

ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR GLOBAL MEDIANTE ANÁLISIS GRÁFICO Y ESTADÍSTICO.

Germán A. Salazar, Miguel S. Checurea Díaz
Departamento de Física – Facultad de Ciencias Exactas – Universidad Nacional de Salta
Avda. Bolivia 5150 – CP A4408FVY – Salta Capital – Salta – Argentina
salazarg@unsa.edu.ar

RESUMEN:

En este trabajo se presenta un método de análisis gráfico y estadístico que permite extraer información sobre la variación de la irradiancia solar global a lo largo del día, para una serie de días, en un sitio determinado. Mediante la gráfica de Irradiancia de Día Promedio o IDP se condensa en un día típico los valores de la irradiancia de todos los días analizados. Utilizando estimaciones de modelos de día claro y desviación estándar, se estudia la validez de los IDP como herramienta de análisis de series temporales de datos de irradiancia. Los datos analizados en este trabajo corresponden a 7 estaciones meteorológicas instaladas desde la I Región hasta la IV Región de Chile.

Palabras clave: irradiancia, día promedio, estadística, Chile

INTRODUCCIÓN

La evaluación de los datos de radiación solar resulta ser una herramienta útil para realizar análisis de factibilidad para la utilización del recurso mediante sistemas térmicos o eléctricos. Dichos sistemas utilizan la energía del Sol para generar electricidad ya sea mediante la generación de vapor que luego se conduce a turbinas (concentradores térmicos) o la de corriente fotovoltaica (fotovoltaicos).

Los valores de radiación solar suelen medirse con sensores (piranómetros, pirheliómetros, etc.) conectados a sistemas adquirentes (dataloggers). Estos dispositivos almacenan los datos medidos, los que están en unidades de irradiancia G (W/m^2). La integración temporal de los valores de irradiancia genera valores horarios, diarios, mensuales o anuales de irradiancia H (MJ/m^2 o KWh/m^2). Esta última magnitud indica la cantidad de energía que recibe un sitio determinado por unidad de área. Esta magnitud da una idea general de la disponibilidad del recurso en un sitio en particular.

Para sistemas concentradores térmicos, la información de la radiación solar disponible presentada solo en unidades de energía carece del detalle necesario para determinar, entre otras cosas, la tasa de producción de vapor. Por otra parte, la evaluación del comportamiento de irradiancia solar resulta complicada de analizar por las grandes cantidades de datos que pueden recopilarse en, por ejemplo, un mes. Sin embargo la irradiancia brinda la posibilidad de conocer, momento a momento, cual fue la disponibilidad del recurso. La pregunta es si se puede diseñar algún método que permita analizar las variaciones diarias de la irradiancia dentro de un periodo de tiempo acotado (30 o 31 días).

En este trabajo se analizan valores de irradiancia solar global tomados en 7 estaciones ubicadas en la República de Chile. Se analizan datos tomados durante invierno y verano, alrededor de los días de solsticio (21 de junio y 21 de diciembre), con el fin de tener cierta noción del comportamiento del recurso desde el punto de vista estacional. Se realiza luego un promedio de valores de irradiancia de manera de generar la gráfica de *Irradiancia de Día Promedio* o IDP. Esta gráfica luego se compara con estimaciones hechas con un modelo de día claro (Bird y Hulstrom, 1981) y el modelo ARG-P (Salazar et al, 2010).

LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Los datos analizados provienen de 7 estaciones meteorológicas y fueron tomados durante el año 2010 y 2011. A saber:

- **Estación 1.** Latitud -30° Longitud -71.4° Altitud s.n.m. 122 metros
- **Estación 2.** Latitud -30.08° Longitud -71.23° Altitud s.n.m. 135 metros
- **Estación 3.** Latitud -30° Longitud -71.08° Altitud s.n.m. 204 metros
- **Estación 4.** Latitud -30.12° Longitud -70.48° Altitud s.n.m. 1212 metros

Todas estas estaciones pertenecen a la red del CEAZA (Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas) y se encuentran en la IV Región de Chile (Figura 1). Los datos fueron tomados utilizando estaciones meteorológicas formadas por dataloggers Campbell CR1000, sensores de irradiancia solar global (LiCor/LI-200SA), de temperatura (Vaisala/HMP45C), de velocidad de viento (RM Young/Wind Sentry 03002) y de humedad relativa (Vaisala/HMP45C).

