

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

VALIDACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EN SUPERFICIE PARA LA REGIÓN ORINOQUÍA A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE

WILMAR DARÍO POVEDA MATALLANA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá, Colombia
Año 2020

VALIDACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EN SUPERFICIE PARA LA REGIÓN ORINOQUÍA A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE

WILMAR DARÍO POVEDA MATALLANA

Tesis o trabajo de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias Meteorología

Director (a):

Ph.D. Daniel Hernández Deckers

Codirector (a):

Ph.D. Joaquín Pelkowski Goebel

Grupo de Investigación en Ciencias Atmosféricas

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá, Colombia
Año 2020

A mis Padres, Darío y Nancy, a mi esposa Yury y a mi hija hermosa Laura Isabela.

Gracias por estar siempre a mi lado apoyándome en este sueño que se convierte en realidad.....

Agradecimientos

Quiero expresar un profundo agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la elaboración del presente trabajo. En especial a mis padres, Rubén Darío Poveda Alfonso & Nancy Matallana Núñez por el incondicional apoyo y constante sacrificio. De igual forma a mi esposa Yury Katherine Rodríguez López por el permanente apoyo y compañía en aquellos momentos difíciles. A mi hija Laura Isabela Poveda por su alegría y cariño permanente.

También quiero agradecer de manera muy especial a los profesores Daniel Hernández Deckers y a Joaquín Pelkowski Goebel por la orientación continua, observaciones y comentarios en la elaboración de este trabajo. Finalmente quisiera hacer extensiva mi gratitud a todos los compañeros del programa de Maestría en Ciencias Meteorología de la Universidad Nacional de Colombia, en particular a Pingyun Zheng, Edwin Torres Moya y Diego Quintero por sus aportes académicos y su valiosa amistad. A todos muchas gracias.

Resumen

Teniendo en cuenta la baja densidad de estaciones radiométricas en el territorio nacional, y en particular en la región de la Orinoquía, se presenta aquí una metodología para estimar la radiación solar en superficie en una estación radiométrica llamada La Libertad a partir de imágenes satelitales del canal visible. Esto constituye el primer paso para mejorar la resolución temporal y espacial de la información de radiación solar en superficie en lugares con pocas estaciones radiométricas. La base de esta metodología es el modelo empírico de Ångström-Prescott y la estimación del índice de nubosidad a partir de imágenes satelitales. Este índice de nubosidad permite estimar el brillo solar, que al compararlo con el registrado en la estación, presenta un R^2 igual a 0,69 para el ajuste de los valores diarios durante 1 año comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017. Este resultado indica que sería posible encontrar valores aproximados de brillo solar sin necesidad de tener estaciones en tierra. Adicionalmente, este buen ajuste junto con el modelo de Ångström-Prescott para la estación, permite estimar la radiación solar en superficie a partir de las imágenes de satélite. Al comparar los valores registrados por la estación con los calculados a partir de las imágenes, se encuentra un error de 2,4% en el promedio semestral, errores menores al 13% en los promedios mensuales, y un R^2 igual a 0,7 para el ajuste de los valores diarios a lo largo de todo un semestre. Esto demuestra que es posible obtener información radiométrica aproximada a partir de imágenes satelitales que complementen la información de las estaciones en superficie.

Palabras clave: radiación solar en superficie, radiancia, estimación de la radiación solar, nivel digital de una imagen de satélite, índice de nubosidad, brillo solar, índice de claridad, modelo empírico Ångström-Prescott.

Abstract

Here we present a methodology to estimate surface solar radiation from visible satellite images at the radiometric station called La Libertad located in Orinoquía, Colombia, a region with low density of radiometric stations. This is the first step to improve the temporal and spatial resolution of surface solar radiation information in places with few radiometric stations. The basis of this methodology is the Ångström-Prescott empirical model and the estimation of the cloudiness index from satellite images. Sunshine duration can be estimated from this cloud index, which when compared to the daily measured sunshine at the station between June 2016 and May 2017 has an R^2 of 0,69. This result indicates that it would be possible to find approximate values of sunshine without having stations on the ground. Additionally, this good adjustment together with the Ångström-Prescott model for the station, allows us to estimate surface solar radiation from satellite images. When comparing the values recorded by the station with those calculated from the images, we find a 2,4% error in the six-month average, up to 13% error in the monthly averages, and an R^2 of 0,7 for the daily values of one semester. This shows that it is possible to obtain approximate radiometric information from satellite images that complement the information of the surface stations.

