

# Estimación de la Irradiancia Solar en la República de Panamá



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PANAMÁ  
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS FÍSICAS

Presentado por:  
Daniel Villarreal Chiari  
Asesor:  
Abdoulaye F. Diallo

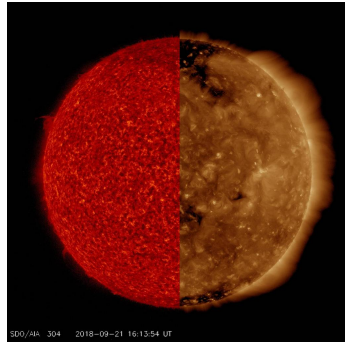
Panamá, Ciudad de Panamá,

Octubre 2018

- 1 La Radiación Solar
  - El Sol
  - Definiciones
  - Radiación Solar Extraterrestre
  - Influencia de la Atmósfera en la Radiación Solar
  - Modelos de Radiación Solar Diaria
  - Procesos Autoregresivos de Media Móvil (ARMA)

# La Radiación Solar

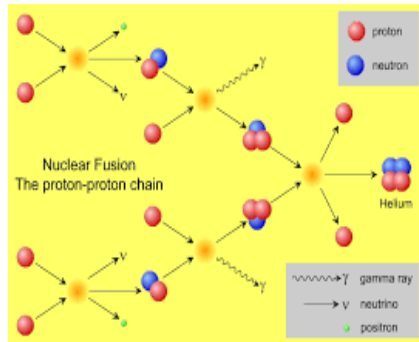
- En el Sol, ocurren reacciones nucleares, que dependen de sus características estructurales [4].
- Los fotones resultantes de estas reacciones nucleares transportan la energía producida [3].
- Las radiación visible e infraroja son las que en mayor cantidad atraviesan la atmósfera terrestre [4].



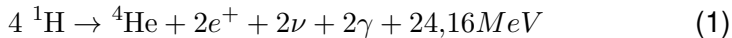
**Figura:** Imagen del Sol en ultravioleta (izq.) e infrarojo (der.). Fuente: NASA/GSFC/Solar\_Dynamics\_Observatory

# El Sol

- Es una estrella que se encuentra en promedio a una distancia de  $1,5 \times 10^{11} m$  de la Tierra (una unidad astronómica 1 UA).
- Se encuentra en etapa de secuencia principal.
- Su fuente de energía es la cadena protón-protón



**Figura:** Cadena PP. Fuente: [ciencias.bogota.unal.edu.co](http://ciencias.bogota.unal.edu.co)



# Definiciones

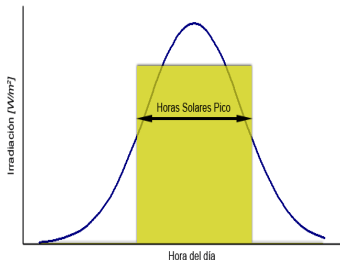
- Irradiancia Solar
- Radiación Solar Directa
- Radiación Difusa
- Radiación Solar Reflejada
- Radiación Solar Global

# Hora Sol Pico y Constante Solar

## Dos Definiciones Importantes

### Hora Sol Pico(hsp)

Considera el caso hipotético de una irradiancia constante de  $1000 \text{ W/m}^2$ , durante un tiempo relativamente corto, de modo que la energía incidente sea igual a la energía diaria total [2].



**Figura:** Hora Sol Pico. Fuente: [es.wikipedia.org/wiki/Hora\\_solar\\_pico](https://es.wikipedia.org/wiki/Hora_solar_pico)

### Constante Solar

Potencia lumínica por unidad de área recibida en una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación a la distancia Sol-Tierra promedio en las capas externas de la atmósfera se denomina Constante Solar (Gsc) [7].

En este trabajo se utiliza el valor de constante solar adoptado por el Centro Mundial de Radiación (World Radiation Center WRC):

$$1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

# Radiación Solar Extraterrestre

Para estimar la irradiancia solar extraterrestre, en 1983, Iqbal utiliza el modelo de Spencer (1971), en la forma de la ecuación 2

$$G_{on} = \begin{cases} G_{sc}(1,000110 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \sin B + \\ 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \sin 2B) \\ \boxed{B = (n - 1) \frac{360}{365}} \end{cases} \quad (2)$$

# Ángulo de Incidencia de la Radiación Solar

La relación geométrica entre un plano orientado en una dirección arbitraria relativa a la Tierra, y la radiación solar incidente, puede ser descrita en función de ángulos relativos a la posición del Sol.

Estos ángulos son:

- **Ángulo de Acimut de la Superficie  $\gamma$ ,**
- **Latitud  $\phi$ ,**
- **Inclinación de la Superficie  $\beta$ ,**
- **Ángulo Horario  $\omega$ ,**
- **Declinación  $\delta$ ,**
- **Ángulo de Incidencia  $\theta$ ,**
- **Ángulo de Elevación del Sol  $e$ ,**
- **Acimut del Sol  $\gamma_s$ ,**

$$\cos \theta = \sin \delta (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) + \cos \delta (\cos \phi \cos \beta \cos \omega + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \sin \beta \sin \gamma \sin \omega) \quad (3)$$

Para el caso de una superficie horizontal el ángulo de inclinación y la orientación acimutal es cero; por lo que bajo estas condiciones (3) se reduce a la expresión (4).