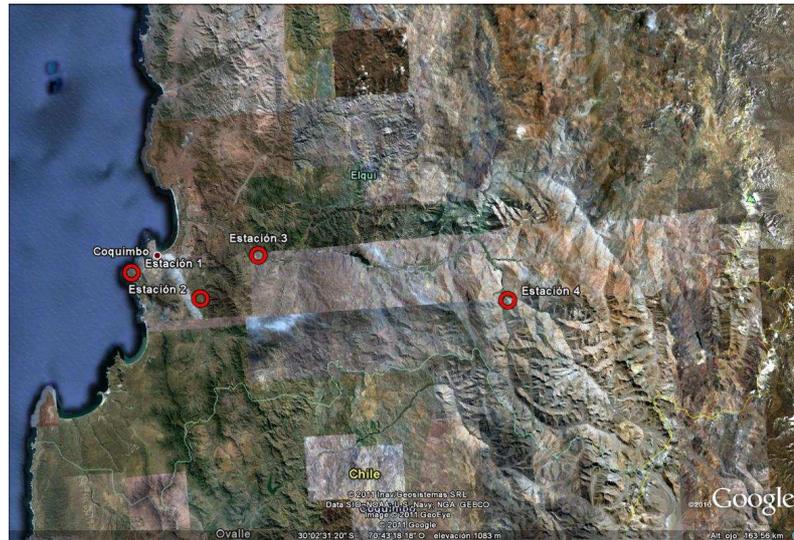


Figura 1. Disposición de las Estaciones 1, 2, 3 y 4. Se observa su ubicación respecto de la ciudad de Coquimbo y el Valle del Elqui (Google Earth®)

- **Estación 5.** Latitud -20.25° Longitud -69.77° Altitud s.n.m. 1024 metros
- **Estación 6.** Latitud -22.27° Longitud -69.57° Altitud s.n.m. 1176 metros
- **Estación 7.** Latitud -22.98° Longitud -68.16° Altitud s.n.m. 2390 metros

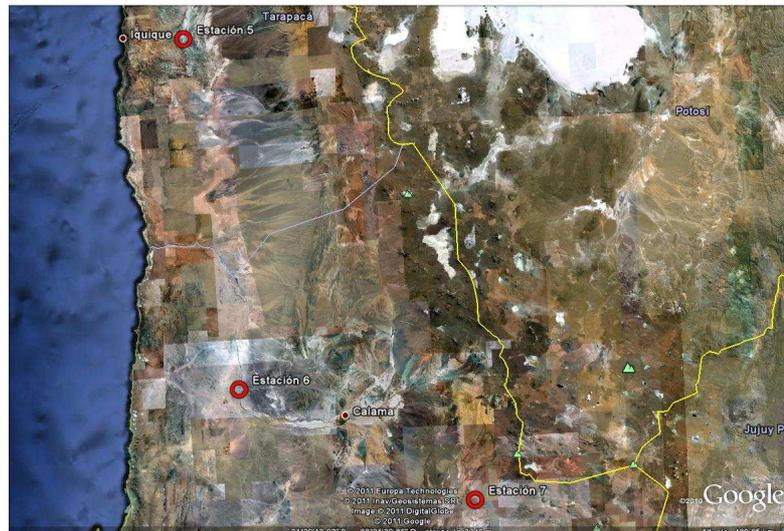


Figura 2. Disposición de las Estaciones 6, 7 y 8. Se observan las posiciones de las ciudades de Iquique y Calama. También se observa partes de Bolivia (Potosí) y Argentina (Provincia de Jujuy) (Google Earth®).

