

## Medición de radiación solar global y comparación con datos de satélites para un sitio de México

DIBENE-ARRIOLA, Luis\*†, PAREDES-VÁZQUEZ, César y MESSINA-LÓPEZ, Víctor

*Universidad Politécnica de Zacatecas, Programa Educativo de Ingeniería en Sistemas Computacionales, Plan del Pardillo S/N, Parque Industrial, Fresnillo, Zac. C.P. 99059*

*Instituto Tecnológico Superior de Fresnillo, Av. Tecnológico número 2000, Col Solidaridad, Fresnillo, Zac. C.P. 99040*

Recibido Abril 5, 2017; Aceptado Junio 8, 2017

### Resumen

La comparación entre la radiación solar medida contra la especificada por la NASA para un sitio en Bahía de Banderas, surge porque el disponer de estaciones meteorológicas con piranómetros calibrados y certificados es muy costosa así como su recalibración y mantenimiento. Para ello se tomaron los dos años de mediciones con que se cuenta. Se observa que el patrón de comportamiento de los valores medios mensuales de irradiación diaria global (horizontal, e inclinada 20° al sur) incidente medidos a lo largo de los dos años es muy similar al presentado por la NASA para el sitio de medición. Se encontró que en general los valores NASA son superiores a los medidos, excepto para agosto y septiembre. Que esta diferencia para el caso de la irradiación horizontal fue del 7.68% con una desviación estándar de 6.17% y un rango de 19.29% mientras que en el caso de la irradiación global inclinada para los dos años de mediciones fueron mayores en un 5.69% con una desviación estándar del 7.87% y un rango de 21.01%. Estos porcentajes con respecto a los valores de la NASA.

### Radiación solar, medición, NASA

### Abstract

The comparison between solar radiation measured against that specified by NASA for a place in Banderas Bay arises because the availability of meteorological stations with calibrated and certified pyranometers is very expensive as well as their recalibration and maintenance. For this, two years of measurements were taken. It is observed that the behavior pattern of the monthly mean values of global daily irradiation (horizontal, and sloping 20 ° south) incident measured over the two years is very similar to that presented by NASA for the measurement site. It was found that in general the values NASA are superior to those measured, except for August and September. That this difference for the horizontal irradiation case was 7.68% with a standard deviation of 6.17% and a range of 19.29% whereas in the case of the inclined global irradiation for the two years of measurements were higher in 5.69% with A standard deviation of 7.87% and a range of 21.01%. These percentages with respect to NASA values.

### Solar radiation, measurement, NASA

**Citación:** DIBENE-ARRIOLA, Luis, PAREDES-VÁZQUEZ, César y MESSINA-LÓPEZ, Víctor. Medición de radiación solar global y comparación con datos de satélites para un sitio de México. *Revista del Desarrollo Tecnológico* 2017, 1-2: 60-73

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: ldibene@utbb.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La radiación que llega del sol a la tierra es la fuente principal de energía para la generación de los fenómenos en la atmósfera, en los océanos y, en general, para la vida en la tierra (Kalogirou, 2009). Su espectro se compone principalmente de luz ultra violeta (UV), luz visible e Infrarrojo cercano. Esa radiación atraviesa el espacio en forma de ondas electromagnéticas colimadas hasta llegar a la capa exterior de la atmósfera y permanece prácticamente constante y se le conoce como “Constante Solar” (Vega de Kuyper & Morales, 2015). El valor de dicha constante utilizado actualmente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) es de  $1367 \text{ W} / \text{m}^2$  y se ha mantenido desde 1982; sin embargo, se ha medido por la NASA y su valor en el año 2008 fue de  $1360.8 \pm 0.5 \text{ W} / \text{m}^2$ . Ese valor cambia a lo largo del año de acuerdo a la distancia entre la tierra y el sol en un 6.6% siendo más intensa en enero que en julio, y también cambia hasta un 0,1%, dependiendo de la actividad solar (Rosemann, 2011).

Una vez que esa radiación entra a la atmósfera y pasa a través de ella, se reduce por la dispersión y absorción causada por las moléculas de aire, partículas de aerosol, gotas de agua y cristales de hielo en las nubes. Las moléculas gaseosas y los aerosoles causan la mayor parte de la absorción de la radiación solar. La dispersión de la radiación solar tiene lugar dentro de toda la gama espectral (Kalogirou, 2009). La radiación UV es dispersada por moléculas y aerosoles y absorbida por el  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  y otros gases. El Ozono absorbe toda la peligrosa luz ultravioleta C y más del 90% de la luz ultravioleta B. La luz visible es dispersada por moléculas y aerosoles, pero es poco absorbida; aquí las ondas más cortas son más dispersadas, lo que hace que el cielo se vea azul.

La radiación infrarroja es absorbida por el vapor de agua y los aerosoles, pero poco dispersada, de modo que aproximadamente el 30% de la toda la radiación extraterrestre que llega a la tierra es reflejada de nuevo al espacio, un 19% es absorbida por las nubes y la atmósfera y un 51% es absorbida por el agua y la tierra (Rosemann, 2011). Como resultado de la interacción entre la atmósfera y la radiación solar una porción de los rayos originalmente colimados es dispersada o no direccional y alguna de esta radiación dispersa alcanza la tierra desde el cielo y se la llama radiación difusa, mientras que los rayos que llegan colimados al suelo se les llama radiación directa. Juntos forman la radiación global (Kalogirou, 2009). A la radiación que finalmente llega al suelo se le llama recurso solar y como se puede entender, éste es muy variable por la influencia de la atmósfera que debe atravesar.