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (4)$$



# Radiación Solar Promedio Diaria Incidente en una Superficie Horizontal

La irradiancia solar instantánea  $G_o$  se define como:

$$G_o = G_{on} \cos \theta \quad (5)$$

en donde,  $G_{on}$  está dada por la relación (2) y  $\theta$  el ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre la superficie. Sustituyendo (4) y (2) en (5), se obtiene:

$$G_o = G_{sc}(1,000110 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \sin B + 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \sin 2B)(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \quad (6)$$

Integrando (6) desde el amanecer hasta el atardecer, se obtiene la radiación solar directa que se recibe en una superficie horizontal a lo largo del día:

$$H_o = G_{on} \left( \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (7)$$

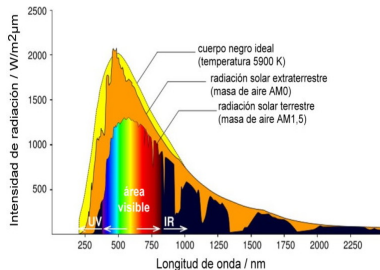
donde  $H_o$  es la energía diaria sobre una superficie horizontal,  $G_{on}$  es la irradiancia estimada por el modelo de Iqbal (ecuación (2)).

La ecuación (7) es el modelo que se usa en este trabajo para estimar la radiación solar directa que incide sobre una superficie horizontal.

# Influencia de la Atmósfera en la Radiación Solar

## Dispersión, Absorción y Reflexión

La atmósfera terrestre modifica la radiación solar que se transmite a través de ella. Esta modificación sucede mediante los fenómenos de **dispersión, absorción y reflexión**. Cada fenómeno depende de la longitud de onda de la radiación solar y de las dimensiones de las partículas atmosféricas que interactúan. Por lo que estas suceden en diferentes secciones de la atmósfera. Esto debido a que las partículas más grandes se encuentran en las capas más bajas y las partículas más pequeñas en las capas superiores [8, 5].



**Figura:** Espectro de Irradiancia Solar, Fuente: <http://klimat.czn.uj.edu.pl/>

A partir de la ecuación (7) se puede estimar la energía diaria en las capas externas de la atmósfera. Pero la radiación solar se ve afectada por la interacción con la atmósfera. Por lo tanto, para predecir la radiación solar que se recibe en la superficie terrestre, es necesario emplear otras herramientas. Estas herramientas son de dos tipos: la primera que busca predicciones de datos en tiempo real y la otra hace estimaciones en base a datos históricos. Para utilizar herramientas del segundo tipo se necesita la construcción de series temporales de la radiación solar histórica [6].

Uno de los métodos más usados para análisis de series de tiempo son los llamados procesos autoregresivos, en particular: ARMA y ARIMA. En este trabajo se utiliza el proceso ARMA porque la radiación solar histórica medida no muestra patrones de ascendencia o descendencia constante, lo cual permite el uso de un proceso ARMA.

# Procesos Autoregresivos de Media Móvil (ARMA)

- En ocasiones es posible modelar una variable en función de sus valores pasados.
- Esta es la principal idea que da origen a los polinomios autoregresivos y de media móvil.
- La combinación de ambos tipos produce una serie autoregresiva de media móvil.
- Este tipo de series se conoce con el nombre de *series temporales*.

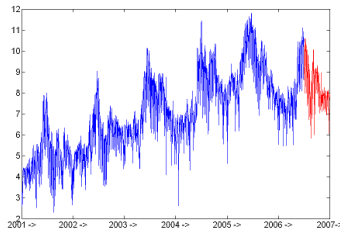
# Series Temporales

Una serie temporal es una sucesión de valores de una variable observada en determinados instantes de tiempo. El análisis de series temporales se basa principalmente en: la tendencia, estacionalidad, variación cíclica y/o variaciones accidentales de la misma.[1, 9].

- Los modelos que se producen a partir del análisis de series temporales pueden ser series univariantes o multivariantes.
- Una serie temporal es una secuencia aleatoria de variables ordenadas en el tiempo (un proceso estocástico), lo cual se puede representar como:

$$Y_t(\eta), \quad t = \dots, t-2, t-1, t, t+1, t+2, \dots \quad (8)$$

donde  $t$  es el instante en que se realiza la observación  $Y_t(\eta)$ .



**Figura:** Ejemplo de Serie de Tiempo. Fuente: <https://www.ugr.es/~jherrera/resultados.html>

tttt

||||

# Referencias I



**Alonso A.** *Introducción al Análisis de Series Temporales.*

Universidad Carlos III de Madrid. 2007. URL:

<http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/amalonso/esp/seriestemporales.pdf>.



**Sarmiento A.** *La Hora Sol Pico.* Centro de Estudio de

Tecnologías Energéticas Renovables. URL:

<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia22/HTML/articulo03.htm>.



**Julian Chen.** *Physics of Solar Energy.* Jhon Wiley & Sons, Inc, 2011.



**John A Duffie y William A Beckman.** *Solar engineering of thermal processes.* John Wiley & Sons, 2013.

# Referencias II



Protección Civil España. *Radiación Solar*. Protección Civil España. URL:

<http://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum17/vdm052.htm>.



Zamarbide I. “Predicción de Radiación Solar a Corto y Medio Plazo”. Tesis de mtría. Universidad Pública de Navarra, 2014.



Francis S Johnson. “The solar constant”. En: *Journal of Meteorology* 11.6 (1954), págs. 431-439.



M. Pidwirny. *Atmospheric Effects on Incoming Solar Radiation*. 2006. URL: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7f.html>.



## Referencias III



García C. Sánchez M. *Series Temporales Univariantes*.

Universidad Politécnica de Madrid. 2012. URL:

[http://www.etsii.upm.es/ingor/estadistica/Carol/SeriesUNIV\\_MIO\\_MP.pdf](http://www.etsii.upm.es/ingor/estadistica/Carol/SeriesUNIV_MIO_MP.pdf).