

ENERGIA SOLAR E INSOLACION EN EL VALLE DEL RIO ELQUI IV REGION - CHILE

Manlio Maldini Sánchez - Universidad de La Serena
Benavente 980 - Casilla 599
La Serena - Chile

RESUMEN

En este trabajo se informa del potencial solar que incide sobre una superficie horizontal en la ciudad de La Serena en base a registros almacenados desde el año 1980, los que se realizaron en la banda comprendida entre 0.29 y 3 μm . Se informa además de las horas de insolación en la misma ciudad, para el período comprendido entre los años 1973 y 1990.

Además se incluye un análisis del potencial solar en el Valle de Río Elqui en virtud del procesamiento de los datos mediante análisis numérico. Se realiza, para todos los casos, una comparación con las condiciones teóricas para cada localidad.

INTRODUCCION

En la ciudad de La Serena se cuantificó el potencial solar global que incide sobre una superficie horizontal y la duración de la insolación, en la Colina El Pino cuya altitud es de 90 m sobre el nivel del mar y con coordenadas geográficas de 29°54' de latitud sur y 71°54' de longitud oeste.

La Serena es una ciudad costera donde predomina un clima templado con abundante nubosidad debido a la influencia marítima. La temperatura media anual es del orden de los 15° C y la humedad relativa del aire tiene una media que alcanza al 76%. La topografía del lugar donde se realizaron las observaciones se presenta como una planicie limitada, en su parte oriental, por cerros de baja altura.

Esta información de radiación solar corresponde a medidas de valores instantáneos y continuos que se han realizado desde el año 1980. El instrumento detector es un solarímetro Kipp and Zonen y las mediciones fueron registradas en cintas de papel milimétricas por medio de un inscriptor Cole-Parmer. El equipo fue calibrado de acuerdo a las normas establecidas por la International Pyrheliometric Scale 1956. El solarímetro detecta la diferencia de temperatura entre un cuerpo negro y la temperatura ambiente en la banda comprendida entre 0.29 y 3 μm de radiación térmica.

METODOLOGIA

El análisis de la información almacenada se hizo mediante métodos numéricos: para los días completamente despejados se ajustó la curva de radiación a una parábola de segundo grado por medio del método de los mínimos cuadrados, determinando la ecuación de la curva que mejor representaba la distribución de la energía recibida durante el período de insolación diaria; para días cubiertos o para aquellos en los cuales no fue posible aplicar el proceso anterior se utilizó el método trapezoidal de Simpson con el sólo propósito de cuantificar la radiación solar recibida durante el día (Ref. 1).

Para registrar el período de insolación se utilizó el heliógrafo de Cambell-Stokes, en el cual, una esfera de vidrio, que actúa como fuente colectora, produce una imagen focal que quema una cartulina de la que se provee diariamente, de manera que si durante todo el día el Sol ha brillado sin interrupción deja inscrita sobre la cartulina un surco continuo desde la hora en que sale hasta la de su puesta. Cada vez que una nube se interpone entre el instrumento y el sol el surco se interrumpe.

RESULTADOS

Los valores horarios medios mensuales de radiación solar para días completamente despejados y su distribución a lo largo del día sugieren un ajuste parabólico de segundo grado el que se realiza mediante el método de los mínimos cuadrados. En base a este ajuste, hecho para cada una de las localidades en estudio, las tablas y gráficos que se presentan a continuación corresponden al resumen del período de observación y están contruidos en función de una gran cantidad de datos y del análisis de los mismos

La Tabla N°1 presenta para cada mes del año: el flujo medio mensual de radiación recibido durante el día, en su confección se ha considerado el total de radiación solar, incluyendo los días despejados y días con nubosidad; el promedio mensual de radiación solar que incide en una superficie horizontal en días completamente despejados; y la duración de la insolación. El flujo total para días despejados se determinó midiendo el área encerrada por la curva de ajuste y la duración de la insolación se obtuvo a partir de los puntos en que la curva de ajuste cortaba el eje x.