Debido a la aleatoriedad anterior, para poder estimar la radiación solar en un determinado lugar para el futuro es necesario recurrir a bases de datos del pasado obtenidas por medio de estaciones de medición terrestres y/o conjuntos de datos modelados o por satélites. Es muy importante que dicha información sea lo más precisa y exacta posible ya que los datos exactos de la radiación solar son fundamentales para la industria de la energía solar tanto en la investigación y el desarrollo, como en la elección de los lugares óptimos y tipos de sistemas, en la supervisión de la eficiencia, y en la programación de mantenimiento (Rosemann, 2011). Además, también para lograr una mayor penetración de la conversión de la energía solar en la red eléctrica y la reducción de los costos de integración del sistema.

Específicamente; la comprensión de los impactos de las nubes y otros componentes meteorológicos en el recurso solar y la cuantificación de la variabilidad intra- / inter-horaria, estacional e interanual son esenciales para diseñar con precisión proyectos de energía solar a escala de utilidad (Aron Habte, 2017). Para que estos valores sean precisos, se requieren muchos años de mediciones. Se estima que aun así, por muy precisas y completas que sean las bases de datos disponibles, puede haber un error de un 10% en la predicción de la energía solar anual incidente y hasta un 30% en valores mensuales.

El uso de la energía solar ha crecido enormemente en los últimos años y, sin embargo, representa sólo alrededor del 1% de la generación de electricidad a nivel mundial. Los observadores convencionales ahora predicen que la energía solar fotovoltaica podría proporcionar el 16% de la electricidad global a mediados de siglo (Jeffrey Ball, 2017). También existe un amplio y confiable conjunto de tecnologías para convertirla y utilizarla como energía térmica (Albizzati, 2015). Los cálculos de especialistas en evaluación de recursos energéticos prevén que para el año 2100, cerca del 50% de la energía que se use en el mundo será de origen solar (Ciencia UNAM, 2013). Además, hay un creciente interés en el campo de la investigación de la radiación solar debido a sus muchas aplicaciones en los procesos físicos, químicos y biológicos que se producen en la interacción biosfera-atmósfera. El conocimiento de las variaciones estacionales y temporales permite su uso en estudios de evapotranspiración, optimización de la demanda de agua en riego, previsión de cultivos, planificación agrícola, cambio climático, desarrollo de sistemas de tecnología energética (térmica y fotovoltaica), conservación de alimentos, edificios y ambiente (Pacheco de Souza, Carvalho da Silva, Aki Tanaka, Morgan Uliana, Terra de Almeida, & Evaldo Klar, 2017).

La radiación solar global se considera como el parámetro más esencial en aplicaciones de meteorología, energía renovable y conversión de energía solar, especialmente para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos independientes (Premalatha Neelamegam, 2016), (Danny H.W. Li, 2015).

La cantidad de energía que llega del sol al suelo es enorme; un área de únicamente 50 kilómetros cuadrados podría recibir durante el año la suficiente energía solar para satisfacer las necesidades de una población de 120 millones de habitantes. Un primer paso indispensable para aprovechar el sol, sería hacer una evaluación correcta de este recurso en el país. No es suficiente saber que sobra energía; se necesita conocer a qué hora llega, en dónde llega y cómo llega. Para evaluar correctamente la cantidad de radiación solar, esta debe estudiarse como un elemento del clima, pues la cantidad que llega a la superficie se ve afectada por elementos como la latitud, altitud, las corrientes marinas que generan nubosidad y los vientos, entre otros (Ciencia UNAM, 2013). Para la evaluación del rendimiento de los sistemas de energía solar son necesarios los datos de radiación solar, que no está disponible en muchos lugares. Los datos de radiación solar por hora se requieren para un dimensionado preciso de los sistemas de energía. La radiación solar total en diferente orientación y pendiente es necesaria para calcular la eficiencia de los sistemas de energía solar instalados (Aggarwal, 2012). Por lo anterior, su importancia es enorme y justifica perfectamente los esfuerzos para su investigación.

El desarrollo de un programa de investigación en energía solar, debe empezar siempre con un estudio de los datos de radiación solar sobre el sitio o región de interés (F. O. Ogunsanwo, 2016).

El conocimiento de la cantidad de radiación solar en un lugar determinado es esencial en el campo de la física de la energía solar (Chineke, 2009) y es importante para arquitectos, ingenieros y científicos para diseño de edificios eficientes en energía; el desarrollo de aplicaciones de energía solar activa y pasiva; y estudios de climatología y contaminación (Medugu D. W., 2013). Los instrumentos más usados en las estaciones meteorológicas para medir la radiación solar directa y global son los pirheliómetros y los piranómetros, sin embargo son caros si son de grado científico, por lo que hay pocas estaciones en todo el mundo, especialmente en los países en desarrollo por lo que los investigadores buscan extrapolar los valores de un lugar para su aplicación en un lugar diferente (Agbo G. A., 2013). Por lo tanto, la predicción de la radiación solar de los modelos de estimación ha sido ampliamente utilizada a nivel mundial para generar bases de datos de radiación solar para varios lugares del mundo. Existen numerosas técnicas estadísticas para estimar la radiación solar y cada método se basa en diferentes principios (Medugu D. W., 2013). Se tiene por ejemplo la correlación empírica usando las horas de sol propuesta por Angstrom y modificada por Prescott y Page y modelos como los de Rietveld y otros (Agbo G. A., 2013).