Keywords: surface radiation, radiance, solar radiation estimation, digital level of a satellite image, cloud index, solar brightness, clarity index, Ångström-Prescott empirical model.

Tabla de Contenido

Lista de figuras y tablas	8
Introducción	10
1. Marco teórico	12
1.1 Leyes de radiación y espectro electromagnético	12
1.2 Radiación solar.....	14
1.3 Atenuación de la radiación solar.....	15
1.4 Incidencia de la radiación sobre la superficie terrestre	16
2. Antecedentes	22
3. Justificación y planteamiento del problema	26
4. Objetivos	28
5. Métodos para el cálculo de la radiación solar en superficie a partir de estaciones radiométricas	29
6. Métodos para el cálculo de la radiación en superficie a partir de imágenes de satélite	31
6.1 Modelos estadísticos	32
6.2 Modelo físico	33
7. Metodología.....	35
7.1 Área de estudio	35
7.2 Datos a utilizar.....	37
7.2.1 Información de estaciones.....	37
7.2.2 Información satelital	38
7.3 Método a utilizar	39
7.3.1 Información estaciones radiométricas.....	39
7.3.2 Información imágenes de satélite.....	40
7.4 Validación de la estimación de la radiación solar en superficie	42
8 Resultados y análisis	43
9. Conclusiones y recomendaciones	60
ANEXO A MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA EL CÁLCULO DE LA RADIACIÓN EN SUPERFICIE.....	62
ANEXO B CÁLCULO DE LA RADIACIÓN GLOBAL A PARTIR DEL MÉTODO HELIOSAT	64
ANEXO C MÉTODO DE LA MEDIA MÓVIL PARA EL CÁLCULO DE LA INFORMACIÓN FALTANTE.....	67

ANEXO D SOLICITUD DE IMÁGENES DE SATÉLITE A LA NOAA	68
ANEXO E RELACIONES ASTRONÓMICAS SOL-TIERRA	71
ANEXO F CÁLCULO DE LA POSICIÓN DEL SOL A PARTIR DE LA GEOMETRÍA ESFÉRICA Y DEL TEOREMA DEL COSENO	73
ANEXO G CÁLCULO DE LA RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE DIARIA EN EL TOPE DE LA ATMÓSFERA	75
ANEXO H CÓDIGO UTILIZADO PARA EL CÁLCULO DE LA REFLECTANCIA ..	76
ANEXO I VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE REFLECTANCIA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE NUBOSIDAD	78
Bibliografía	80

Lista de figuras y tablas

<i>Figura 1: Espectro electromagnético 1(a). Espectro de la radiación solar 1(b)</i>	14
<i>Figura 2: Componente directa de la radiación. Fuente (IDEAM)</i>	17
<i>Figura 3: Actinógrafo</i>	18
<i>Figura 4: Pirheliómetro de cavidad absoluta, serie PMO-6</i>	19
<i>Figura 5: Piranómetro CMP-11</i>	20
<i>Figura 6: Heliógrafo Campbell Stokes</i>	20
<i>Figura 7: Climatología de la precipitación total mensual en la estación La Libertad (Periodo 1979-2017)</i>	36
<i>Figura 8: Climatología del brillo solar mensual en la estación La Libertad (Periodo 1979-2017)</i>	36
<i>Figura 9: Estaciones radiométricas utilizadas para este trabajo en la región de la Orinoquía</i>	38
<i>Figura 10: Coeficientes a y b de Ångström-Prescott calculados de forma mensual, semestral y anual para el periodo de estudio comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017 10(a). Correlación entre la radiación y el brillo solar de la estación La Libertad para el periodo de estudio comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017 10(b)</i> ... 43	
<i>Figura 11: Regresiones mensuales entre H/H_{ext} y n/N para el periodo comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017 que permiten apreciar los coeficientes mensuales a y b de Ångström-Prescott para la estación La Libertad</i>	44
<i>Figura 12: Regresión entre el brillo solar registrado por la estación La Libertad y el calculado a partir de las imágenes de satélite para el periodo comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017</i>	46
<i>Figura 13: Brillo solar diario calculado a partir de las imágenes de satélite y por la estación La libertad para el periodo comprendido entre junio de 2016 a mayo de 2017</i>	47
<i>Figura 14: Regresión entre el brillo solar diario calculado por la estación La Libertad y el calculado por el satélite para el periodo comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017</i>	48
<i>Figura 15: Selección de semestres para calibrar y validar el modelo a partir de la información de brillo solar para la estación La Libertad</i>	49

