

EVALUACION DE UN METODO DE ESTIMACION DE LA RADIACION SOLAR A PARTIR DE REGISTROS HELIOGRAFICOS EN LAS PROVINCIAS HABANERAS

AUTORES: GLORIA MARÍA RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ
ISRAEL BORRAJERO MONTEJO
DANIEL MARTÍNEZ CASTRO

Centro de Física de la Atmósfera. Instituto de Meteorología. E-mail: finube@met.inf.cu

RESUMEN

En el presente trabajo se aplica un método nuevo de estimación de la radiación solar de onda corta que incide sobre superficies con grado arbitrario de inclinación y orientación. Este método está basado en el cálculo del procesamiento digital de las cartas heliográficas y en relaciones empíricas ajustadas para los valores de radiación medidos en las estaciones actinométricas de Casablanca y Camagüey.

Se concluye que el método propuesto ofrece resultados superiores cualitativa y cuantitativamente en comparación con los anteriores.

INTRODUCCION

El Sol constituye la fuente más importante de energía disponible al sistema tierra-atmósfera.

En Cuba, actualmente, la red de estaciones actinométricas consta de 4 estaciones ubicadas en diferentes provincias: Casablanca (provincia Ciudad de la Habana), Santa Fe (municipio especial Isla de la Juventud), Jovellanos (provincia Matanzas) y Camagüey (provincia Camagüey).

En el presente trabajo se aplica un nuevo método de estimación de la radiación descrito por Vigón, F. et al. (2001), que se basa en el procesamiento digital de las cartas heliográficas y en los ajustes de los valores de radiación medidos en estaciones actinométricas para el cálculo de la irradiación que reciben superficies situadas con diferentes orientaciones e inclinaciones, partiendo de los datos de insolación medidos de las estaciones heliográficas y solarimétricas de la red de estaciones nacional.

Comúnmente en nuestro país se usa la ubicación de 45° de inclinación y orientación Sur, justificada por los cálculos astronómicos; sin embargo, la información climatólogica de esta variable, difiere de esa primera aproximación.

El objetivo del presente trabajo es obtener la radiación solar que incide en las provincias habaneras, mediante el procesamiento digital de las cartas heliográficas y conocer cuál es la orientación e inclinación óptima en que se deben colocar los colectores solares como un elemento importante en los estudios de irradiación sobre superficies inclinadas, para el mejor aprovechamiento de la misma.

MATERIALES Y METODOS

Para elaborar el presente trabajo se utilizó la información obtenida de 10 estaciones meteorológicas donde están instalados heliógrafos, 2 en Ciudad de la Habana y 8 de la provincia Habana, del periodo 1986-1987, que están ubicadas en la costa norte, sur y central del área de estudio.

Las estaciones seleccionadas son:

De Ciudad de la Habana: Casablanca y Santiago de las Vegas.

De La Habana: Bauta, Bainoa, Batabanó, Guines, Guira de Melena, Melena del Sur, La Sabana y Tapaste.

Este trabajo abarcará la región geográfica donde se encuentran las provincias de Ciudad de La Habana y La Habana.

Para este trabajo se escanearon 14 600 cartas heliográficas y a través de la utilización del programa Helios (Borrajero, I; inédito), se obtuvieron las siguientes características:

- Secuencia de ceros y unos cada 6 minutos, indicando si hay o no radiación directa
- Suma de las horas de sol a.m.
- Suma de las horas de sol p.m.
- Suma de las horas de sol total.

El procesamiento se realiza analizando las secuencias de unos y ceros indicando 6 minutos para cada día; de esta forma se determina la existencia radiación directa o no.