Estas tres estaciones pertenecen a una red de la CENMA (Centro Nacional de Medioambiente) y se encuentran en el extremo norte de Chile (Figura 2). Los datos fueron tomados utilizando estaciones meteorológicas formadas por dataloggers marca NES modelo MODAS 1632S, sensores de irradiación solar global (Kipp & Zonen/CMP11), sensores de temperatura (E+E Elektronik/PT 1000) y humedad relativa (E+E Elektronik/HC101).

PRESENTACIÓN DE LOS DATOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis gráfico de los datos de irradiación es quizás lo más novedoso de este trabajo. Se trata de construir los valores de irradiación de un “día promedio” que representa a aproximadamente 30 días de mediciones. En principio, la gráfica de la irradiación a lo largo de un día indica cómo ha sido la disponibilidad del recurso, si el mismo ha sido obstruido por nubes u obstáculos en la línea de horizonte.

Para un día claro, la evolución temporal de la irradiación global es una parábola entre el amanecer y el ocaso, como se observa en la Figura 3.

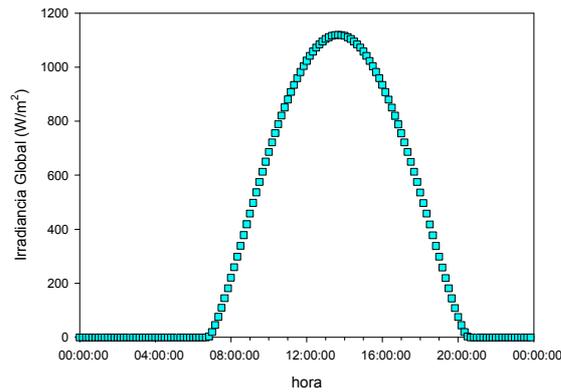


Figura 3. Gráfica típica de la irradiancia solar global para un día claro.

Eso es precisamente lo que estiman los modelos de día claro. Ahora bien, si se disponen de datos de irradiancia tomados cada cierta cantidad constante de minutos t , para la creación de este día promedio simplemente se promedian los valores de irradiancia $G_{t_i}^d$ en cada momento t_i (con $i = 0, 1, 2, \dots, n$, y n la cantidad total de datos tomados por día) de todos los d días medidos, de tal manera que $t_1 = t_0 + t$, $t_2 = t_1 + t, \dots, t_n = t_{n-1} + t$. Así el valor de la irradiancia promedio \bar{G}_{t_i} para el momento t_i se obtendrá como

$$\bar{G}_{t_i} = \frac{1}{m} \sum_{d=1}^m G_{t_i}^d \quad (1)$$

donde d es el día ($d = 1, 2, 3, \dots, m$) y m es la cantidad total de días.

Este sencillo tratamiento permite analizar series temporales con cantidades masivas de datos. Por ejemplo, si se registran valores de irradiancia cada 10 minutos, es decir que $t = 10$ minutos, al cabo de un mes se tendrán 4320 datos y en un año 52560 datos. Si se considera que se pueden llegar a tener varias estaciones, la cantidad de datos a analizar podría ser muy grande. Debe destacarse que el problema no radica en la cantidad de datos a procesar, sino en cómo presentarlos de manera condensada y eficiente para su interpretación por parte de analistas o tomadores de decisiones, es decir, personas. Deben, entonces, considerarse métodos que permitan condensar toda la información contenida en esas series pero sin perder demasiada información.

Siguiendo el proceso de la ecuación (1), en las Figuras 4a, 5a, 6a y 6b se muestran los resultados obtenidos al generar IDPs que representan a 30 días: desde el 13/06/2010 al 16/07/2010 (invierno) y desde el 15/12/2010 al 15/01/2011 (verano), es decir, días alrededor de los solsticios (21 de diciembre y 21 de junio), para las 7 estaciones.

En cada gráfica se ha agregado el valor del desvío estándar σ_i correspondiente al valor de irradiancia \bar{G}_{t_i} . El desvío estándar es una medida de la dispersión de los datos alrededor de la media aritmética (Waypole *et al*, 2006). En este caso, indicarán si el valor de irradiancia global promedio \bar{G}_{t_i} de un cierto momento i procede de datos de varían mucho o si proviene de datos que varían poco, respecto de la media aritmética. Esto dará una idea de la variación de la irradiancia dentro de ese momento t_i para cada día d considerado.

