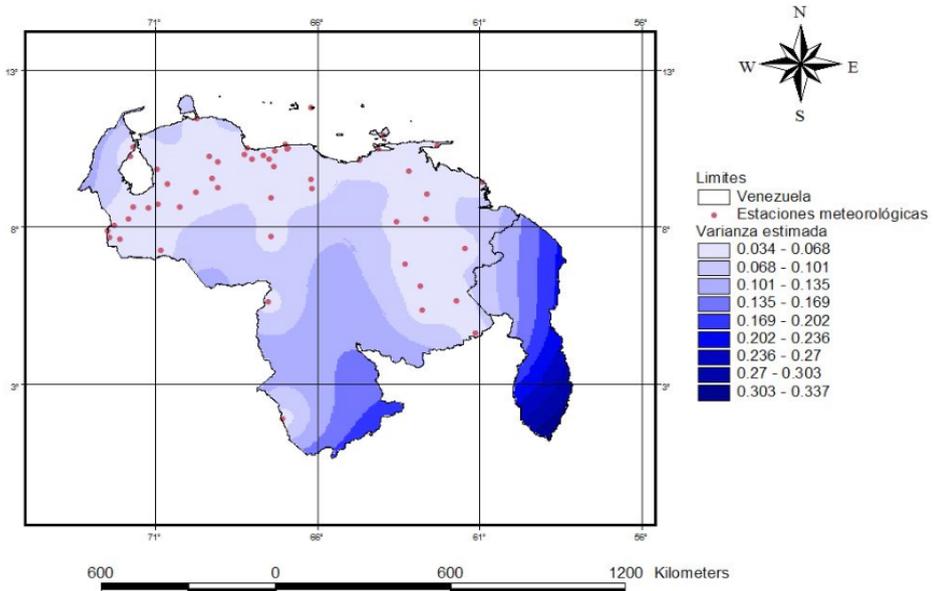


Figura 3. Varianzas de las estimaciones de radiación efectuadas mediante *Kriging* Ordinario

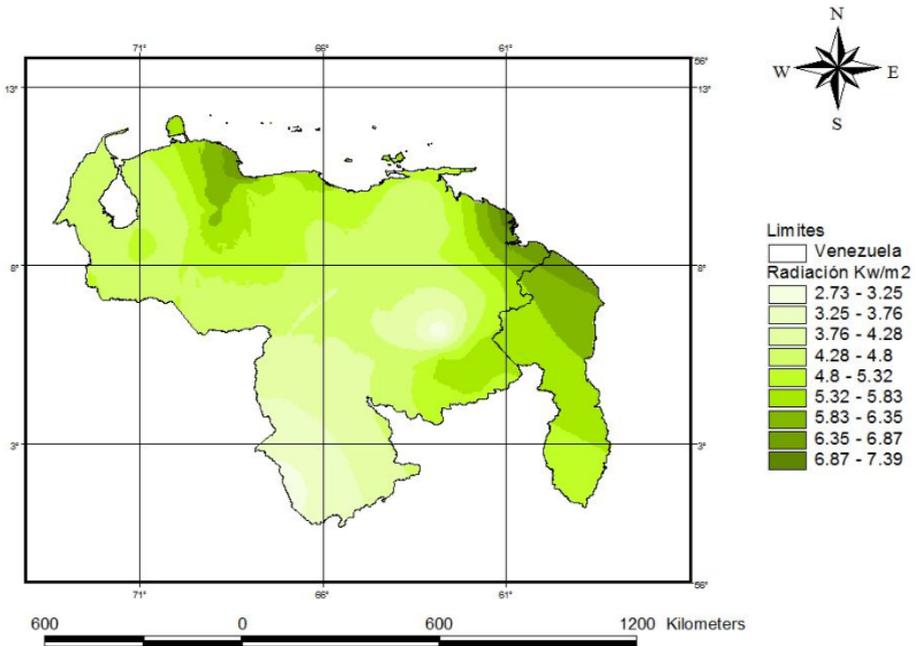


Figura 4. Variabilidad espacial de la radiación en kWh/m²día generado mediante *Kriging* Ordinario.
 Fuente: Servicio de Meteorología de la Aviación Venezolana