En México, actualmente el Instituto de Geofísica de la UNAM lidera varios proyectos, entre ellos uno llamado “Calibración y validación de información de radiación solar del Servicio Meteorológico Nacional”, otro llamado “Investigación, Calibración de una red nacional de sensores de radiación solar y de su base de datos (recobro, validación y publicación de 133 estaciones), otro llamado "Inventario Nacional del Recurso Solar", en el que intervienen el Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar, SENER-CONACYT y otros (Santillán, 2012).

## Materiales y Métodos

En el año 2014, la Universidad Tecnológica de Bahía de Banderas (UTBB) adquirió con recursos del Programa de Apoyo a la Educación Superior (PADES) 3 piranómetros Marca Kipp&Zonnen, modelo CMP3, calibrados y certificados con números: 010321140846, 010321140856 y 010321140851 (ver imagen 1); a los que se les llamará piranómetro 1, piranómetro 2 y piranómetro 3, respectivamente. Ellos se recibieron a principios del año 2015 y se instalaron en la azotea del edificio “Laboratorio de Ingenierías” de la propia universidad. Los primeros dos de ellos se instalaron para medir radiación global horizontal. La intención fue verificar si tenían las mismas lecturas. El tercero se instaló con una inclinación de 20° hacia el sur, con el fin de medir radiación global inclinada.



**Figura 1** Imágenes de los certificados de los piranómetros CMP3, instalados en la UTBB

En la figura 2, se puede observar cómo están instalados en una parte de la azotea del edificio denominado “Laboratorio de Ingenierías”.



**Figura 2** Los 3 piranómetros instalados en el edificio “Laboratorio de Ingenierías” de la UTBB

Estos piranómetros empezaron a tomar y grabar lecturas desde el 29 de mayo del año 2015, pero para fines de éste artículo se consideran las lecturas desde el primero de junio del año 2015 al 31 de mayo del año 2017, completando de manera ininterrumpida dos años de mediciones.

Cada uno de estos 3 piranómetros mide de manera continua la radiación solar y la convierte en una diferencia de potencial (en  $\mu\text{V}$ ), que se puede medir como voltaje diferencial a través de dos cables que salen de cada piranómetro y que están conectados a un datalogger modelo CR-1000 (ver imagen 3), en el cual se creó un programa que permite que cada 5 segundos se registre el valor de los  $\mu\text{V}$  para cada piranómetro y cuando se completan 120 lecturas (10 minutos) se promedian y ese dato se registra y se manda a la base de datos de la computadora como irradiancia ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).



**Figura 3** Caja para intemperie, batería, Datalogger CR1000 y convertidor para cable Ethernet

Cada 6 lecturas hacen una hora, se promedian y se multiplican por 1 hora para obtener la irradiación de esa hora ( $\text{W}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ) y así a lo largo de cada día, para obtener la insolación diaria. De esa manera se obtuvieron los datos de insolación para cada día de los dos años mencionados. También se obtuvo el valor medio mensual de irradiación diaria global incidente para cada mes de los dos años de mediciones.

Toda la información anterior se obtuvo para el sitio donde se instalaron los piranómetros (Latitud 20.708701 y Longitud -105.285616). Lo anterior, es con el fin de construir una base de datos confiables a lo largo de los años, ya que el uso de los datos recogidos en el pasado puede ser útil para capturar la variabilidad diaria y estacional, mientras que la medición del pasado reciente puede explotarse para proporcionar una predicción a corto plazo (Massimo Lazzaronia, 2015).

En este trabajo se quiso hacer una comparación entre los datos medidos con estos piranómetros y los reportados por la NASA, ya que ellos dicen que sus datos basados en satélites y modelos han demostrado ser lo suficientemente precisos como para proporcionar datos fiables de recursos solares y meteorológicos sobre regiones donde las mediciones de superficie son escasas o inexistentes (Paul W. Stackhouse, 2017) lo que aplica perfectamente para esta región del país, dado que en la zona de estudio (Bahía de Banderas) no se cuenta con otras estaciones que tengan piranómetros calibrados.

Para ello, se entró al sitio “*Surface meteorology and Solar Energy – NASA* con la dirección: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> en la sección *Meteorology and Solar Energy*, en *Data tables for a particular location*.

Para comparar los datos medidos contra los del satélite, se elaboran una serie de tablas y gráficas y se hace un análisis estadístico de los mismos.

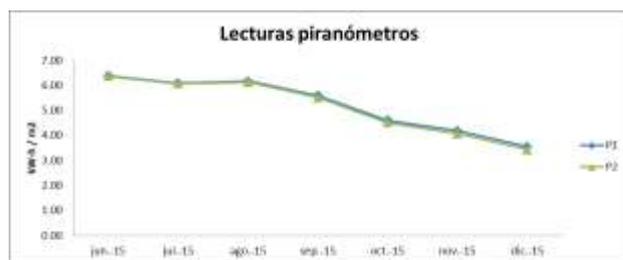
## Resultados y Discusión

En la tabla 1, se muestra el comportamiento de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente para los meses de junio a diciembre del año 2015, tomada por los piranómetros 1 y 2 con el fin de verificar si tenían las mismas lecturas:

	Lecturas piranómetros (kW-h / m <sup>2</sup> )	
	P1	P2
jun-15	6.38	6.37
jul-15	6.10	6.08
ago-15	6.18	6.13
sep-15	5.60	5.53
oct-15	4.61	4.52
nov-15	4.19	4.07
dic-15	3.55	3.45

**Tabla 1** Lecturas de la radiación global horizontal mensual diaria (kW-h / m<sup>2</sup>), medidas con los piranómetros 1 y 2

La gráfica 1 muestra los valores medios mensuales de irradiación diaria global incidente horizontal (kW-h / m<sup>2</sup>) tanto para el piranómetro 1 como para el piranómetro dos.