| M E S | FLUJO MEDIO | DIAS DESPEJADOS | |
|--------------------|----------------|-----------------|-------------|
| | | FLUJO | HRS. DE SOL |
| ENERO | 20.32 | 29.16 | 12.5 |
| FEBRERO | 19.58 | 24.84 | 12.0 |
| MARZO | 13.31 | 21.17 | 11.5 |
| ABRIL | 11.42 | 17.53 | 11.4 |
| MAYO | 8.82 | 12.67 | 10.2 |
| JUNIO | 7.93 | 11.92 | 10.1 |
| JULIO | 8.67 | 13.03 | 10.2 |
| AGOSTO | 11.51 | 16.45 | 11.4 |
| SEPTIEMBRE | 14.49 | 21.56 | 11.5 |
| OCTUBRE | 16.83 | 25.06 | 12.0 |
| NOVIEMBRE | 18.44 | 28.98 | 12.5 |
| DICIEMBRE | 19.22 | 29.63 | 12.7 |
| MEDIA ANUAL | 14.18 | 20.98 | 11.5 |

Tabla N° 1 Flujo Medio de Radiación en La Serena en MJ/m² día.

Solarimetría

A continuación se informa de las condiciones solarimétricas en la ciudad de La Serena para el período comprendido entre el mes de junio de 1973 y el mes de mayo de 1990.

El período de observación corresponde en total a 6209 días de los cuales se tiene información 4764 días, lo que equivale al 76.7% del período. El número promedio de horas de sol al año que se ha obtenido es de 2147 lo que implica una media diaria de 5.87 horas de sol. La relación entre las horas observadas y las horas teóricas corresponde a 0.49.

La Tabla N°2 registra los valores medios de la duración de la insolación diaria observada durante los últimos 17 años. Aparecen también los valores teóricos promedios mensuales de las horas de sol para la ciudad de La Serena, los que se han obtenido en virtud de la siguiente ecuación (Ref. 2) :

$$T = (2/15) \arccos (-\operatorname{tg} \phi * \operatorname{tg} \delta)$$

donde : ϕ corresponde a la latitud del lugar y δ a la declinación del sol.

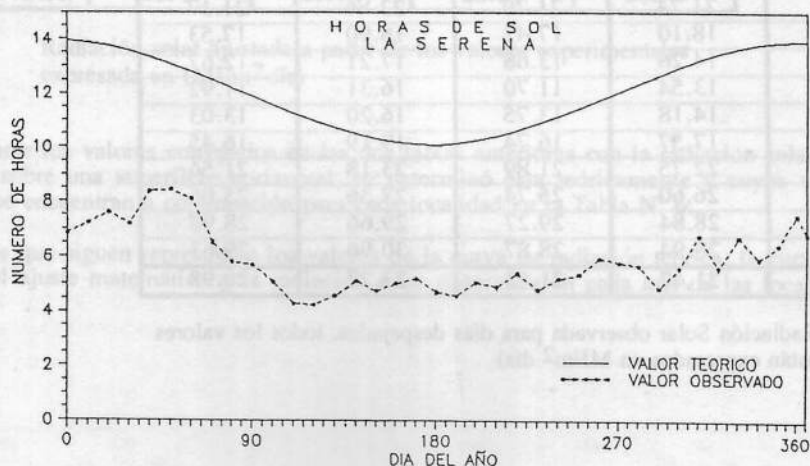
El gráfico N° 1 muestra la curva de la distribución de la duración de la insolación en esta ciudad y está contrastada con la curva teórica para la misma.

Con la única excepción del mes de febrero todas las relaciones están próximas al 50%, ésto se atribuye a que la menor cantidad de información fue reunida en el mencionado mes.