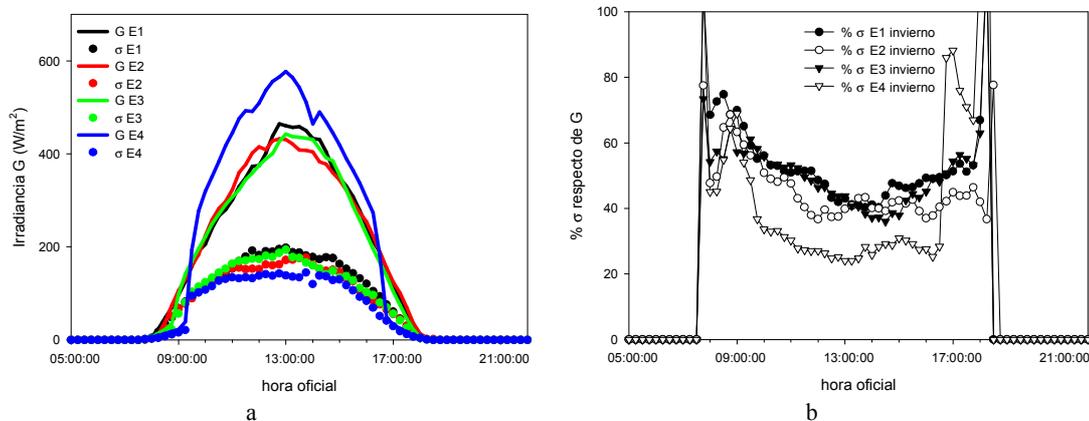


Figura 4a IDP de las Estaciones 1 (G E1), 2 (G E2), 3 (G E3) y 4 (G E4) para el solsticio de invierno (13/06/2010 al 16/07/2010). Figura 4b. Se han agregado los desvíos estándar de los valores de irradiancia calculados para cada Estación.

Se aprecia en la Figura 4a que para los datos de invierno de las Estaciones 1, 2 y 3, las gráficas IDP ofrecen resultados similares entre sí. Solo los datos de la Estación 4 resaltan por sobre los otros por dos causas: son mayores en valor y

presentan obstrucción del horizonte para el sensor al amanecer y al atardecer. Esto se debe a que la estación está aproximadamente 1 kilómetro más arriba que las otras (menos atenuación atmosférica) y a que el horizonte de la estación es obstruido por cadenas montañosas.

Resulta interesante notar que las desviaciones estándar de las 4 IDP son casi iguales tanto cualitativa como cuantitativamente. Para tener una mejor idea del significado de la desviación estándar, en la Figura 4b se grafica el porcentaje del valor \bar{G}_i que representa σ_i . De esa gráfica se puede deducir que las variaciones en la irradiancia en invierno están distribuidas equitativamente a lo largo de los días, principalmente cuando la masa de aire es menor a 2.