**Gráfico 1** Comportamiento de las lecturas de radiación global horizontal mensual promedio diaria entre los piranómetros 1 y 2, (kW-h / m<sup>2</sup>) entre junio y diciembre del año 2015

Como puede verse, inician prácticamente iguales y se van separando a lo largo del tiempo.

En la tabla 2, se puede observar la variación, en porcentaje, de las lecturas entre el piranómetro 1 y el piranómetro 2, respecto al piranómetro 2.

	Diferencia entre Lecturas piranómetros respecto a P2	
	Diferencia	(%)
jun-15	0.01	0.21
jul-15	0.02	0.32
ago-15	0.05	0.82
sep-15	0.07	1.29
oct-15	0.09	1.99
nov-15	0.12	2.83
dic-15	0.10	3.00

**Tabla 2** Porcentaje de variación de las lecturas entre los piranómetros 1 y 2, respecto al 2

Como se puede ver, se observa que poco a poco las lecturas se van separando, por lo que deberán ser recalibrados. Ya no se comparan en lo sucesivo, dado que el piranómetro 1 se utilizó para otras aplicaciones.

Este artículo se basa en las lecturas del piranómetro 2 para las mediciones de la radiación global horizontal y el piranómetro 3 para las mediciones de la radiación global inclinada 20° hacia el sur (azimut 0°).

En la tabla 3 siguiente, se muestran los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente y con una inclinación de 20° hacia el sur; obtenidas para los dos años completos de mediciones; esto es desde el 01 de junio del año 2015 al 31 de mayo del año 2017. Se incluyen en esta tabla los valores de insolación promedio mensual presentados por el sitio de la NASA (Atmospheric Science Data Center, 2017), tanto horizontal como inclinada 20° hacia el sur; el cual presenta sus resultados para un periodo de 22 años y ya mencionado con anterioridad en este artículo:

	Insolación	Insolación	Insolación	Insolación
	Global	Global	Global	Global
	Horizontal	Inclinada	Horizontal	Inclinada
	$G_h$ (kW-h/m <sup>2</sup> )	$G_{20}$ (kW-h/m <sup>2</sup> )	NASA $G_{hN}$	NASA $G_{20N}$
jun-15	6.37	5.61	7.06	7.10
jul-15	6.08	5.50	6.37	6.33
ago-15	6.13	5.89	5.88	5.69
sep-15	5.53	5.84	5.27	5.41
oct-15	4.52	5.27	5.41	6.05
nov-15	4.07	5.30	4.98	6.09
dic-15	3.45	4.55	4.22	5.23
ene-16	4.44	6.06	4.57	5.62
feb-16	5.10	6.36	5.64	6.56
mar-16	5.73	6.32	6.76	7.26
abr-16	6.27	6.20	7.29	7.21
may-16	7.06	6.43	7.67	7.05
jun-16	6.54	5.83	7.06	7.10
jul-16	6.03	5.47	6.37	6.33
ago-16	5.89	5.66	5.88	5.69
sep-16	5.61	5.89	5.27	5.41
oct-16	5.20	6.19	5.41	6.05
nov-16	4.18	5.52	4.98	6.09
dic-16	3.90	5.46	4.22	5.23
ene-17	4.26	5.83	4.57	5.62
feb-17	5.28	6.68	5.64	6.56
mar-17	5.99	6.67	6.76	7.26
abr-17	6.86	6.86	7.29	7.21
may-17	6.71	6.28	7.67	7.05

**Tabla 3** Valores medios mensuales de irradiación diaria global (horizontal, e inclinada 20° al sur) incidente, medidas vs los valores correspondientes NASA

Se hace en primer lugar una revisión del comportamiento de la radiación global horizontal y posteriormente, el de la radiación global inclinada.

De la tabla 3 anterior, se obtuvo la media aritmética (Murray R. Spiegel, 2009):

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} \quad (1)$$

Lo anterior, tanto para los dos años de mediciones, como para los valores reportados por la NASA, resultando en 5.47 kW-h / m<sup>2</sup> para la radiación global horizontal medida contra 5.93 kW-h / m<sup>2</sup> para la NASA.

Asimismo, se obtuvo el rango de insolación global horizontal (Murray R. Spiegel, 2009):

$$R = V_M - V_m \quad (2)$$

Dónde  $V_M$  es el valor mayor del conjunto de datos y  $V_m$  es el valor menor de dicho conjunto.

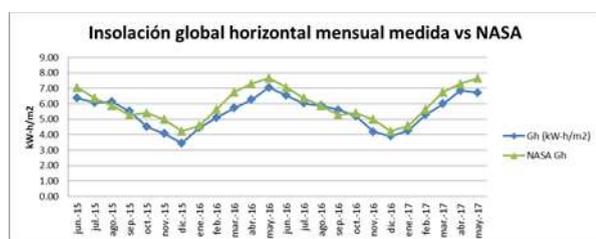
El rango de insolación global horizontal medida es de 3.61 kW-h / m<sup>2</sup> con la mínima de 3.45 kW-h / m<sup>2</sup> en diciembre del año 2015 y la máxima de 7.06 kW-h / m<sup>2</sup> en mayo del año 2016. El rango para los valores proporcionados por la NASA para el sitio de medición es de 3.45 kW-h / m<sup>2</sup> con la mínima radiación para el mes de diciembre con un valor de 4.22 kW-h / m<sup>2</sup> y la máxima de 7.67 kW-h / m<sup>2</sup> para mayo.