La Tabla N° 3 muestra el número de días despejados, el número de días con una insolación igual o superior al 50% de las horas teóricas promedio de sol y el número de días cubiertos. Para la confección de ella se consideró como día despejado a aquel cuya insolación es superior al 90% del valor teórico y se consideró como día completamente cubierto a aquel para el cual la duración de la insolación no superaba el 5% de su valor teórico diario. Se incluye además el número de días observados en cada mes para el período que se informa.

| MES | DURACION DE LA INSOLACION | | |
|-------------|---------------------------|---------|------|
| | OBSERVADA | TEORICA | (%) |
| ENERO | 7.33 | 13.70 | 0.54 |
| FEBRERO | 8.40 | 13.05 | 0.64 |
| MARZO | 5.98 | 12.18 | 0.49 |
| ABRIL | 4.55 | 11.26 | 0.40 |
| MAYO | 4.81 | 10.49 | 0.46 |
| JUNIO | 5.01 | 10.10 | 0.50 |
| JULIO | 4.89 | 10.28 | 0.48 |
| AGOSTO | 5.29 | 10.95 | 0.48 |
| SEPTIEMBRE | 5.62 | 11.85 | 0.47 |
| OCTUBRE | 5.58 | 12.77 | 0.44 |
| NOVIEMBRE | 6.17 | 13.54 | 0.46 |
| DICIEMBRE | 6.87 | 13.90 | 0.49 |
| MEDIA ANUAL | 5.87 | 12.00 | 0.49 |

Tabla N° 2 Horas promedio mensual de insolación en La Serena



| M E S | NUMERO DE DIAS | | | RELACION PORCENTUAL | | | N° CASOS |
|------------|----------------|-----|---------|---------------------|------|---------|-------------|
| | 100% | 0% | > = 50% | 100% | 0% | > = 50% | |
| ENERO | 110 | 27 | 229 | 26.6 | 6.5 | 55.3 | 414 |
| FEBRERO | 59 | 3 | 120 | 34.9 | 1.8 | 71.0 | 169 |
| MARZO | 74 | 40 | 164 | 22.0 | 11.9 | 48.7 | 337 |
| ABRIL | 80 | 108 | 151 | 20.3 | 27.3 | 38.2 | 395 |
| MAYO | 98 | 97 | 215 | 21.3 | 21.1 | 46.7 | 460 |
| JUNIO | 100 | 95 | 229 | 23.4 | 22.2 | 53.6 | 427 |
| JULIO | 77 | 100 | 224 | 17.3 | 22.3 | 50.3 | 444 |
| AGOSTO | 115 | 100 | 221 | 26.4 | 22.9 | 50.7 | 436 |
| SEPTIEMBRE | 121 | 104 | 202 | 27.1 | 23.3 | 45.2 | 447 |
| OCTUBRE | 88 | 99 | 192 | 20.3 | 22.8 | 44.2 | 434 |
| NOVIEMBRE | 98 | 72 | 204 | 23.6 | 17.3 | 49.0 | 416 |
| DICIEMBRE | 74 | 41 | 193 | 19.2 | 10.6 | 50.1 | 385 |
| T O T A L | 1094 | 886 | 2344 | 23.0 | 18.6 | 49.2 | 4764 |

Tabla N° 3 Relación porcentual de días despejados y días cubiertos en la ciudad de La Serena

Curvas de Radiación

Las observaciones de radiación solar que se han realizado permiten establecer comparaciones entre las distintas localidades del Valle del Río Elqui, como también su relación con los índices de radiación solar extraterrestre propuestos teóricamente. (Ref. 3)

La Tabla N° 4 reproduce los índices de radiación medidos en las localidades de Huanta, Pisco Elqui y Vicuña (Ref. 4) y en la ciudad de La Serena para días despejados.

| M E S | L O C A L I D A D | | | |
|------------|-------------------|-------------|--------|-----------|
| | HUANTA | PISCO ELQUI | VICUÑA | LA SERENA |
| ENERO | 26.31 | 27.83 | 29.74 | 29.16 |
| FEBRERO | 25.06 | 25.78 | 27.90 | 24.84 |
| MARZO | 21.74 | 21.20 | 22.86 | 21.17 |
| ABRIL | 18.10 | 17.42 | 18.90 | 17.53 |
| MAYO | 14.26 | 13.68 | 17.21 | 12.67 |
| JUNIO | 13.54 | 11.70 | 16.31 | 11.92 |
| JULIO | 14.18 | 13.75 | 16.20 | 13.03 |
| AGOSTO | 17.57 | 16.74 | 19.19 | 16.45 |
| SEPTIEMBRE | 22.75 | 21.89 | 23.18 | 21.56 |
| OCTUBRE | 26.60 | 25.74 | 27.36 | 25.06 |
| NOVIEMBRE | 28.84 | 29.27 | 29.66 | 28.98 |
| DICIEMBRE | 28.94 | 28.87 | 30.96 | 29.63 |
| T O T A L | 21.47 | 21.13 | 23.27 | 20.98 |