A partir de estos resultados los ficheros son procesados por un programa (Borrajero, I; inédito), que selecciona las inclinaciones con las orientaciones deseadas y entrega como salida la irradiación calculada de cada día, teniendo en cuenta el ajuste de los flujos de irradiación en dependencia con la altura del sol (h) para la radiación global y directa. En los cálculos se considera que cuando hay un cero, la irradiación global (Q) es inferior o igual a 0.12 kW/m², lo que corresponde con el trazo no quemado del heliograma, de esta manera la irradiación Q resulta igual a la componente difusa. Se asume el valor de 1 cuando el trazo está quemado y la irradiación global (Q) es igual a la suma de las componentes directa (S) y difusa (D), Vigón et al. (2001). La irradiación diaria sobre las superficies se obtiene por la integración en el tiempo de los valores procesados cada 6 minutos. La irradiación de la superficie horizontal se calcula de forma implícita. (Fig.1)

S : irradiación perpendicular a la posición del sol
 D : irradiación difusa.
 Q : irradiación Global
 i : Ángulo entre la posición del sol y la normal de la superficie.
 Alb : Albedo (tomado como promedio de las mediciones en las estaciones actinométricas e igual a 0.25)
 f : Factor de inclinación. $f = \text{sen}^2 \epsilon / 2$
 donde ϵ = Angulo de inclinación con respecto a la horizontal
 (f = 0 P Sup horizontal, f = 0.5 P Sup. Vertical)

```

• 00000000000000000000000011111111111111
  11111000111111111000000000111011111
  10000000111111110011000111111000000
  000000000000000000000000000000000000
  4 12 86 3.0 2.2 5.2

• 000000000000000000000000000000000000
  000000000000000000000000000000000000
  000000000000000000000000000000000000
  000000000000000000000000000000000000
  5 12 86 0.0 0.0 0.0

• 00000000000000000000000011111111111111
  111111111111111111111111111111111111
  111111111111111111111111111111111111
  1111111111111000000000000000000000000
  6 12 86 4.2 5.3 9.5

```

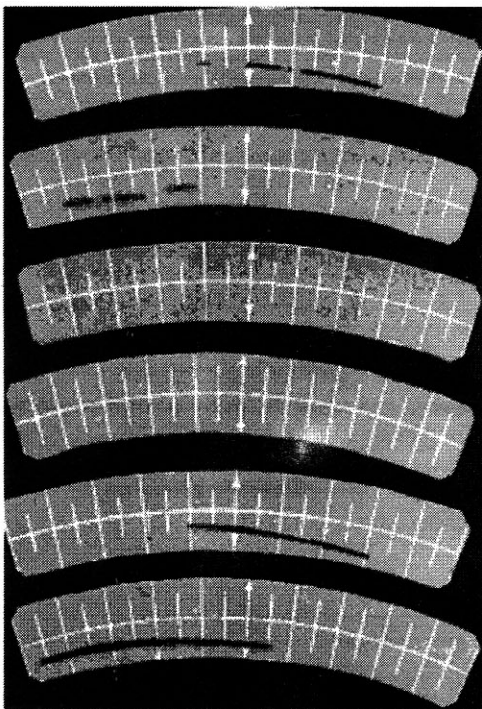


Figura 1. Imagen de cartas heliográficas digitalizadas por medio de un «scanner» de mesa y salida del programa «Helios», en cadenas de ceros y unos, al final se reporta la fecha (ddmmaa) y la cantidad de horas de sol(am, pm y total)

La irradiación incidente sobre superficies con inclinaciones y orientaciones arbitrarias se puede calcular mediante diversas formulaciones. En este trabajo utilizamos la propuesta por Wörner (Kondratyev, K.,1969)conveniente por su sencillez y suficiente exactitud.

La relación de trabajo es la siguiente:

$$R_{inc} = S \cos(i) + (1.0-f) D + Alb f Q$$

Donde:

R_{inc} : irradiación incidente sobre una superficie

El hecho de que la estación de Casablanca (provincia Ciudad de la Habana) sea actinométrica y heliográfica permitió evaluar mediante la comparación de los valores calculados y medidos de superficies con inclinaciones y orientaciones notables

(90° E, 90° S, 90° O y 45° S), los resultados que se presentan.