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas consideradas en la investigación

INFORMACIÓN ESTACIONES METEOROLÓGICAS			
Nombre de la Estación	Longitud	Latitud	Altitud (msnm)
Colonia Tovar	67° 17'	10° 25'	1.790
San Juan de Colón	72° 15'	08° 02'	825
Coro	69° 41'	11° 25'	16
Maracaibo	71° 44'	10° 14'	65
Barquisimeto	69° 19'	10° 14'	613
Base Sucre	67° 39'	10° 15'	436
Maiquetía	66° 59'	10° 36'	63
La Carlota	66° 53'	10° 30'	835
Barcelona	64° 41'	10° 07'	7
Cumana	64° 07'	10° 27'	2
Porlamar	63° 58'	10° 55'	24
Güiria	62° 18'	10° 35'	13
Mene Grande	70° 56'	09° 49'	27
Valera	70° 37'	09° 21'	582
Acarigua	69° 14'	09° 33'	226

Nombre de la Estación	Longitud	Latitud	Altitud (msnm)
Guanare	69° 44´	09° 05´	163
San Juan de los Morros	67° 20´	09° 55´	429
Valle de la Pascua	66° 01´	09° 13´	125
Maturín	63° 11´	09° 45´	68
El Vigía	71° 39´	08° 38´	103
Mérida	71° 11´	08° 36´	1.479
Barinas	70° 13´	08° 37´	203
Calabozo	67° 25´	08° 56´	100
Ciudad Bolívar	63° 33´	08° 09´	43
San Antonio del Táchira	72° 27´	07° 51´	377
Guasdalito	70° 48´	07° 14´	130
San Fernando de Apure	67° 25´	07° 41´	47
Tumeremo	61° 27´	07° 18´	180
Puerto Ayacucho	67° 30´	05° 36´	73
Santa Elena de Uairen	61° 07´	04° 36´	868
Valencia	67° 56´	10° 10´	430
Santo Domingo del Táchira	72° 04´	07° 35´	328
La Cañada	71° 39´	10° 31´	26
Temblador	62° 37´	09° 01´	30
Palmichal	68° 14´	10° 18´	1.000

En Venezuela, a nivel espacial, el potencial de radiación solar media para cada lugar es regulado principalmente por las condiciones dominantes en cuanto a nubosidad media, frecuencia de neblinas, altitud y por efectos de la exposición topográfica en las áreas de relieves más abruptos (Veillon, 1989).

En forma general, los valores promedios de potencial de energía solar en el país varían de manera relativamente amplia (2,7 a 7,3 kWh/m²día), lo que refleja la diversidad de ambientes existentes en cuanto a factibilidad de aprovechamiento del potencial energético solar en el país, así como la influencia de algunos condicionantes específicos en la recepción de energía solar (Figura 3). A continuación se realiza un análisis detallado del mapa de radiación (Figura 4), considerando la

clasificación internacionalmente aceptada para la radiación solar que se presenta en el cuadro 2.

Cuadro 2. Clasificación de la radiación solar según su potencial

Radiación solar (kWh/m ² día)	Clasificación
< 4,7	Marginal
4,7 a 4,9	Regular
4,9 a 5,2	Bueno
5,1 a 5,5	Excelente
5,5 a 6,1	Premium
> 6,1	Supremo

Fuente: La Cruz, 2005

En amplio sentido, las áreas con topografías llanas o de suave inclinación en altitudes bajas (hasta 500 msnm), co-

rrespondientes a la depresión central llanera y marabina, poseen valores promedios clasificados como Marginal/Regular de potencial de energía solar (3.7 a 4.8 kWh/m²día), típicos de ambientes tropicales en pisos altitudinales bajos, sujetos a un régimen mensual de mayor amplitud (época seca-época lluviosa) en cuanto a la variación promedio anual de este potencial energético. En ambientes tropicales con régimen estacional de nubosidad y precipitaciones, durante la época lluviosa se reducen notablemente los valores de radiación solar, los cuales vuelven a incrementarse durante la época seca.