La desviación estándar de las insolaciones mensuales se calculó con la siguiente ecuación (Murray R. Spiegel, 2009):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N}} \quad (3)$$

Por tanto la desviación estándar de las insolaciones promedio diarias mensuales da 1.002 kW-h / m<sup>2</sup>, mientras que la desviación estándar para los datos de la NASA fue de 1.083 kW-h / m<sup>2</sup>.

De la tabla 3 se desprende la gráfica 2, en la cual se puede ver el comportamiento de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente (kW-h / m<sup>2</sup>) medida a lo largo de los dos años (desde el 1 de junio del 2015 al 31 de mayo del 2016) vs los valores mostrados por la NASA (radiación global horizontal promedio de los últimos 22 años) para el sitio con latitud 20.709 grados y longitud -105.286 grados. Los valores de la NASA se repiten.



**Gráfico 2** Comportamiento de la radiación global horizontal medida ( $\text{kW-h/m}^2$ ) vs la radiación global horizontal mensual de la NASA para el sitio de medición

Se observa en la gráfica 2 que el comportamiento de la radiación global horizontal medida es muy similar al proporcionado por la NASA para el sitio seleccionado.

En la gráfica 3 se muestran los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidentes medidos para el período de junio del año 2015 a mayo del año 2016; comparados contra los datos de la NASA:



**Gráfico 3** Comparación entre los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos vs NASA. Junio 2015 a mayo 2016

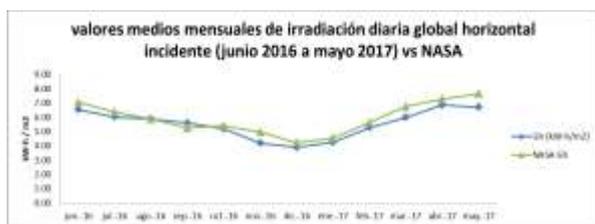
En la gráfica 3 se observa que los valores medidos de este período son menores que los reportados por la NASA, excepto para los meses de agosto y septiembre del año 2015. La tabla 4 muestra esas diferencias ( $\text{kW-h/m}^2$ ) y su valor en porcentaje respecto a los valores NASA:

	Diferencia (NASA-Gh)	% de la diferencia respecto a NASA
jun-15	0.69	9.77
jul-15	0.29	4.60
ago-15	-0.25	-4.20
sep-15	-0.26	-4.84
oct-15	0.89	16.53
nov-15	0.91	18.21
dic-15	0.77	18.31
ene-16	0.13	2.85
feb-16	0.54	9.53
mar-16	1.03	15.24
abr-16	1.02	14.03
may-16	0.61	7.94

La tabla 5 muestra las diferencias de los valores NASA menos los medidos ( $\text{kW-h/m}^2$ ) y el porcentaje correspondiente de la diferencia, respecto a los valores NASA para el periodo junio 2016 a mayo 2017:

	Diferencia (NASA-Gh)	% de la diferencia respecto a NASA
jun-16	0.52	7.33
jul-16	0.34	5.30
ago-16	-0.01	-0.17
sep-16	-0.34	-6.40
oct-16	0.21	3.84
nov-16	0.80	16.02
dic-16	0.32	7.60
ene-17	0.31	6.87
feb-17	0.36	6.31
mar-17	0.77	11.32
abr-17	0.43	5.96
may-17	0.96	12.45

En la tabla 5 y gráfica 4 se observa que los valores medidos de este período también son menores que los reportados por la NASA, excepto para los meses de agosto y septiembre del año 2016.



**Gráfico 4** Comparación entre los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos vs NASA. Junio 2016 a mayo 2017

Se observa, que en el período de junio 2016 a mayo 2017 el comportamiento de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente se aproximan más a los valores NASA que el periodo anterior (tabla 6). Esta tabla compara el valor absoluto de las diferencias entre los valores NASA con los medidos y su respectivo promedio, siendo éste menor en el segundo año:

	Diferencia (NASA-Gh) kW-h / m <sup>2</sup>	Valor absoluto de la diferencia kW-h / m <sup>2</sup>
jun-15	0.69	0.69
jul-15	0.29	0.29
ago-15	-0.25	0.25
sep-15	-0.26	0.26
oct-15	0.89	0.89
nov-15	0.91	0.91
dic-15	0.77	0.77
ene-16	0.13	0.13
feb-16	0.54	0.54
mar-16	1.03	1.03
abr-16	1.02	1.02
may-16	0.61	0.61
Total diferencia en promedio		0.62
jun-16	0.52	0.52
jul-16	0.34	0.34
ago-16	-0.01	0.01
sep-16	-0.34	0.34
oct-16	0.21	0.21
nov-16	0.80	0.80
dic-16	0.32	0.32
ene-17	0.31	0.31
feb-17	0.36	0.36
mar-17	0.77	0.77
abr-17	0.43	0.43
may-17	0.96	0.96
Total diferencia en promedio		0.45

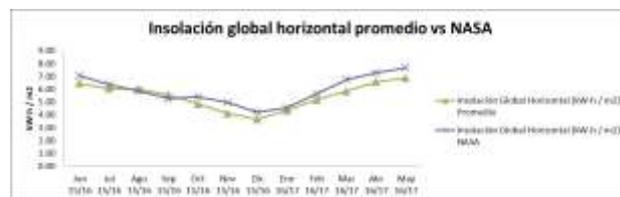
**Tabla 6** Valor absoluto de las diferencias entre los valores NASA y medidos y sus promedios