La misma posee registros medidos con piranómetros del tipo M-80-M (Yanishevsky) acoplados a potenciómetros de autocompensación (KSP4). Se analizaron estadísticamente los errores y se elaboraron gráficos de distribución de los mismos.

Con el objetivo de apreciar el comportamiento de la irradiación sobre las inclinaciones notables y su distribución en una zona geográfica dada, se tomaron cuatro

estaciones de las provincias habaneras que representaran distintos paisajes.

Las estaciones seleccionadas son:

1. **Casablanca** (23°10' Lat N, 82°21' Lon O), situada en la costa norte-centro de la región.

2. **La Sabana** (22°51' Lat N, 82°31' Lon O), al centro de las provincias y donde se produce gran actividad convectiva.

3. **Batabanó** (22°43' Lat N, 82°17' Lon O), en la costa Sur-centro de la región.

4. **Tapaste** (23°01' Lat N, 82°08' Lon O), con una ubicación intermedia entre Casablanca y el centro de la región.

Además se tomaron meses que tuvieran condiciones meteorológicas características para apreciar el efecto de la nubosidad y la turbidez de la atmósfera sobre la radiación. Con los valores calculados se elaboraron mapas (escala 1:250000) de irradiación sobre superficies inclinadas notables, representando estas variables con símbolos fuera de escala, proporcionales a su valor numérico.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1 Análisis de la comparación entre los datos medidos y calculados

La figura 2 muestra la comparación de la irradiación medida y calculada en la estación Casablanca. En los mismos se asentaron los valores medidos contra los calculados y se trazó la recta $y=x$ para observar que el ajuste de la nube de puntos posee una correlación satisfactoria y sin sesgo.

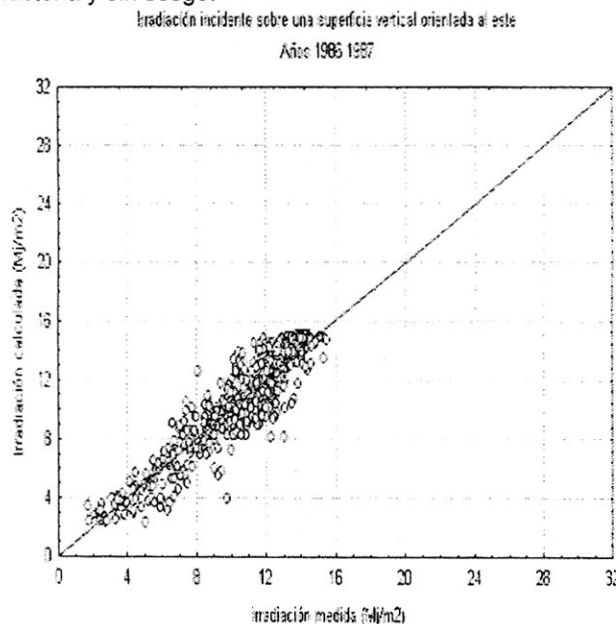
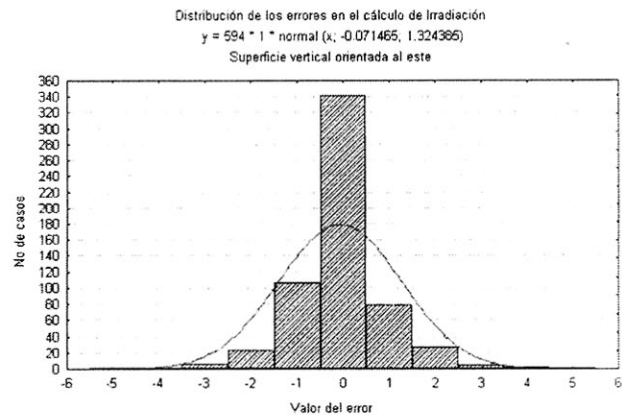


Fig 2. Correlación entre los valores medidos y calculados en la estación Casablanca. Años 1986- 1987 para superficies con inclinaciones y orientaciones notables. a) 90° al este

La distribución de las diferencias entre los valores calculados y los medidos se representan en la figura 3. En el se observa que las diferencias tienen una distribución ajustable a una curva normal.