Hacia el sur del río Orinoco, los valores promedios en cuanto a potencial energético varían desde valores marginales (2.7 a 3.7 kWh/m²día) a valores considerados como buenos a excelentes (4.8 a 5.8 kWh/m²día). Esta mayor variación está relacionada con los efectos combinados de patrones sinópticos de circulación de masas de aire húmedas interactuando con relieves locales hacia esta parte del país. Los menores valores hacia el suroeste del estado Amazonas y parte central del estado Bolívar concurren por la convección térmica y/o ascenso forzado de las masas de aire húmedo, originando para gran parte del año altos índices de condensación y precipitación, como se refleja en los promedios anuales de nubosidad y precipitación, superiores a 6 octavos y 3.000 mm respectivamente (Veillon, 1989; Fundación Empresas Polar, 2007).

Asimismo, hacia el sureste del estado Bolívar se estiman valores de potencial

de radiación clasificados como excelentes (5.3 a 5.8 kWh/m²día), situación esta asociada a la menor nubosidad (menos de 6 octavos) por efecto de la exposición del área a sotavento con respecto a los vientos provenientes del sur.

De acuerdo a las estimaciones realizadas y representadas en la figura 3, los mayores valores de potencial energético para el país (5.8 a 7.3 kWh/m²día), clasificados de premium a supremos se concentran hacia el eje costero norte, entre la península de la Goajira, Paraguaná y las depresiones del Tuy y Unare-Neverí, con una disminución progresiva hacia el sur del país.

Estos núcleos de altos valores promedio de potencial energético tienen su origen en aquellos sectores costeros en donde las condiciones locales del relieve no interfieren notablemente en el desplazamiento de los vientos predominantemente secos que, con dirección NE, normalmente circulan por el eje costero norte del país. Hacia estos sectores de baja altitud, con menor nubosidad (promedios menores de 5 octavos) y predominio de vientos secos, la incidencia de la energía solar tiene menos obstáculos, generándose allí las condiciones de mayor número de horas de sol e índices normalmente altos de intercepción de radiación solar.

Destacan, según las estimaciones, los núcleos costeros de la península de la Goajira (5,1 kWh/m²día), el sector entre Puerto Cabello (estado Carabobo) y Chichiriviche (estado Falcón), con estimados de potencial energético de radiación entre 6.3 y 7.3 kWh/m²día), máximos para la parte continental del país. El sector

entre Río Chico, desembocadura del río Tuy, Higuerote y Chirimena, con estimados de 5,3 a 5,8 kWh/m²día y gran parte del sector insular al norte del país, con estimados de potencial de energía solar entre 5,4 y 7,3 kWh/m²día. El sector correspondiente a la desembocadura del río Yaracuy crea condiciones que favorecen la ampliación del núcleo de altos valores de potencial de radiación solar hacia el suroccidente del valle de este río generando, junto con la depresión seca de Barquisimeto-Quibor-Carora, una extensión importante con este nivel de potencial energético.

Las áreas montañosas venezolanas presentan un complejo patrón en cuanto a la variabilidad espacial de los promedios de radiación solar y, en consecuencia, del potencial energético, no detectado por el modelo obtenido debido a la escala de representación y al déficit en cuanto al número de estaciones consideradas en este estudio. Sin embargo, como es conocido: la nubosidad, la frecuencia de neblinas, la exposición de los relieves y la altitud confluyen, en diferentes grados, para crear condiciones locales diversas en cuanto a condensación de la humedad, creando ambientes variados en relación a la intercepción de la radiación solar.

En los valles cordilleranos, que por efectos de la circulación local de los vientos no favorecen la condensación, se originan bolsones semiáridos donde los valores promedios de radiación solar son mayores, convirtiéndose estos espacios, a nivel regional, en valles o depresiones inter e intramontanas con cierta impor-

tancia en cuanto a potencial de energía solar se refiere, tal como ocurre en la depresión de Barquisimeto, valle medio del río Chama, valle medio del río Táchira, entre otros.