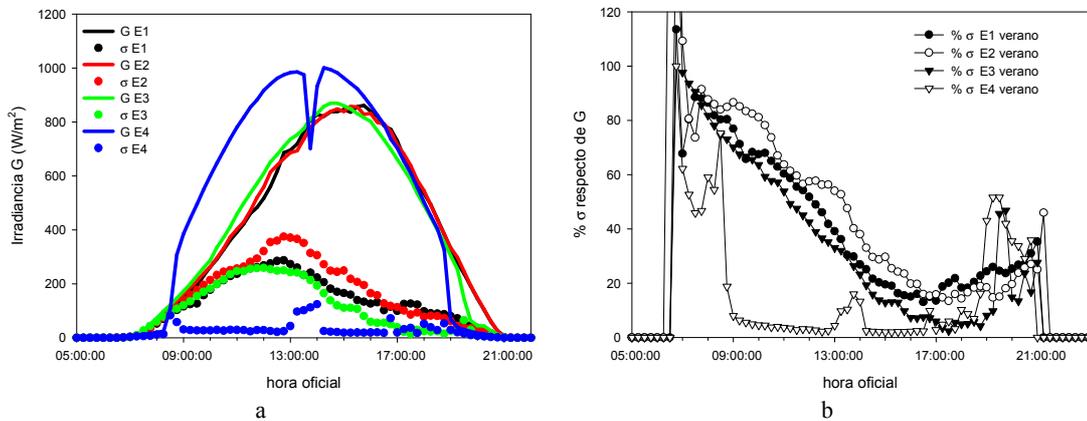


Figura 5.a Gráficas IDP de las Estaciones 1 (G E1), 2 (G E2), 3 (G E3) y 4 (G E4) para el solsticio de verano (15/12/2010-15/01/2011). Figura 5b Se han agregado los desvíos estándar de los valores de irradiancia estimados para cada Estación.

Para las IDP de verano (Figura 5a) se detecta algo interesante: en los datos de las Estaciones 1, 2 y 3, las desviaciones estándares σ indican la presencia de nubosidad al principio del día, disminuyendo luego de las 15:00 hs. (hora oficial). Esto se observa detalladamente en la Figura 5b. Ese es un dato de importancia para la implementación de sistemas que aprovechen la energía del Sol. Para los datos de la Estación 4 se observa que algo hace sombra sobre el sensor alrededor del mediodía solar. Esta situación reduce la posibilidad de presentar esos datos como representativos ya que los mismos deben someterse a procesos de filtrado y reconstrucción.

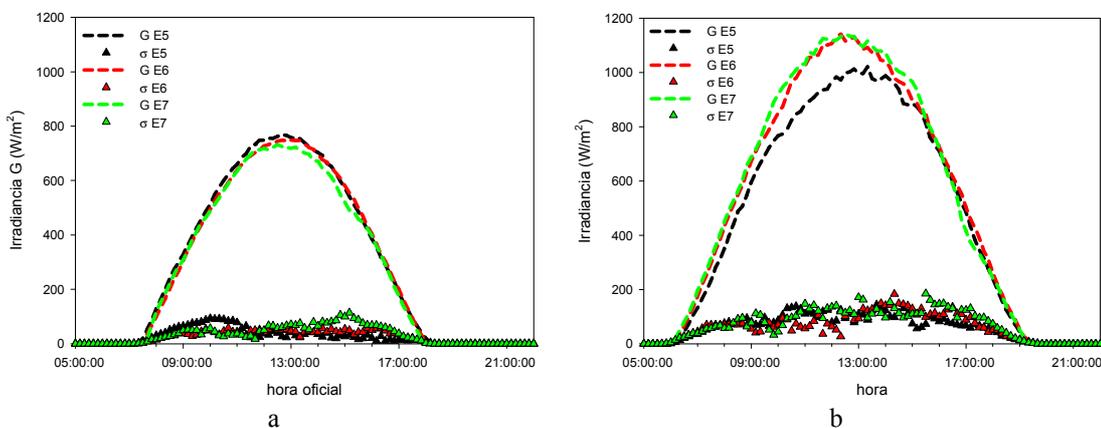


Figura 6a. Irradiancias de días promedios de las Estaciones 5 (G E5), 6 (G E6) y 7 (G E7) para el solsticio de invierno. Figura 6b. Irradiancias de días promedios de las Estaciones 5 (G E5), 6 (G E6) y 7 (G E7) para el solsticio de verano. Se han agregado los desvíos estándar de los valores de irradiancia estimados para cada Estación.

Para las IDP de los datos de las Estaciones 5, 6 y 7 (Figura 6a) se observa una marcada diferencia respecto de los datos de la Figura 4a. Las gráficas de desviación estándar sugieren un clima con poca nubosidad durante el invierno (contrariamente a lo que sucede en las Estaciones 1, 2 y 3 en la misma estación). Los valores de irradiancia son mayores a los de las estaciones mencionadas debido, principalmente, a la altura sobre el nivel del mar y al clima árido de la región donde se encuentran ubicadas (extremo norte de Chile).