(a)

Fig 3. Distribución de las diferencias entre los valores calculados y medidos en la estación Casablanca, años 1986-1987, para las inclinación y orientación notable: a) 90° este

La marcha mensual (medida y calculada) de la irradiación diaria se muestra en la figura 4, para los meses que presentan una marcada influencia de las condiciones de nubosidad. El mes escogido fue, uno de invierno (enero), En el se puede observar una gran coincidencia.

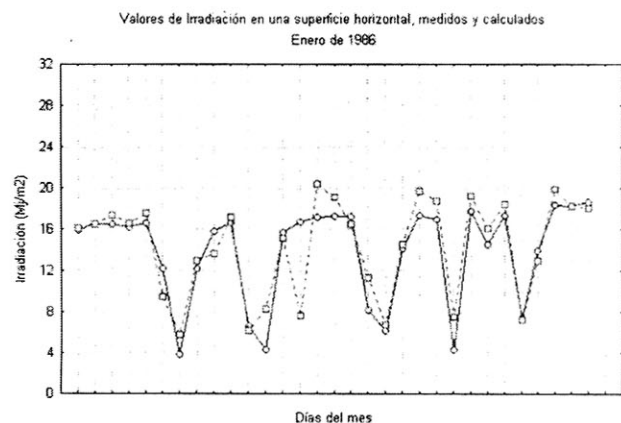


Fig 4. Marcha diaria y mensual de los valores medidos (línea continua) y calculados (línea discontinua) en la estación Casablanca para el mes de enero .

4.2 Análisis por medio de los mapas de isóneas del comportamiento de la radiación global en las estaciones de Ciudad de la Habana y la Habana.

En el análisis de estos mapas de isóneas, se utilizó el método de Vigón (1988), en el cual se tienen en cuenta algunas reglas elementales para el análisis de los mis-

mos. Una de ellas plantea que los valores de las isolíneas deben establecerse con intervalos mayores que el error con que se mide la variable, en la elaboración de nuestros mapas el intervalo entre isolíneas es del mismo orden del error.(Fig 5)

Anual

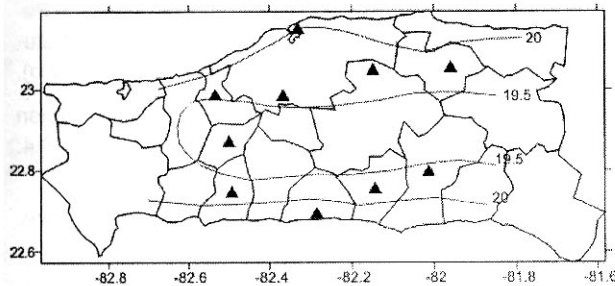


Figura 5. Mapa de isolíneas de radiación directa para las estaciones de Ciudad de la Habana y La Habana. Anual 1986-1987

En el mapa referido a la radiación anual se observa un máximo en la zona central de la costa sur con un valor de 20 MJm⁻² y una zona de mínimo al noroeste de este máximo con 19 MJm⁻² manteniéndose el resto del mapa entre los 19.5 MJm⁻² y los 20 MJm⁻².

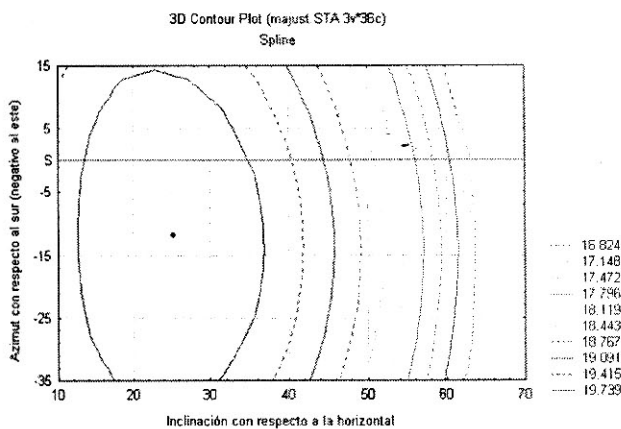


Figura 7. Azimut y orientación óptimos determinado por la irradiancia calculada con el método descrito.