<i>Figura 16: Selección de semestres para calibrar y validar el modelo a partir de los coeficientes de Ångström-Prescott.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 17: Regresión entre el brillo solar diario registrado por la estación La Libertad y el calculado por las imágenes de satélite para el semestre 1(semestre de calibración).</i>	<i>50</i>
<i>Figura 18: Regresión lineal entre la radiación solar diaria en superficie registrada por la estación, y la calculada a partir de las imágenes de satélite para el semestre 2 (semestre de validación).</i>	<i>51</i>
<i>Figura 19: Regresión entre la radiación solar en superficie diaria mensual registrada por la estación y la calculada por las imágenes de satélite para el semestre 2 (semestre de validación).</i>	<i>52</i>
<i>Figura 20: Radiación solar en superficie diaria mensual calculado a partir de las imágenes de satélite y la registrada por la estación La Libertad para semestre 2, (semestre de validación).</i>	<i>53</i>
<i>Figura 21: Promedios de la radiación solar en superficie mensual y semestral registrada por la estación La Libertad y la calculada por las imágenes de satélite para el semestre 2 (semestre de validación).</i>	<i>54</i>
<i>Figura 22: Grafica de selección de semestres para calibrar y validar el modelo a partir de la precipitación total semestral.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 23: Regresión entre los valores de brillo solar diarios registrados por la estación La Libertad y los calculados a partir de las imágenes de satélite para el semestre 1a (semestre de calibración).</i>	<i>55</i>
<i>Figura 24: Coeficientes de Ångström-Prescott para el semestre 1a (semestre de calibración).</i>	<i>56</i>
<i>Figura 25: Regresión lineal entre la radiación solar en superficie diaria registrada por la estación La Libertad, y la calculada a partir de las imágenes de satélite para el Semestre 2a (semestre de validación).</i>	<i>56</i>
<i>Figura 26: Regresión mensual diaria entre la radiación solar en superficie calculada por la estación La Libertad y por las imágenes de satélite para el semestre 2a (semestre de validación).</i>	<i>57</i>
<i>Figura 27: Radiación solar en superficie diaria mensual calculado a partir de las imágenes de satélite y la registrada por la estación La Libertad para semestre 2a (semestre de validación).</i>	<i>58</i>
<i>Figura 28: Promedios de la radiación solar en superficie mensual y semestral registrada por la estación La Libertad y la calculada por las imágenes de satélite para el semestre 2a (semestre de validación).</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 1: Estaciones del Ideam (Fuente: Ideam).....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 2: Resumen de las expresiones encontradas para validar la radiación solar en superficie obtenida a partir de las imágenes de satélite. Con los respectivos R-cuadrado y errores promedio semestrales a partir de las selecciones de semestres propuestas.</i>	<i>59</i>

Introducción

El Sol es la estrella más próxima a la Tierra y se considera como la principal fuente de energía, siendo el motor que genera los fenómenos meteorológicos, climáticos y biológicos de nuestro planeta. Esta energía se propaga en forma de radiación electromagnética con diferentes longitudes de onda.

La radiación que llega al tope de la atmósfera se puede considerar como constante para fines meteorológicos, a pesar de los ligeros cambios en la posición de la Tierra con respecto al Sol y los ciclos de la actividad solar. Al atravesar la atmósfera, la radiación solar se atenúa dependiendo de los componentes atmosféricos y la presencia de gases y nubes (Polo, 2010).

Conocer de manera cuantitativa la radiación que llega a la superficie es de gran utilidad en una amplia variedad de aplicaciones que van desde la agricultura hasta la producción de energía eléctrica. Sin embargo, la alta variabilidad en las mediciones de la radiación y la baja densidad de estaciones radiométricas dificulta su óptimo aprovechamiento.

Para cuantificar esta radiación en superficie se utilizan instrumentos de medición terrestres y satelitales. La mayoría de instrumentos en tierra que registran información radiométrica lo hacen a partir de mediciones de brillo solar y radiación en superficie. La desventaja que presentan estas medidas directas son el poco número de estaciones y la falta de registros continuos (Badescu, 2008). Esta información permite hacer correlaciones a partir de diferentes modelos empíricos para determinar la radiación solar en superficie a partir del brillo solar. El modelo más utilizado a nivel mundial es el de Ångström Prescott (Ideam & Upme, 2018).