Tabla N° 4 Radiación Solar observada para días despejados, todos los valores están expresados en MJ/m² día)

Los valores medios mensuales para días completamente despejados, obtenidos experimentalmente, han sido ajustados bajo una aproximación sinusoidal mediante el método de los mínimos cuadrados por la función :

$$y = a + b \text{ sen } (x)$$

donde x es de la forma :

$$x = \frac{360 (n - 263.75)}{365}$$

y n corresponde al número del día del año a partir de 1 de enero.

El resultado de este proceso se observa en la siguiente Tabla N° 5, incorporándose además los valores de los parámetros a y b del ajuste de la curva sinusoidal y el correspondiente valor medio anual para cada localidad.

| MES | LOCALIDAD | | | |
|-------------|-----------|-------------|--------|-----------|
| | HUANTA | PISCO ELQUI | VICUÑA | LA SERENA |
| ENERO | 28.42 | 28.89 | 30.15 | 29.06 |
| FEBRERO | 25.96 | 26.14 | 27.71 | 26.19 |
| MARZO | 22.36 | 22.13 | 24.15 | 22.01 |
| ABRIL | 18.42 | 17.73 | 20.25 | 17.43 |
| MAYO | 15.30 | 14.26 | 17.16 | 13.80 |
| JUNIO | 13.84 | 12.63 | 15.72 | 12.10 |
| JULIO | 14.44 | 13.30 | 16.31 | 12.80 |
| AGOSTO | 17.00 | 16.14 | 18.83 | 15.76 |
| SEPTIEMBRE | 20.71 | 20.29 | 22.52 | 20.09 |
| OCTUBRE | 24.64 | 24.68 | 26.41 | 24.67 |
| NOVIEMBRE | 27.72 | 28.11 | 29.46 | 28.24 |
| DICIEMBRE | 29.11 | 29.66 | 30.83 | 29.87 |
| a | 21.47 | 21.13 | 23.26 | 20.98 |
| b | 7.68 | 8.55 | 7.61 | 8.93 |
| MEDIA ANUAL | 21.47 | 21.14 | 23.27 | 20.98 |

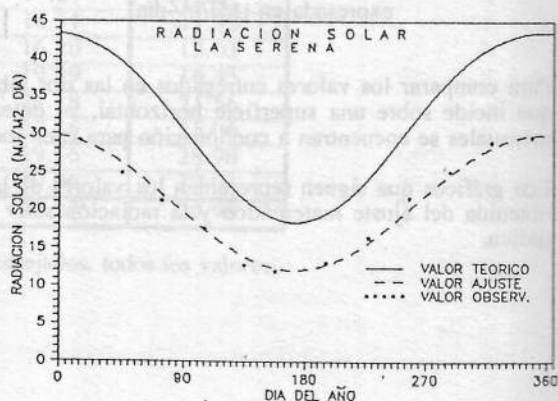
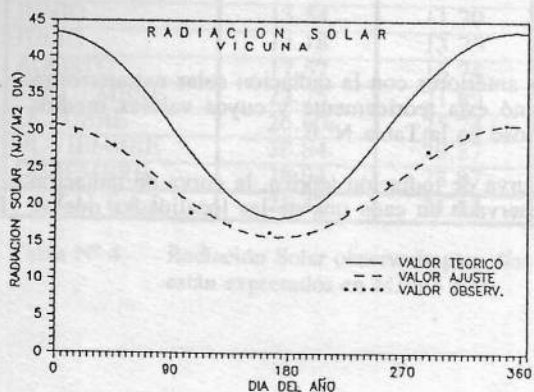
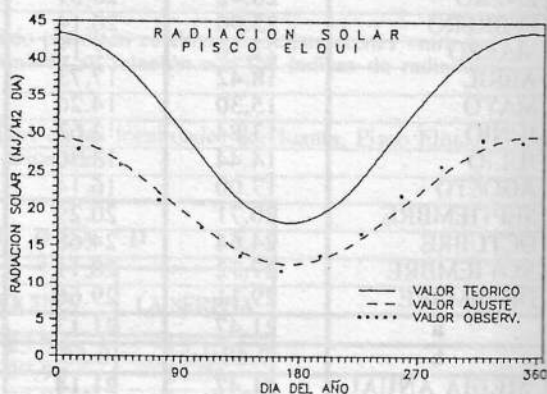
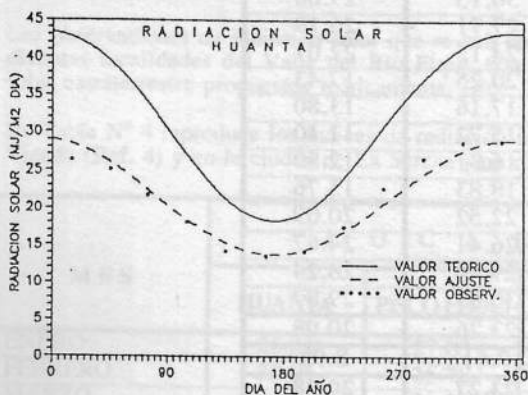
Tabla N° 5 Radiación solar ajustada a partir de los valores experimentales expresada en (MJ/m²día)