En la tabla 7 se compara el promedio de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos vs NASA:

Insolación Global Horizontal (kW-h / m <sup>2</sup> )		
Mes-Año	Promedio	NASA
Jun 15/16	6.46	7.06
Jul 15/16	6.05	6.37
Ago 15/16	6.01	5.88
Sep 15/16	5.57	5.27
Oct 15/16	4.86	5.41
Nov 15/16	4.13	4.98
Dic 15/16	3.67	4.22
Ene 16/17	4.35	4.57
Feb 16/17	5.19	5.64
Mar 16/17	5.86	6.76
Abr 16/17	6.56	7.29
May 16/17	6.89	7.67
TOTAL	65.60	71.12
PROMEDIO DIARIO kW/m2	5.47	5.93

**Tabla 7** Promedio de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos vs NASA

En la gráfica 5 se compara el promedio de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos vs NASA:



**Gráfico 5** Promedio de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos vs los correspondientes valores NASA

Como puede verse, la gráfica 5 es intermedia entre la gráfica 3 y la gráfica 4, y se considera más representativa que ambas. Se piensa que entre más sean los años de mediciones, más se aproximará a la de la NASA.

La tabla 8 presenta el promedio de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos vs NASA, su diferencia, el valor absoluto de la diferencia y el promedio de esas diferencias en valor absoluto:

Mes-Año	Promedio	NASA	Diferencia NASA - Gh	Valor absoluto de la diferencia NASA - Gh
Jun 15/16	6.46	7.06	0.60	0.60
Jul 15/16	6.05	6.37	0.32	0.32
Ago 15/16	6.01	5.88	-0.13	0.13
Sep 15/16	5.57	5.27	-0.30	0.30
Oct 15/16	4.86	5.41	0.55	0.55
Nov 15/16	4.13	4.98	0.85	0.85
Dic 15/16	3.67	4.22	0.55	0.55
Ene 16/17	4.35	4.57	0.22	0.22
Feb 16/17	5.19	5.64	0.45	0.45
Mar 16/17	5.86	6.76	0.90	0.90
Abr 16/17	6.56	7.29	0.73	0.73
May 16/17	6.89	7.67	0.78	0.78
TOTAL	65.60	71.12	5.52	6.37
PROMEDIO kW-h / m <sup>2</sup>	5.47	5.93	0.46	0.53

**Tabla 8** Promedio de las diferencias en valor absoluto de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos vs NASA

Finalmente, en la tabla 9 se presenta la diferencia entre los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente proporcionados por la NASA menos los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos de los dos años, en porcentaje, incluyendo el promedio de la diferencia.

Como se puede ver en la tabla 9, los valores NASA para la irradiación global horizontal incidente fueron mayores que los valores medidos en un 7.68% con una desviación estándar de 6.17%.

Mes-Año	Promedio	NASA	Diferencia NASA - Gh	% de la diferencia respecto a NASA
Jun 15/16	6.46	7.06	0.60	8.55
Jul 15/16	6.05	6.37	0.32	4.95
Ago 15/16	6.01	5.88	-0.13	-2.18
Sep 15/16	5.57	5.27	-0.30	-5.62
Oct 15/16	4.86	5.41	0.55	10.19
Nov 15/16	4.13	4.98	0.85	17.11
Dic 15/16	3.67	4.22	0.55	12.95
Ene 16/17	4.35	4.57	0.22	4.86
Feb 16/17	5.19	5.64	0.45	7.92
Mar 16/17	5.86	6.76	0.90	13.28
Abr 16/17	6.56	7.29	0.73	9.99
May 16/17	6.89	7.67	0.78	10.20
TOTAL	65.60	71.12	5.52	92.20
PROMEDIO kW-h / m <sup>2</sup>	5.47	5.93	0.46	7.68

**Tabla 9** Diferencia, en porcentaje, entre los valores NASA y valores medidos de la irradiación horizontal

Además de lo anterior, se utilizó Excel para encontrar las líneas de tendencia de las dos curvas; la de la NASA y la de los datos medidos, encontrándose que ambas curvas son descritas muy bien por ecuaciones polinómicas de grado 6 y que se presentan en este artículo como ecuación 4 y ecuación 5 para las curvas de tendencia de la NASA y de los datos medidos, respectivamente. A continuación se muestra la ecuación 4:

$$y = 4E^{-5}x^6 - 0.0025x^5 + 0.0511x^4 - 0.4561x^3 + 1.9551x^2 - 4.2334x + 9.7871 \quad (4)$$

El coeficiente de determinación o bondad de ajuste de la curva 4 anterior, la cual representa los datos de las insolaciones promedio para los 22 años de mediciones de los satélites de la NASA es de:

$$R^2 = 0.9626$$

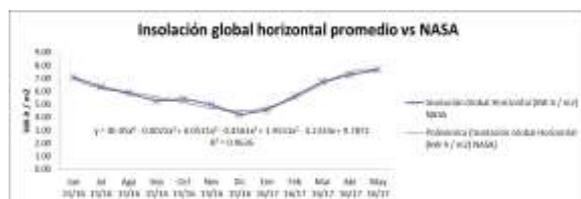
A continuación se muestra la ecuación 5:

$$y = 0.0002x^6 - 0.0101x^5 + 0.1572x^4 - 1.1506x^3 + 4.0297x^2 - 6.53x + 9.966 \quad (5)$$