Por otro lado, las imágenes satelitales permiten cubrir regiones más extensas, lo cual mejora la cobertura espacial y temporal en lugares donde no se tienen estaciones. Esta medida indirecta de la radiación solar se estima a partir de dos modelos: los modelos físicos y los modelos estadísticos. Ambos se basan en un balance energético entre la radiación que llega al tope de la atmósfera y la que se refleja en el satélite (Suárez, 2013). Los modelos físicos tienen en cuenta parámetros como por ejemplo la absorción, esparcimiento, el albedo de las nubes y el albedo superficial (Suárez, 2013). La dificultad está en conocer estos parámetros atmosféricos locales (Zarzalejo et al. 2006). Para el caso de los modelos estadísticos, éstos se basan fundamentalmente en regresiones entre las medidas radiométricas en superficie y la información que registra el satélite.

Actualmente el agotamiento de las fuentes convencionales de energía por su uso indiscriminado ha generado un deterioro ambiental y la contaminación que éstas producen ha generado la necesidad de buscar fuentes de energía sostenibles y limpias (Ovalle & García, 2017). Por esta razón este trabajo pretende aportar elementos para mejorar la resolución temporal y espacial del recurso solar en superficie. La metodología se basa en un modelo estadístico, que permite calcular el índice de nubosidad y el brillo solar diario en la estación La Libertad ubicada en la región de la Orinoquía, haciendo

uso de la información del canal visible de las imágenes del satélite GOES 13. Luego se sustituye el brillo solar calculado por el satélite en una expresión similar a la de Ångström Prescott para estimar la radiación solar en superficie. Los resultados que se obtienen se validan con las mediciones de la estación.

Este trabajo inicia presentando los diferentes conceptos teóricos y las características generales de la radiación solar. Después se presenta el estado actual del tema, dando una descripción general de los principales trabajos desarrollados a nivel mundial y en Colombia. Estos trabajos emplean métodos estadísticos para el cálculo del índice de nubosidad y del brillo solar utilizando imágenes de satélite para la estimación de la radiación solar en superficie. Posterior a esto se plantea la importancia de desarrollar este trabajo, la pregunta de investigación y los objetivos. Luego se presentan los diferentes métodos para el cálculo de la radiación solar en superficie a partir de las estaciones radiométricas y de las imágenes de satélite. Después se presenta la metodología que se utilizó para el desarrollo de este trabajo, seguida de los resultados de la validación de la radiación solar en superficie en la estación La Libertad utilizando las imágenes satelitales. Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo, y se realizan algunas recomendaciones y sugerencias para futuros trabajos e investigaciones que se realicen sobre este tema.

1. Marco teórico

Para comprender mejor las temáticas a desarrollarse en este trabajo, se realiza una breve descripción de las diferentes unidades utilizadas en radiación electromagnética, particularmente en radiación solar.

En el sistema internacional de unidades (SI), la energía que transporta una onda electromagnética por unidad de tiempo P se mide en Joules por segundo (Js^{-1}) es decir, vatios (W):

$$P = \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

Si esta magnitud dada en unidades de potencia se calcula por unidad de área, se le denomina irradiancia o también densidad de flujo radiante, y tendría unidades de Wm^{-2} :

$$H = \frac{dQ}{dt dA} \quad (2)$$

Integrando la expresión de irradiancia (expresión 2) con respecto al tiempo, se obtiene la exposición radiante. Por ejemplo, para los registros radiométricos de las estaciones, se acostumbra integrar esta irradiancia a lo largo de una hora, lo que resulta en una cantidad de energía por unidad de área con unidades de Whm^{-2} . El mayor interés en estudios climatológicos es conocer esta cantidad de energía incidente por unidad de área a nivel diario. Esto implica integrar esta cantidad a lo largo del día solar, y expresarla como energía por unidad de área en un día ($\text{Whm}^{-2}\text{día}^{-1}$), lo cual se denomina irradiación diaria. Así mismo, estas unidades se pueden convertir a $\text{Jm}^{-2}\text{día}^{-1}$, teniendo en cuenta que 1 Wh es igual a 3600J . Las unidades en las cuales se presentan los resultados de este trabajo son $\text{Whm}^{-2}\text{día}^{-1}$, debido a que son las más utilizadas en este campo. Esta unidad denominada irradiación diaria en ocasiones se le denomina insolación en superficie, o lo que comúnmente se conoce como radiación solar en superficie.

1.1 Leyes de radiación y espectro electromagnético

La radiación electromagnética se puede clasificar de acuerdo a su espectro en diferentes longitudes de onda, que van desde los rayos gama ($\lambda \leq 10^{-11}\text{m}$) hasta las ondas de radio ($\lambda \geq 10^{-2}\text{m}$)(ver figura 1a). Para presentar las leyes de radiación es necesario primero definir el concepto de cuerpo negro. Un cuerpo negro es una idealización de un objeto con una superficie que absorbe totalmente la radiación incidente. El cuerpo negro constituye un modelo físico ideal en el estudio de la emisión electromagnética.