Un aspecto importante a considerar al momento de estudiar la variabilidad de los valores del potencial de energía solar tiene que ver con el comportamiento temporal de los valores promedios mensuales, a los fines de evaluar el potencial real de este parámetro y su factibilidad de aprovechamiento como fuente alterna de energía. Al respecto, a continuación se hace un análisis temporal con 35 estaciones del potencial de este recurso para Venezuela, que permitirá, a su vez, complementar los criterios para la definición de las áreas y su correspondiente potencial energético solar.

3.2 Variabilidad temporal del potencial de energía solar para Venezuela

En términos generales y según la información analizada, en Venezuela existe un potencial a escala regional y local que puede hacer factible el aprovechamiento de la radiación solar como fuente de energía alterna. En este sentido, la distribución espacial mostrada en la figura 3 muestra las áreas que en Venezuela poseen valores promedios de potencial energético que pudieran hacer factible su utilización; sin embargo, también es necesario revisar la variabilidad temporal de los valores promedios de dicho potencial, para evaluar su disponibilidad en el tiempo. Es decir, se trata de determinar la consistencia o regularidad de los regí-

menes de variabilidad de los valores promedio de radiación solar a nivel mensual, de manera tal que pueda conocerse su comportamiento y poder seleccionar las áreas que aseguren su aprovechamiento durante la mayor parte del año. Para este tipo de análisis se usará el Índice de Dispersión, expresado en función de la Desviación Estándar y del Coeficiente de Variación de la radiación solar.

En relación a este aspecto, los mayores potenciales de energía solar en el país se han estimado en estaciones tales como: Coro, Porlamar y Maiquetía, con valores promedio superiores a 18,5 MJ/m² (5,1 kWh/m²día). En estas localidades el estudio de la variabilidad de los promedios mensuales y anuales de potencial de radiación muestra que los mismos poseen moderados a bajos índices de dispersión, obtenidos a través de los valores de desviación estándar y coeficiente de variación (1 a 2,1 y 7,1% a 13,3% respectivamente). Esta condición de las estaciones antes mencionadas, en cuanto a la dispersión o variabilidad mensual y anual del potencial de radiación, permite, en una primera aproximación, considerar que son estas las áreas que, tanto a nivel espacial como temporal, podrían tener la mayor factibilidad para un aprovechamiento del potencial de energía solar.

Las áreas con niveles de potencial de energía solar considerados como moderados en este análisis, 16,2 a 18,5 MJ/m² (4,5 a 5,1 kWh/m²día), ocupan una extensión aproximada de 529.651,9 km² (51,3% de la superficie nacional). Dentro de este nivel se destacan, por su relativa menor variabilidad o dispersión de los

valores promedio a lo largo del año, las estaciones ubicadas en: Cumaná, Güiría, Base Aérea Manuel Antonio Ríos (Bamarí), Calabozo, San Tomé, Ciudad Bolívar y Valencia, con valores entre 2,2 y 3,3 de desviación estándar y 13,4% a 19,6% de coeficiente de variación. En estas áreas, la viabilidad de aprovechamiento de la radiación solar como fuente energética debe ser sometida a estudios más detallados que garanticen tanto su efectivo aprovechamiento durante el año como la inversión de recursos. Al mismo nivel de potencial de radiación se encuentran otras estaciones ubicadas en Barquisimeto, Barcelona, Acarigua, San Fernando de Apure y Santa Elena de Uairén, que, dada su moderada a alta variabilidad o dispersión de los registros durante el año, limitarían en cierta forma su aprovechamiento como fuente energética, por lo que deberá ser considerado para futuros estudios y proyectos de inversión en este campo.

Los menores valores del potencial de energía en el país, inferiores a 16,2 MJ/m² (<4,5 kWh/m²) se registran en un gran número de estaciones climatológicas (19 del total) y para una extensión de 296.471,2 km², aproximadamente 28,7% de la superficie nacional. Estaciones ubicadas en San Juan de Colón, Maracaibo, Valera, Guanare, Valle de la Pascua, Maturín, Barinas, Guasualito y Santo Domingo del Táchira, además de los bajos valores promedio de potencial de radiación, poseen moderados a altos valores de dispersión a lo largo del año (3,4 a 4,5 de desviación estándar y 19,7% a 25,4% de coeficiente de variación), lo

que no asegura un aprovechamiento permanente en el tiempo como fuente de energía, e incidiría de manera notable en cualquier proyecto de inversión con vista a la utilización de la energía solar para la satisfacción de necesidades energéticas de diferente índole.