En la fig.7 se señala con un punto, que representa 10° de azimut (orientación hacia el sur-sureste) y los 25° de inclinación con respecto a la horizontal, la posición en la que se recibe los valores máximos de irradiancia para el mes de marzo, lo que representa un aprovechamiento de un 10% más de energía que si se ubicara en los 45° Sur. Para este ejemplo se escogió el mes de marzo por ser un mes donde se presentan condiciones de poca nubosidad. En los meses de verano es obvio que la mejor inclinación sería prácticamente horizontal.

Mapas de irradiación media mensual sobre superficies notables.

Con la información heliográfica procesada de los años 1986-1987, de las estaciones seleccionadas por sus ubicaciones dentro de las provincias habaneras y los meses con características climáticas, se elaboraron los mapas de irradiación media mensual sobre superficies notables (figuras 6 a). En ellos se puede apreciar como, efectivamente, las irradiaciones siguen el patrón de disminución desde las costas hacia el interior de la isla. Con ellos se puede obtener una valoración cuantitativa del recurso radiación solar y su distribución espacial y temporal en dichas provincias.

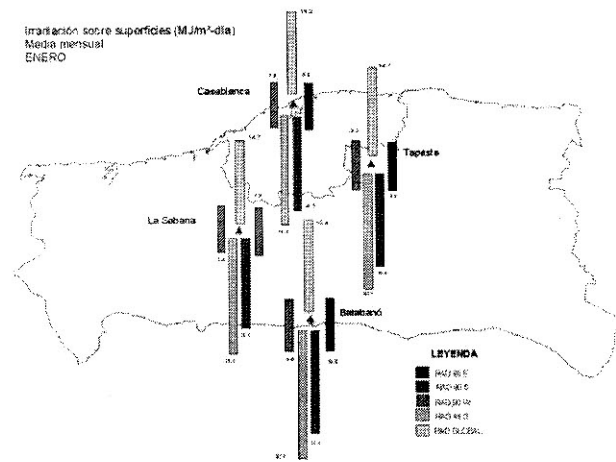


Figura 6. Mapas de irradiación para el mes de enero (a), sobre superficies notables, en las estaciones escogidas de las provincias Ciudad Habana y La Habana

CONCLUSIONES

El método propuesto ofrece resultados superiores en comparación con los métodos tradicionales, como por ejemplo el método que usa la fórmula de Angstrom.

La digitalización de las cartas de forma automatizada garantiza una valoración objetiva de la variable que lo destaca de los métodos precedentes y el uso de los softwares desarrollados al efecto garantizan una alta productividad.

La reconstrucción de las marchas permite valoraciones muy útiles, como son los casos de evaluar la eficiencia de los sistemas que aprovechan el recurso energía solar, la mejor orientación de construcciones y objetos productivos, con vistas a mejorar sus cualidades, confort, etc.

La reducción del intervalo de tiempo de lectura de las cartas heliográficas a una décima de hora eleva no sólo la exactitud de las estimaciones de irradiancia, sino que mejora la calidad de los datos de insolación, que aun son procesados a mano en las estaciones.

El uso de esta herramienta de trabajo permitirá crear la base de datos necesaria para la elaboración de mapas y otras formas de expresión de la climatografía solar.

Se debe profundizar en el estudio del albedo de las distintas regiones, suelos y superficies afectadas por la actividad antrópica.

Se demuestra que la inclinación y orientación para obtener un óptimo aprovechamiento de la energía solar no es exactamente la indicada por los cálculos astronómicos.

RECOMENDACIONES

Recomendamos que el método y los resultados obtenidos en este trabajo se tomen en consideración y se extiendan para todo el país.