- Ley de Planck: la ley de Planck describe la intensidad de la radiación de un cuerpo negro en función de la longitud de onda y su temperatura.

$$E_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 [e^{\frac{hc}{K_B\lambda T}} - 1]} \quad (3)$$

Donde h es la constante de Planck con un valor de $6,62607 \times 10^{-34}$ Js, K_B la constante de Boltzmann con un valor de $1,380648 \times 10^{-23}$ JK⁻¹, λ es la longitud de onda en m , T es la temperatura en K y c es la velocidad de la luz en el vacío con un valor de 3×10^8 ms⁻¹ (Petty, 2006). La expresión (3) se da en unidades de $Wm^{-2}m^{-1}$.

- Ley de Wien: la ley de desplazamiento de Wien describe la longitud de onda máxima λ_m para la cual la radiación emitida por un cuerpo negro a temperatura T es máxima:

$$\lambda_m = \frac{\Gamma}{T} \quad (4)$$

Donde Γ es una constante que equivale a $2897 \mu mK$ y T la temperatura del cuerpo en K. Las longitudes de onda calculadas haciendo uso de la expresión (4) se dan en μm .

- Ley de Stefan-Boltzmann: La ley de Stefan-Boltzmann es el resultado de integrar la ley de Planck para todas las longitudes de onda y con respecto a todas las direcciones de hemisferio hacia el cual se está emitiendo la energía. Ésta expresa la energía por unidad de tiempo y de área irradiada por un cuerpo negro en función de su temperatura:

$$E_{Total} = \sigma T^4 \quad (5)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann que tiene un valor aproximado de $5,6697 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$ (Ideam & Upme, 2018). La expresión (5) tiene unidades de $\frac{W}{m^2}$.

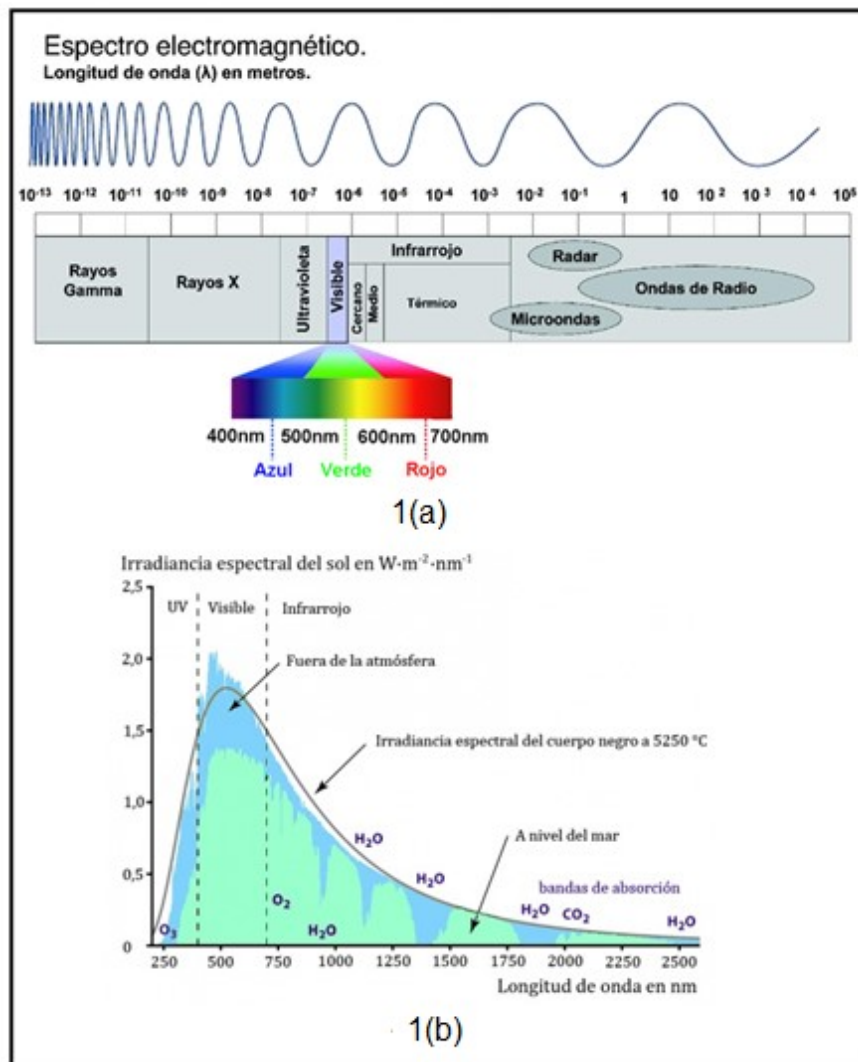


Figura 1: Espectro electromagnético 1(a). Espectro de la radiación solar 1(b).