Con similares niveles de potencial de energía solar, pero con valores bajos a moderados de variabilidad de los promedios a lo largo del año, se encuentran estaciones ubicadas en la Colonia Tovar, La Carlota, Valera, San Juan de los Morros, Mene Grande, El Vigía, San Antonio del Táchira, Puerto Ayacucho, La Cañada, Temblador y Palmichal, en las cuales su bajo potencial de energía, aún con menor variabilidad temporal, podrían reducir su factibilidad de aprovechamiento como fuente de energía alterna.

A nivel mensual se obtuvieron los mapas que representan la variación en la distribución espacial de los valores de potencial de energía solar para Venezuela (Figuras 5 y 6). En los mapas en referencia, se muestra la distribución que asumen los valores promedios obtenidos por el interpolador *Kriging* Ordinario para los meses de enero y julio, considerados, a manera de ejercicio demostrativo, de como a lo largo del año existen diferencias en los patrones de distribución espacio-temporal de este potencial, principalmente en los meses típicos de las temporadas de menor y mayor inclinación de los rayos solares, y a su vez, de las épocas seca y lluviosa en gran parte del país.

En forma general y descriptiva, a la espera de mayores ajustes e investigacio-

nes más detalladas a futuro, se puede indicar preliminarmente la consistencia y regularidad en los patrones regionales de las áreas con máximos y mínimos valores en ambos meses, variando obviamente la intensidad en los valores estimados por el modelo de distribución del potencial de energía solar obtenido para Venezuela. Tanto en enero como en julio, se mantienen en las áreas costera e insular al norte del país los máximos valores, con prolongación hacia el centro occidente (depresión Barquisimeto, Quibor, Carora) y núcleos hacia el delta del Orinoco y centro sur del estado Bolívar. Los menores valores de potencial hacia el extremo sur del estado Amazonas y una amplia faja, con valores moderados de potencial de energía extendida por toda la depresión llanera, depresión del lago de Maracaibo y región centro norte costera del país.

4. Conclusiones y recomendaciones

La geoestadística y los SIG constituyen herramientas adecuadas para la obtención de una estructura matemática que permite crear modelos de distribución espacial de la radiación solar en Venezuela, expresada en términos de su potencial energético, así como para la obtención de medidas que permitan calcular los márgenes de error en las estimaciones realizadas.

La variación al azar del modelo obtenido supera el 80% de la variación total, lo que indicaría que la generación de modelos mediante esta herramienta, con menor error de estimación, requeriría de

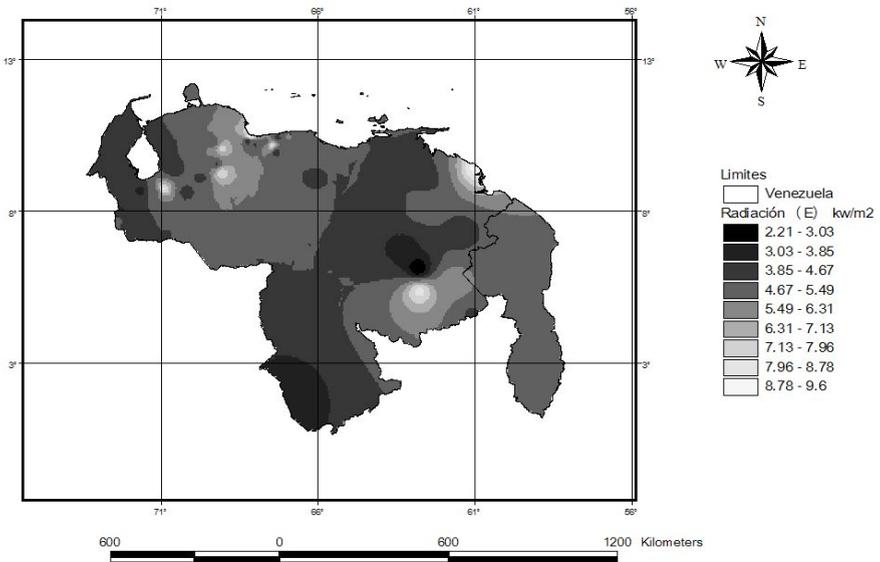


Figura 5. Potencial de energía de radiación solar para el mes de enero, Venezuela