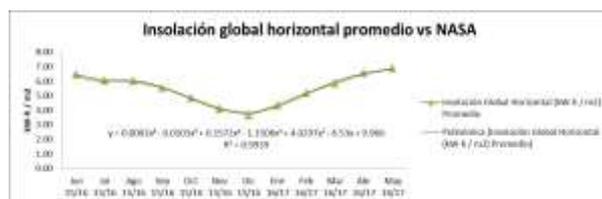
El coeficiente de determinación o bondad de ajuste de la curva 5 anterior para representar los datos de las radiaciones medidas por los piranómetros instalados en la UTBB es de:

$$R^2 = 0.9939$$

Tanto las líneas de tendencia para los datos NASA y los datos medidos se muestran en las gráficas 6 y 7, respectivamente:



**Gráfico 6** Línea de tendencia para los datos de la NASA, correspondiente a una ecuación polinómica de grado 6 (ecuación 4)



**Gráfico 7** Línea de tendencia para los datos de medidos, correspondiente a una ecuación polinómica de grado 6 (ecuación 5)

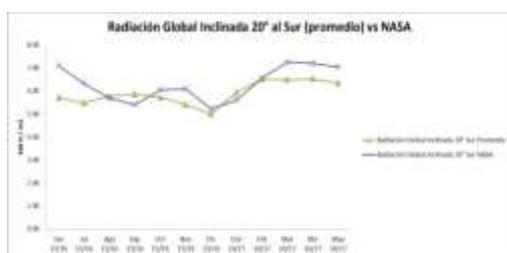
Lo que sigue, es ver los resultados correspondientes entre los valores medios mensuales de irradiación diaria global inclinada (20° al sur) incidente medidos vs los correspondientes valores proporcionados por la NASA para el sitio de medición.

Para lo anterior, se presenta la tabla 10, la cual concentra los valores medios mensuales de los dos años de mediciones vs los correspondientes valores que da la NASA. Estos valores se obtuvieron para cada mes promediando por ejemplo junio 2015 y junio 2016 y ese promedio se compara con junio NASA, y así sucesivamente.

Mes-Año	Promedio	NASA	Porcentaje de diferencia respecto a la NASA
Jun 15/16	5.72	7.10	19.45
Jul 15/16	5.48	6.33	13.39
Ago 15/16	5.78	5.69	-1.56
Sep 15/16	5.86	5.41	-8.37
Oct 15/16	5.73	6.05	5.32
Nov 15/16	5.41	6.09	11.16
Dic 15/16	5.00	5.23	4.30
Ene 16/17	5.95	5.62	-5.81
Feb 16/17	6.52	6.56	0.64
Mar 16/17	6.50	7.26	10.48
Abr 16/17	6.53	7.21	9.37
May 16/17	6.35	7.05	9.89
TOTAL	70.84	75.60	68.25
PROMEDIO kW-h / m <sup>2</sup>	5.90	6.30	5.69

**Tabla 10** Valores medios mensuales de irradiación global inclinada para los dos años de mediciones vs los correspondientes valores que da la NASA (kW-h / m<sup>2</sup>) y porcentaje de diferencia respecto a la NASA

Se puede observar en la tabla 10 que los valores NASA son mayores a los valores medidos excepto en los meses de agosto, septiembre y enero y que hay una mayor variación (desviación estándar de 7.87%) de los valores mensuales comparándolos con los valores de irradiación global horizontal. No obstante el promedio del porcentaje de diferencia respecto a la NASA es menor que el valor obtenido para la irradiación horizontal. Esto se puede ver en la gráfica 8, que se presenta a continuación:



**Gráfica 8** Promedio de los valores medios mensuales de irradiación diaria global (inclinada 20° al sur) incidente medidos vs los correspondientes valores NASA

El rango de variación para los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente proporcionados por la NASA menos los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos de los dos años, en porcentaje fue de 17.11% (noviembre) menos -2.18% (agosto) igual a 19.29%; mientras que los valores medios mensuales de irradiación diaria global inclinada incidente medidos de los dos años, en porcentaje, fue de 19.45% (junio) menos 1.56% (agosto) igual a 21.01%.

Por tanto la irradiación inclinada tiene un mayor rango de variación (21.01%) que la horizontal (19.29%) aunque su variación promedio es menor (5.69% contra 7.68%). Se obtuvo también la desviación estándar para los dos casos, y esta fue de 6.17% para la irradiación horizontal contra 7.87% en la inclinada.

## Conclusiones

Lo primero que se observó es que los piranómetros calibrados al principio de su instalación tenían casi las mismas lecturas (variación de 0.21% en junio del 2015) y en tan solo 7 meses esta fue aumentando hasta el 3% (diciembre del 2015), lo que muestra la necesidad del mantenimiento y la recalibración de los mismos para que sus lecturas sean confiables.

Ellos son muy caros, también su recalibración y mantenimiento; lo que explica la necesidad de buscar modelos a través de otros medios como correlaciones a través de otras variables meteorológicas y en este caso ver los valores que presentan los satélites de la NASA.