Una vez determinados los valores de las IDP, el mismo se compara contra un día claro promedio calculado a partir de estimaciones usando modelos de día claro. En este trabajo se han utilizado los modelos de Bird (Bird y Hulstrom, 1981) y ARG-P (Salazar et al, 2010) como modelos de cielo claro. El primero es un modelo físico mientras que el segundo es un modelo empírico.

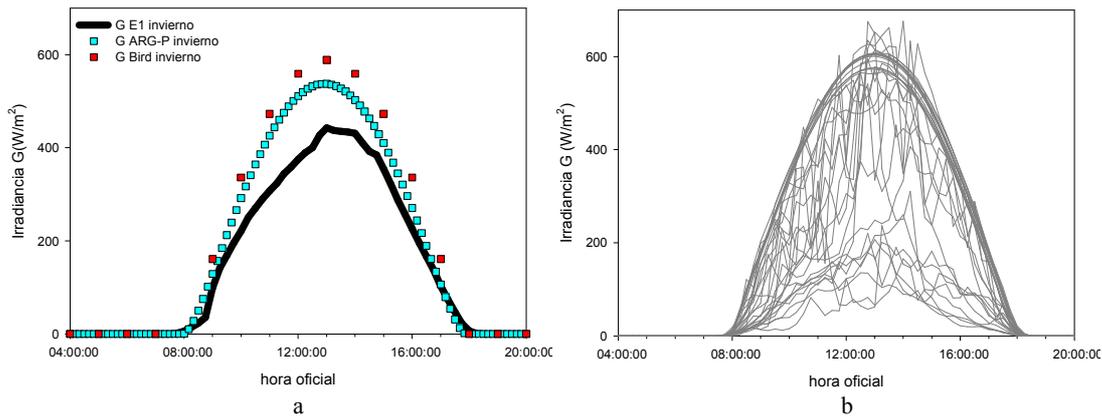


Figura 7a. Comparación entre valores de irradiancia de día promedio de invierno medido para la Estación 1, con estimados por modelos de día claro para invierno. En la Figura 7b se muestran todos los valores correspondientes al periodo analizado, completando 31 días de datos.

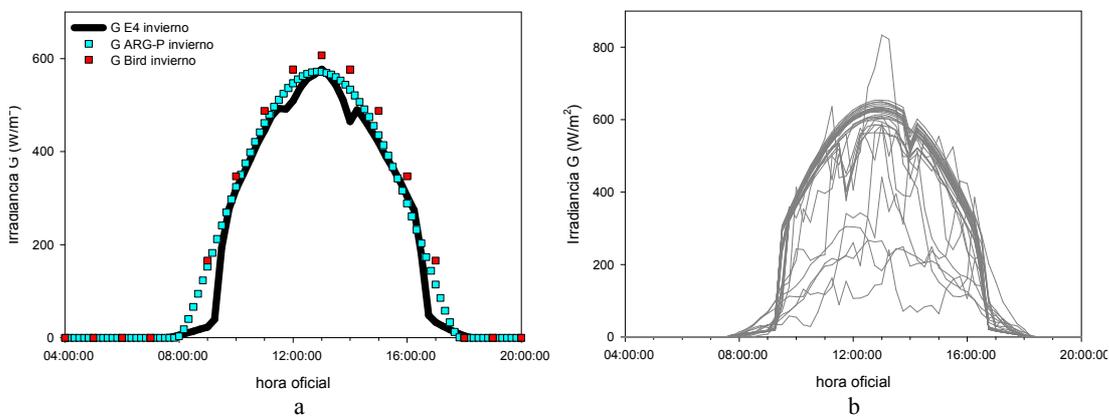


Figura 8a. Comparación entre valores de irradiancia de día promedio de invierno medido para la Estación 4, con estimados por modelos de día claro para invierno. En la Figura 8b se muestran todos los valores correspondientes al periodo analizado, completando 31 días de datos.