Imagen modificada de: <http://laluzeneliessulayr.blogspot.com.co/2015/03/lo-que-el-ojo-no-ve-luz-infrarroja.html> y https://cyt-ar.com.ar/cyt-ar/index.php/Irradiaci%C3%B3n_solar

1.2 Radiación solar

El Sol emite en su mayoría en las bandas del ultravioleta, visible y el infrarrojo. Las longitudes de onda entre 10 nm (10^{-8} m) a 700 nm se denominan radiación de onda corta (ultravioleta y visible), mientras que el flujo de radiación de onda larga se encuentra entre 700 nm a 10^6 nm (infrarrojo) (Jaramillo, 1998). La irradiancia espectral del sol de la figura 1b se obtiene a partir de la ley de Planck.

Utilizando la ley de Wien se puede determinar la longitud de onda donde se encuentra el pico de emisión en el espectro solar en relación a la temperatura. Aplicando la ley de

Wien y la temperatura de la superficie solar (aproximadamente $5800K$), se puede determinar que esta longitud de onda es $499,5 \text{ nm}$ (ver figura 1b). Esta longitud de onda corresponde al color verde de la naturaleza. Vale la pena mencionar que el rango de longitudes de onda visible para el ojo humano coincide con el rango en el cual el Sol irradia con mayor intensidad (ver figura 1b).

Con la ley de Stefan-Boltzmann se puede encontrar la energía emitida por el sol a partir de su temperatura solar, obteniendo como resultado un valor aproximado de $6.4 \times 10^7 \text{ Wm}^{-2}$. Esta energía se propaga en todas las direcciones disminuyendo su densidad en relación al inverso del cuadrado de la distancia entre Sol y la Tierra, de manera que el flujo de energía por unidad de área que intercepta la tierra en el tope de la atmósfera corresponde a 1367 Wm^{-2} . Este valor permanece constante debido a la órbita casi circular de la Tierra con respecto al Sol y se denomina constante solar.

1.3 Atenuación de la radiación solar

La radiación solar se propaga en todas las direcciones a través del espacio como ondas electromagnéticas. Al cruzar por la atmósfera sufre un debilitamiento por diferentes procesos (esparcimiento y absorción de moléculas de gases). A continuación se presentan los diferentes procesos:

- **Esparcimiento:** La radiación solar viaja en línea recta, pero cuando atraviesa la atmósfera se esparce en todas las direcciones posibles alrededor de un punto en el espacio tridimensional, debido a la presencia de gases y partículas que cambian la dirección del recorrido de los fotones. El esparcimiento depende de las longitudes de onda de la radiación y de los gases o partículas. Cuando la longitud de onda de la radiación solar es menor que el radio de las partículas, se da un fenómeno conocido como esparcimiento de Rayleigh, y si la longitud de la radiación solar es mayor que la de los gases y partículas, se da un fenómeno llamado esparcimiento de Mie (Suárez et al. 2014).
- **Reflexión:** La reflexión es un concepto límite de la dispersión que podría ser difusa cuando la radiación solar incide en una superficie y se refleja en diferentes direcciones, o especular cuando el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

La fracción reflejada de la radiación incidente sobre una superficie se denomina albedo. Cuanto más reflectante es una superficie, mayor es su albedo. Éste puede variar de acuerdo a la cobertura nubosa, a la inclinación de los rayos solares, y a las partículas en el aire. El albedo se define de acuerdo a la siguiente expresión:

$$A = \frac{R}{H} \tag{6}$$

Donde R es la radiación que se refleja y H es la radiación que llega a la superficie.

- Absorción por moléculas de gases y partículas en suspensión: Cuando las frecuencias de la radiación electromagnética son similares a las frecuencias de vibración de las moléculas o partículas en suspensión que se encuentra en la atmósfera, éstas absorben selectivamente energías de diferentes longitudes de onda. Por ejemplo, el ozono tiene una alta capacidad de absorción de radiación ultravioleta procedente del sol, lo que ocasiona el aumento de temperatura en la estratosfera. Así mismo, el vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso entre otros, absorben radiación infrarroja, lo que ocasiona el efecto invernadero. En el caso del espectro visible, la atmósfera terrestre despejada presenta un bajo poder de absorción al punto que es prácticamente transparente para el ojo humano (Ideam & Upme, 2018).