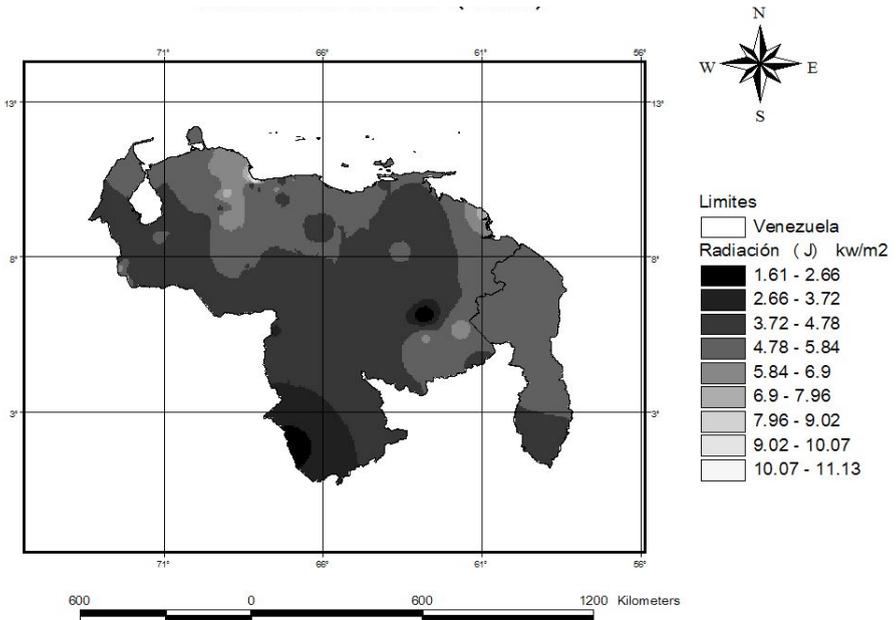


Figura 6. Potencial de energía de radiación solar para el mes de julio, Venezuela

una mayor densidad de observación en superficie, la cual pudiera ser calculada y diseñada a partir de herramientas geoestadísticas (semivariogramas, mapas de varianza, entre otras).

Para el caso de Venezuela, el modelo obtenido a través de *Kriging* Ordinario permitió estimar y regionalizar valores promedios de potencial de energía solar con una amplia variación (2,7 a 7,3 kWh/m²), determinados fundamentalmente por interacción de factores latitudinales, climáticos y topográficos. En este sentido, en Venezuela existen áreas que, por su potencial de energía solar superior a 5,1 kWh/m² (promedio nacional), principalmente hacia la franja costera norte e insular, pueden catalogarse de excelentes a supremas como fuente de energía solar aprovechable según estándares internacionales en esta materia.

Dada la escasa información detallada y confiable que sobre la distribución espacial de valores promedios de radiación y potencial de energía solar se ha conseguido en la consulta realizada, se hace imperativo profundizar en el manejo y ampliación de estas herramientas de análisis espacial, así como la comparación y validación con fuentes de datos satelitales que permitan la manipulación digital a un mayor nivel de resolución espacial.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico, Tecnológico y de las Artes (CDCHTA) de la Uni-

versidad de Los Andes el financiamiento de la presente investigación a través del Proyecto NUTA-C-23-07-02-B.