Para comparar los valores entregados en las dos tablas anteriores con la radiación solar extraterrestre que incide sobre una superficie horizontal, se determinó ésta teóricamente y cuyos valores medios mensuales se encuentran a continuación para cada localidad en la Tabla N° 6.

Los gráficos que siguen representan los valores de la curva de radiación teórica, la curva de radiación obtenida del ajuste matemático y la radiación solar observada en cada una de las localidades que se indica.

| MES | LOCALIDAD | | | |
|-------------|-----------|-------------|--------|-----------|
| | HUANTA | PISCO ELQUI | VICUÑA | LA SERENA |
| ENERO | 42.69 | 42.68 | 42.68 | 42.69 |
| FEBRERO | 39.43 | 39.41 | 39.41 | 39.42 |
| MARZO | 33.90 | 33.82 | 33.84 | 33.88 |
| ABRIL | 27.02 | 26.89 | 26.93 | 26.99 |
| MAYO | 21.21 | 21.05 | 21.17 | 21.17 |
| JUNIO | 18.44 | 18.28 | 18.33 | 18.40 |
| JULIO | 19.53 | 19.38 | 19.42 | 19.50 |
| AGOSTO | 24.24 | 24.10 | 24.14 | 24.21 |
| SEPTIEMBRE | 30.86 | 30.76 | 30.79 | 30.84 |
| OCTUBRE | 37.21 | 37.17 | 37.18 | 37.20 |
| NOVIEMBRE | 41.59 | 41.58 | 41.58 | 41.59 |
| DICIEMBRE | 43.45 | 43.43 | 43.44 | 43.44 |
| MEDIA ANUAL | 31.59 | 31.50 | 31.54 | 31.57 |

Tabla N° 6 Radiación solar extraterrestre, todos los valores están expresados en (MJ/m² día)



El índice de calidad o transparencia del cielo definida como la razón entre la radiación global que cae sobre una superficie horizontal para los días completamente despejados y la radiación extraterrestre aparece, para cada localidad en la Tabla N° 7. En un caso se ha calculado en función de los valores obtenidos en forma experimental y en el otro en función de las cantidades entregadas por el ajuste sinusoidal. En ella debe considerarse que:

E corresponde al valor medio mensual observado,

E' corresponde al valor medio mensual ajustado y

H corresponde al valor medio mensual de la radiación extraterrestre.