REFERENCIAS

Aleman, A. et al. (1986) Climatología, iluminación, acústica. Aplicación en la Arquitectura. Capítulo 4. Control Solar. p 122-180

Alvarez-Guerra, M. (1992). Manual de radiación solar para la República de Cuba. Editorial Academia. La Habana 1992.

Berliand, T. G. (1967): El balance de calor en la tierra. Edit. Hidromet., Leningrado, 156 pp.

Borrajero, I. et al (1989): Método de cálculo de la radiación global, difusa y directa a partir de registros heliográficos. (inédito)

Borrajero, I. et al (1990): Método de cálculo de la radiación global a partir del registro heliográfico (inédito).

Campos, A. et al (1988): Cálculo de fórmulas empíricas para los flujos de radiación solar en Cuba. Trudi III Meshdunarodnovo Simposia po Tropisheskoi Meteorologii. Leningrado. Cap. VIII pp 415-423.

Campos, A. et al (1988): Mapas de la media de la suma diaria de la radiación global y de la suma anual de la insolación para la República de Cuba e información complementaria. Atlas Nacional de Cuba. Instituto de Geografía de Cuba, Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía. Academia de Ciencias de Cuba. La Habana. Sección Clima, pp VI.1.1.4

Campos, A., Lutsko L.V., et al. (1990): Marcha diaria de los elementos del balance de radiación solar. Trudi IV Meshdunarodnovo Simposia po Tropisheskoi Meteorologii. Leningrado. p 415-423.

Clifford, R., et al. (1984): An Assessment of Models which use Satellite Data to Estimate Solar Irradiance at the Earth's Surface. Journal of Climate and Applied Meteorology. American Meteorological Society. Vol.23. No. 4 pp832-844.

Davitaya, F.F. et al (1965): Los recursos climatoterapéuticos de Cuba. Edit. INRH-ACC, La Habana, 79 pp.

Esperón R., Campos A., Vigón F., Borrajero I. y Pelaez J.C. (1991): Informe del Tema No.7 del LCCS «Estudio del régimen de la radiación solar en Cuba» (archivo).

Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológico. O.M.M. -No 8 Capítulo 9, Epígrafe 9.4. Ginebra, Suiza.

Kondratyev, K. (1969): Radiation in the Atmosphere. Academic Press, New York, London. pp 912.

Lecha, L.B. et al. (1994). El Clima de Cuba. La Habana. p 10-18

Major, G. et al (1980): World maps of relative global radiation. Technical Note. 172 Meteorological aspects of the utilization of solar radiation as an energy sources.

Martinez Chapman, E., Campos, A (1982). Climatología de la radiación solar en la Habana, un estudio a mesoescala. V Jornada Científica del INSMET. La Habana. ACC

Nuevo Atlas Nacional de Cuba. (1989). Instituto de Geografía de Cuba, Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía. Academia de Ciencias de Cuba. La Habana. Sección Clima, pp VI.1.1.4

Ricardo Aguiar. (1999). Cartografía de la Radiación Solar por Métodos Geoestadísticos. Departamento de Energías Renovables. Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial. Lisboa.

Sellers, W. D. (1970): Physicals Climatology. Edit. Científica Técnica, La Habana, 272 pp.

Vigón, F. (1985). Análisis físico – geográfico de la radiación global en el territorio de la República de Cuba. Trabajo de Diploma.

Vigón, F. et al (1988) Elaboración del mapa solarimétrica de radiación global para la República de Cuba. Revista Cubana de Meteorología. P 79-85, Vol I, No1, Año 1, 1988.

Vigón, F. et al. (2001), Cálculo de la Radiación Solar a Partir de los Registros Heliográficos Digitalizados. Boletín SOMETCUBA. Volumen 6, número 2. <http://www.met.inf.cu/sometcub/default.htm>.

World Climate Research Programme, Baseline Surface Radiation Network. WMO/TD-No. 882. November 1998.

Palabras clave:

Radiación solar.