6. Referencias citadas

- ANGELIS, A.; BIBERACHER, M.; DOMINGUEZ, J.; FIORENSE, G.; GADOCHA, S.; GNANSOUNOU, E.; GUARISO, G.; KARTALIDIS, A.; PANICHELLI, L.; PINEDO, I. & M. ROBBA. 2011. *Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 15(2): 1182-1200.
- CHIARI, L. & A. ZECCA. 2011. *Constraints of fossil fuels depletion on global warming projections*. **Energy Policy**. 39(9): 5026-5034.
- DE VRIES, B.; VAN VUUREN, D. & M. HOOGWILJK. 2007. *Renewable energy sources: Their global potential for the first-half of the 21st century at a global level: An integrated approach*. **Energy Policy**. 35(4): 2590-2610.
- DOMINGUEZ, J. & J. AMADOR. 2007. *Geographical information systems applied in the field of renewable energy sources*. **Computers & Industrial Engineering**. 52(3): 322-326.
- BP. 2011. *Statistical Review of World Energy 2011*. Disponible en: <http://www.bp.com/statisticalreview>. [Consulta: junio 14, 2012].
- FUMO, N. y J. COLMENARES. 2005. Mapas y matriz de radiación solar sobre la superficie de Venezuela a partir de medidas satelitales registradas por la NASA. UNET. *Convención Anual de ASOVAC*. Caracas-Venezuela.
- FUNDACIÓN EMPRESAS POLAR. 2007. **GeoVenezuela**. Tomo 2: Medio físico y recursos ambientales. Caracas-Venezuela.

- GÓMEZ, V. & B. MONTERO. 2010. *Rural electrification systems based on renewable energy: The social dimensions of an innovative technology*. **Technology in Society**. 32(4): 303-311.
- GUEVARA D., J. M. 1987. **Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos**. Universidad Central de Venezuela. Caracas-Venezuela.
- KRAUTER, S. & J. KISSEL. 2005. *RE in Latin America: Actual state and potential of renewable energies in the region*. **Refocus**. 6(1): 20-26.
- KRIGE, D. 1951. *A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand*. **Journal of the Chemical, Metal and Mining, Soc. of South Africa**. 52(6): 119-139.
- LA CRUZ, E. 2005. Desarrollo en Venezuela de las Fuentes Alternas Renovables de Energía. *Primeras Jornadas sobre las FARE en Venezuela*. Puerto Ordaz-Venezuela.
- MARTÍNEZ, A. 2001. *Energías renovables. Potencial energético de los recursos aprovechables*. División de Alternativas Energéticas. Ministerio de Energía y Minas (MEM). Caracas-Venezuela.
- MARTINEZ, R.; CHACÓN, L.; GONZÁLEZ, J. y H. GÓMEZ. 2006. *Aplicación de los SIG en la Organización, análisis y divulgación de la información de suelo producida en el laboratorio*. **Geoenseñanza**. 11(1): 51-62.
- OVALLES, F. 1992. *Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad*. FONAIAP- CENIAP-IIAG. SERIE B. 44 p. Maracay-Venezuela.
- PERDOMO, E. y MÁRQUEZ DE P. I. 1979. *Elementos prácticos de climatología estadística*. EDELCA. Ciudad Guayana-Venezuela.
- RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21st CENTURY. 2012. *Global Status Report*. Disponible en: <http://www.map.ren21.net/GSR/GSR2012.pdf>. [Consulta: noviembre 07, 2011].
- SERVICIO DE METEOROLOGÍA DE LA AVIACIÓN. FUERZA AÉREA VENEZOLANA. (2007). *Boletín Climatológico*. [Documento en línea]. Disponible en: http://www.meteorologia.mil.ve/Boletín_Climatológico.php [Consulta: julio 15, 2011].
- SHAHRIAR, S. & E. TOPALA. 2008. *An econometrics view of worldwide fossil fuel consumption and the role of US*. **Energy Policy**. 36(2): 775-786.
- SHAHRIAR, Sh. & E. TOPALA. 2009. *When will fossil fuel reserves be diminished?* **Energy Policy**. 37(1): 181-189.
- URDANETA, A. 2005. Perspectivas de la generación eólica de electricidad en gran escala en Venezuela. *Primeras Jornadas sobre las FARE en Venezuela*. Puerto Ordaz-Venezuela.
- VEILLON, P. 1989. **Los bosques naturales de Venezuela**. Universidad de Los Andes. Instituto de Silvicultura. Mérida-Venezuela.
- VILCHEZ, J. 2000. *Evaluación de modelos de elevación digital (MDE) de malla regular generados a partir de curvas de nivel*. **Revista Geográfica Venezolana**. 41(2): 239-256.