De la observación de esta tabla puede inferirse que aún cuando no existe un patrón común para las cuatro localidades los valores más altos del índice de transparencia del cielo tienden a localizarse en los meses de invierno, posiblemente a que las precipitaciones invernales preceden a días despejados con cielos relativamente limpios de polución atmosférica.

| LOCALIDAD | HUANTA | | PISCO ELQUI | | VICUÑA | | LA SERENA | |
|--------------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | E/H | E'/H | E/H | E'/H | E/H | E'/H | E/H | E'/H |
| ENERO | .62 | .67 | .65 | .68 | .70 | .71 | .68 | .68 |
| FEBRERO | .64 | .66 | .65 | .66 | .71 | .71 | .63 | .66 |
| MARZO | .64 | .66 | .63 | .65 | .68 | .71 | .62 | .65 |
| ABRIL | .67 | .68 | .65 | .66 | .70 | .75 | .65 | .65 |
| MAYO | .67 | .72 | .65 | .68 | .81 | .81 | .60 | .65 |
| JUNIO | .73 | .75 | .64 | .69 | .89 | .86 | .65 | .66 |
| JULIO | .73 | .74 | .71 | .69 | .83 | .84 | .67 | .66 |
| AGOSTO | .72 | .70 | .69 | .67 | .79 | .78 | .68 | .65 |
| SEPTIEMBRE | .74 | .67 | .71 | .66 | .75 | .73 | .70 | .65 |
| OCTUBRE | .71 | .66 | .69 | .66 | .74 | .71 | .67 | .66 |
| NOVIEMBRE | .69 | .67 | .70 | .68 | .71 | .71 | .70 | .68 |
| DICIEMBRE | .67 | .67 | .66 | .68 | .71 | .71 | .68 | .69 |
| MEDIA ANUAL | .69 | .69 | .67 | .67 | .75 | .75 | .66 | .66 |

Tabla N° 7 Índices mensuales y anuales de calidad del cielo para días despejados

CONCLUSIONES

Del análisis de los datos contemplados en este trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones :

- La media anual de radiación solar para la ciudad de La Serena es de 14,18 MJ/m² día, pero si sólo se considera los días despejados la media anual corresponde a 20,98 KJ/m² día.
- La media anual de la duración de la insolación para la ciudad de La Serena es de 5,87 horas, lo que equivale al 49% de las horas de sol teóricas,
- El 49,2% de los días del año corresponde a insolaciones superiores al 50% de las horas teóricas de sol en La Serena,

- Los índices de radiación solar entre una y otra localidad son muy semejantes, la media anual considerando sólo días despejados es :
 - 21.47 MJ/m² día en Huanta
 - 21.13 MJ/m².día en Pisco Elquí,
 - 23.27 MJ/m² día en Vicuña y
 - 20.98 MJ/m² día en La Serena
- Dado que todas las localidades se encuentran en las proximidades del paralelo 30 sur y considerando que la ciudad de La Serena está ubicada en el litoral, el hecho que el índice de radiación solar sea muy parecido al de las zonas interiores, con las cuales difiere en las condiciones climatológicas, se debe a que el período de insolación es mayor en La Serena. Debe tenerse presente que las localidades interiores, donde se realizó parte de este estudio, están rodeadas de cerros de apreciable altitud,
- El índice de calidad del cielo para días despejados es:
 - 0.69 en la localidad de Huanta,
 - 0.67 en la localidad de Pisco Elquí,
 - 0.75 en la localidad de Vicuña y
 - 0.66 en la ciudad de La Serena,
- El índice de calidad del cielo considerando el flujo total recibido durante el año es:
 - 0.62 para la localidad de Huanta
 - 0.62 para la localidad de Pisco Elquí,
 - 0.63 para la ciudad de Vicuña y
 - 0.45 para la ciudad de La Serena

REFERENCIAS

1. M. Maldini y J. Fernández, "Radiación Solar en el Valle del Río Elquí". V SENESE. Santiago; Chile, 1988.
2. J.A. Duffie and W. Beckman, "Solar Energy Thermal Process". New York; Wiley, 1974.
3. N.C.Harris, C.E., Miller, I.E. Thomas, "Solar Energy Systems Design. New York; Willey, 1985.
4. M. Maldini y J. Fernández, "Radiación Solar en el Valle del Río Elquí". V Congreso Latinoamericano y III Congreso Iberoamericano de Energia Solar, Cartagena; Colombia 1989.