Lo segundo es que el comportamiento de los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente medidos sigue el mismo patrón que el correspondiente que proporciona la NASA, no obstante que la primera impresión fue de sorpresa al ver que la altitud que NASA marca para el sitio de medición es de 451 m sobre el nivel del mar, cuando se sabe que en realidad solo son 6 metros sobre el nivel del mar (Latitud 20.708701 y Longitud -105.285616). Sin embargo, el comportamiento de los valores obtenidos fue muy acorde con lo que ellos dicen: que sus datos basados en satélites y modelos han demostrado ser lo suficientemente precisos como para proporcionar datos fiables de recursos solares y meteorológicos sobre regiones donde las mediciones de superficie son escasas o inexistentes (Paul W. Stackhouse, 2017) lo que aplica perfectamente para esta región del país, dado que en la zona de estudio (Bahía de Banderas) no se cuenta con otras estaciones que tengan piranómetros calibrados. En este caso se observó que los valores medios mensuales de irradiación diaria global horizontal incidente que presenta la NASA para el sitio de medición fueron mayores que los valores medidos en un 7.68% con una desviación estándar de 6.17% y un rango de 19.29% mientras que en el caso de los valores medios mensuales de irradiación global inclinada para los dos años de mediciones fueron mayores en un 5.69% con una desviación estándar del 7.87% y un rango de 21.01%. Estos porcentajes con respecto a los valores de la NASA.

Se observa también que agosto y septiembre tienen valores medidos superiores a los de la NASA a diferencia del resto del año; ello posiblemente se explique por el cambio de patrones en la nubosidad de la zona, ya que los últimos años al parecer han sido más soleados que antes. Esto implica hacer un estudio al respecto para verificar dicha afirmación.

### Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Tecnológica de Bahía de Banderas por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo, al PADES por proporcionar los recursos para la adquisición de los piranómetros y al comité organizador del CIERMI 2017 por sus lineamientos y guía.

### Referencias

*Ciencia UNAM*. (29 de 07 de 2013). Recuperado el 12 de 07 de 2017, de ¿Cuánto sol recibe México?: [http://ciencia.unam.mx/leer/237/Cuanto\\_Sol\\_recibe\\_Mexico](http://ciencia.unam.mx/leer/237/Cuanto_Sol_recibe_Mexico)

Agbo G. A., A. B. (2013). Application of regression and multiple correlation analysis to morning hours solar radiation in Lapai. *International Journal of Physical Sciences*, 5.

Aggarwal, R. K. (2012). Precise estimation of total solar radiation on tilted surface. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 6.

Albizzati, E. (2015). Evaluación de la sustentabilidad de instalaciones solares con colectores de placa plana y tubos evacuados. *Rev. Int. Contam. Ambie*, 8.

Aron Habte, M. S. (2017). *Evaluation of the National Solar Radiation Database (NSRDB): 1998–2015*. (N. R. Laboratory, Ed.) USA: U.S. Department of Energy.

Atmospheric Science Data Center. (25 de Julio de 2017). *Surface meteorology and Solar Energy - NASA*. Recuperado el 25 de Julio de 2017, de Meteorology and solar energy: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>

Chineke, I. U. (2009). Evaluating the global solar energy potential at Uturu., *International Journal of Physical Sciences*, 115-119.

Danny H.W. Li, S. L. (2015). An Analysis of Global, Direct and Diffuse Solar Radiation. *Energy Procedia*, 6.

F. O. Ogunsanwo, J. O. (2016). Empirical model for estimation of global radiation. *International Journal of Physical*, 8.

Jeffrey Ball, D. R. (2017). *China's Evolving Solar Industry And Its Implications for Competitive Solar Power In the United States and the World*. Stanford Steyer Taylor center for energy policy and finance.

Kalogirou, S. (2009). *Solar energy engineering : processes and systems*. USA: Elsevier.

Massimo Lazzaronia, S. F. (2015). Models for Solar Radiation Prediction based on Different Measurements Sites. *Journal of the International Measurement Confederation (IMEKO)*, 33.

Medugu D. W., A. A. (2013). Solar radiation: Correlation between measured and predicted values in Mubi, Nigeria. *International Journal of Science and Technology Education Research*, 7.

Murray R. Spiegel, L. J. (2009). Estadística. En L. J. Murray R. Spiegel, *Estadística* (pág. 571). México, D.F.: Mc Graw Hill.

Pacheco de Souza, A., Carvalho da Silva, A., Aki Tanaka, A., Morgan Uliana, E., Terra de Almeida, F., & Evaldo Klar, A. a. (2017). Global radiation by simplified models for the state of Mato Grosso, Brazil. *Pesq. agropec. bras*, 13.

Paul W. Stackhouse, J. W. (02 de junio de 2017). *Surface meteorology and Solar Energy A renewable energy resource web site (release 6.0)*. Recuperado el 14 de 07 de 2017, de Atmospheric Science Data Center: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov+s07#s07>  
Premalatha Neelamegam, V. A. (2016).

Prediction of solar radiation for solar systems by using ANN models with different back propagation algorithms. *Journal of Applied Research*, 9.

Rosemann, R. (2011). *A Guide to Solar Radiation Measurement* (segunda ed.). Netherlands: Gengenbach Messtechnik.

Santillán, M. L. (02 de 02 de 2012). *CIENCIA UNAM*. Recuperado el 10 de 07 de 2017, de El Instituto de Geofísica calibrará 133 sensores de radiación solar: [http://ciencia.unam.mx/leer/66/El\\_Instituto\\_de\\_Geofisica\\_calibrara\\_133\\_sensores\\_de\\_radiacion\\_solar](http://ciencia.unam.mx/leer/66/El_Instituto_de_Geofisica_calibrara_133_sensores_de_radiacion_solar)

Vega de Kuyper, J. C., & Morales, S. R. (2015). *Fuentes de energía, renovables y no renovables. Aplicaciones*. México, D.F.: Alfaomega.