Estas comparaciones se efectúan para apreciar que tanto se apartan los valores medidos de irradiancia global, dentro de un periodo de tiempo (30 días en este caso) de los valores que se esperan para días claros. Esta información grafica muestra rápidamente, mediante la grafica IDP si el sitio en cuestión presenta cielos nublados o no.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

- El método detecta sombreados del sensor, por obstrucción de rayos, sobre todo para masas de aire menores a 2. Cuando el valor de la IDP desciende abruptamente, se sospecha que ha ocurrido sombreado del sensor. Sin embargo, esto no es concluyente por lo que debe cotejarse su verosimilitud revisando los datos diarios de irradiancia.
- Las IDP brindan información sobre los momentos del día en los que suceden con más frecuencias las variaciones del valor de irradiancia. En la Figura 5.a se observa que en las Estaciones 1, 2 y 3, para la estación del verano, la mayor parte de la variación de la irradiancia solar global se da entre el amanecer y el mediodía, aproximadamente, disminuyendo esta variación hacia el atardecer. Para la misma época, la Estación 4 denota una variación, por sombreado, alrededor del mediodía solar.
- En la Figura 7a, al principio del día y hasta pasado el mediodía, la IDP para la Estación 1 en invierno difiere de lo esperado para un día claro, pero la desviación estándar (Figura 4a) es casi constante durante todo el día típico (Figura 4b). Además de la variación de la irradiancia, existen indicios de que la falta de correlación entre el IDP y el día claro se debe a que la irradiancia es menor a lo esperado para ese momento del día en los días analizados. Esto se deduce porque en la IDP de la Estación 1 para invierno al principio y al final del día se tiene el mismo grado de dispersión de los datos (similares valores de σ_1 para los valores de IDP al principio y al final del día típico), sin embargo la correlación de esos momentos de la IDP no es el mismo comparado con los modelos de día claro. Esta situación no ocurre para los datos de verano de la misma estación (Figura 5a).

- Los datos de irradiancia de la Estación 5, para la época de verano, muestran un comportamiento no esperado, ya que no se alcanzan los valores de irradiancia de las otras estaciones (6 y 7) y asimetrías por la mañana, a pesar que los desvíos no lo indican. Esto puede deberse a problemas de limpieza de la cúpula del sensor (Kipp & Zonen CMP 11), o bien a aumentos de turbidez atmosférica (por ejemplo, por incremento de la cantidad de vapor de agua presenta en la troposfera).

CONCLUSIONES

En este trabajo se plantea la creación de un día típico de valores promedios de irradiancias (IDP) para realizar el análisis de las variaciones de las mismas en cada día a lo largo de una serie de días. A partir de datos tomados en 7 estaciones en la Republica de Chile, distribuidas desde la I Región a la IV Región, se analizan las IDP de 30 días alrededor de los días de solsticio (21 de junio y 21 de diciembre). Utilizando la desviación estándar como herramienta estadística se logra extraer información referida a las características de la nubosidad presente en cada Estación durante los periodos analizados. Esta información resulta útil para saber en que momento del día la irradiancia varía más respecto de los valores de irradiancia en la IDP. La comparación con modelos de día claro ayuda a establecer la naturaleza de los valores de IDP obtenidos.

El método tiene un gran potencial para extraer información relevante de grandes cantidades de datos de irradiancia.

REFERENCIAS

- Bird R. E., R. L. Hulstrom (1981) A Simplified Clear Sky model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces, SERI Technical Report SERI/TR-642-761.
- Salazar G. A., L. A. Hernández y L. R. Saravia (2010) Practical models to estimate horizontal irradiances in clear sky conditions. Preliminary results. *Renewable Energy* 35, pp. 2452-2460.
- Walpole R., R. Myers, S. Myers, K. Ye (2007) *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. Ed. México. Pearson-Prentice Hall.

ABSTRACT: This paper presents a method of statistical and graphical analysis to extract information on the variation of global solar irradiance throughout the day, for a number of days in a site. The irradiance values for all the analyzed days are condensed in a typical day by the Average Day Irradiance (IDP) graph. Using clear sky models and the standard deviation of the IDP, the nature of the values obtained in the IDP is determined. The data analyzed in this paper come from 7 weather stations installed from Region I to Region IV of Chile.

Keywords: irradiance, typical day, statistics, Chile