Cuando la radiación alcanza la superficie terrestre oceánica o continental puede ser absorbida o reflejada. La cantidad de radiación solar que es absorbida por la superficie se reemite a la atmósfera en forma de radiación de onda larga. Esta radiación de onda larga es absorbida por los gases de efecto invernadero con lo cual se transmite calor a la atmósfera (Ideam & Upme, 2018).

1.4 Incidencia de la radiación sobre la superficie terrestre

La radiación solar que incide en el tope de la atmósfera depende de la localización geográfica (latitud, longitud y elevación) y de factores como la época del año y la duración del día. Estos factores pueden ser determinados con exactitud para estimar la cantidad de energía solar disponible. Por otro lado, una vez la radiación solar ingresa a la atmósfera el factor más relevante en la incidencia de la radiación solar en superficie son las nubes, que dependen de las condiciones meteorológicas (Ideam & Upme, 2018). Los parámetros fundamentales que determinan la cantidad de radiación que llega a la superficie son:

- La transparencia de la atmósfera, caracterizada por su índice de claridad.
- La nubosidad.
- El día del año y su duración basada en consideraciones astronómicas.
- La elevación del sol en el horizonte.
- La heliofanía definida como el tiempo en horas durante el cual el sol tiene un brillo solar efectivo.

La radiación que llega a la superficie de la Tierra se clasifica en:

- Radiación directa: Es la radiación solar que proviene del disco solar y que llega a la superficie de la Tierra, tras haber sufrido disminución en su energía por

esparcimiento y absorción. Esta radiación no presenta cambios en su dirección original y se puede encontrar a partir de la siguiente expresión:

$$H_d = H_s \text{ sen } h \quad (7)$$

Donde H_s la intensidad de radiación directa Wm^{-2} sobre una superficie normal a los rayos solares, H_d es la componente vertical de la intensidad de radiación solar directa sobre una superficie horizontal, h es el ángulo formado entre la normal del plano horizontal geográfico y la línea de la trayectoria de los rayos del sol, y θ_z el ángulo cenital (Ideam & Upme, 2018).

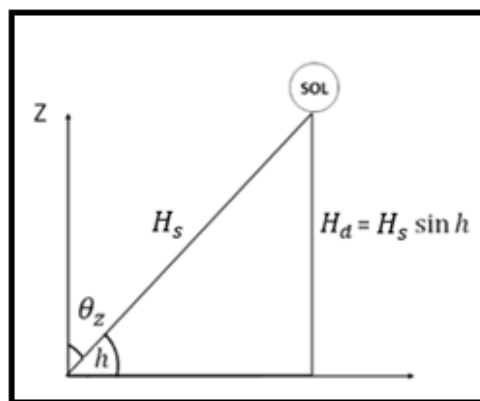


Figura 2: Componente directa de la radiación. Fuente (IDEAM)

El flujo de radiación directa también depende de factores como la constante solar y la transparencia atmosférica en presencia de gases absorbentes, nubes y niebla (Ideam & Upme, 2018).

- Radiación difusa: La radiación por esparcimiento, es la componente del flujo de radiación solar que se difunde en todas las direcciones al encontrarse con pequeñas partículas suspendidas o elementos de las nubes en la atmósfera. Algunos autores la definen como la radiación que incide desde todas las direcciones sobre una superficie horizontal que no incluya a la radiación directa.

Cuando no hay nubes el proceso de esparcimiento se da entre las partículas que se encuentran en la atmósfera. En la superficie de la tierra la radiación por esparcimiento depende de la altura del sol en el horizonte, de la cantidad de partículas en la atmósfera, de la nubosidad y de la altura sobre el nivel del mar (Ideam & Upme, 2018).

- Radiación global: La radiación global es la suma de la radiación directa y la radiación por esparcimiento; es decir, toda la radiación solar que llega a la tierra y se mide en una superficie horizontal. Esta radiación depende de dos factores: una contribución directa que se debilita por absorción y esparcimiento y una contribución de radiación difusa, que incluye esparcimiento debido al aire, los aerosoles y las partículas de las nubes (Pelkowski, 2007).

1.5 Medición de la información de radiación solar

Existen diferentes formas para estimar la radiación solar en superficie, algunas de forma directa como las estaciones en tierra, y otras de forma indirecta como los sensores remotos (en particular para este trabajo se utilizan las imágenes del canal visible del satélite GOES 13).

Medición directa:

Los sensores que registran de forma directa información de radiación en superficie, son principalmente los actinógrafos, pirheliómetros, piranómetros y los heliógrafos.

El principio de funcionamiento es el siguiente:

- Actinógrafos:

Los actinógrafos registran la radiación en superficie y funcionan a partir de un sensor termomecánico, que consiste de dos placas mecánicas de color negro y blanco. La radiación solar incidente en la placa de color negro aumenta la temperatura, mientras que en la placa blanca la radiación se refleja. Esta diferencia de temperaturas se registra en una termocupla activando un sistema de palancas que registra sobre un tambor que gira por un mecanismo de reloj. Las curvas que se obtienen deben ser integradas para determinar la cantidad de energía solar recibida durante un día (Ideam & Upme, 2018). El actinógrafo se diferencia de un piranómetro en que su sensor es una lámina bimetalica y el del piranómetro es una termopila.



Figura 3: Actinógrafo.

Imagen tomada de: <http://meteorologia.pucp.edu.pe/estacion/bgradiacione.html>

- Pirheliómetros:

Los pirheliómetros son instrumentos que registran la radiación solar directa. Su objetivo es recibir la radiación proveniente sólo del disco solar, mediante una pequeña abertura frontal. Dentro de ellos se encuentra una resistencia térmica y un sumidero de calor, donde la radiación solar incidente es absorbida por la cavidad receptora, convirtiéndose en calor que fluye a través de la resistencia hacia el sumidero, produciendo un cambio de temperatura que registra una energía eléctrica a través de una termopila. La cavidad receptora debe mantenerse siempre perpendicular a la dirección de la radiación solar, por medio de un sistema de seguimiento (OMM, 2014). El pirheliómetro de cavidad absoluta, serie PMO-6, que corresponden al modelo de patrón nacional del que dispone el IDEAM.



Figura 4: Pirheliómetro de cavidad absoluta, serie PMO-6.

Imagen tomada de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21129/9-ApendiceC.pdf/3411d6a7-e1fb-41f9-b231-a856d37b742e>

- Piranómetros:

Los piranómetros son instrumentos que se utilizan en la medición de radiación solar global, directa y difusa sobre una superficie horizontal en un ángulo de 180 grados. La medición se realiza a partir de la diferencia de calentamiento de dos secciones de color blanco y negro en un disco plano (Ideam & Upme, 2018). Cuando el aparato es expuesto a la radiación solar, la sección negra aumenta su temperatura en comparación con la blanca. Esta diferencia de temperaturas se puede detectar electrónicamente a partir de la generación de un voltaje eléctrico proporcional a la radiación solar incidente (Ideam & Upme, 2018).

Los piranómetros tienen instalada una cúpula de vidrio óptico transparente para proteger y aislar otros factores que pueden alterar su temperatura como el viento, lluvia y algunas pérdidas térmicas de la radiación hacia el ambiente (OMM, 2014). El sensor recomendado y utilizado en Colombia es el piranómetro termoelectrico CMP-11 por ser uno de los más difundidos y precisos (Ideam & Upme, 2018).



Figura 5: Piranómetro CMP-11.

Imagen tomada de: <https://www.campbellsci.es/cmp11>

- Heliógrafos:

Los heliógrafos tienen como objetivo medir la duración del brillo solar u horas de sol. El principio de funcionamiento es la convergencia de los rayos solares a través de una esfera sólida de vidrio pulido, que se comporta como una lente convergente. Ésta se coloca de tal forma que su foco coincida con una faja de papel, haciendo que se queme cuando los valores de radiación directa superan los $120Wm^{-2}$ (OMM, 2014). El instrumento recomendado y utilizado en Colombia para la medición de la duración de la insolación es el heliógrafo tipo Campbell-Stokes (Ideam & Upme, 2018).



Figura 6: Heliógrafo Campbell Stokes.

Imagen tomada de: atlas solar 2018 Ideam.

Medición indirecta:

Existen dos tipos de satélite meteorológicos que registran la información reflejada por la Tierra y que se clasifican en función de la órbita sobre la que se sitúan (Rodríguez, 2004).

Satélites polares: Los satélites polares se caracterizan porque giran de norte a sur, es decir que pasan sobre los polos en su vuelo. Estos satélites se encuentran en órbitas heliosíncronas. Esto significa que pueden observar cualquier lugar de la Tierra dos veces al día. Los satélites de órbita polar ofrecen mayor resolución que sus homólogos geoestacionarios debido a su mayor cercanía con la Tierra (se sitúan a una altura comprendida entre los 800 y 1200 km).

Satélites geoestacionarios: Estos satélites se caracterizan porque giran de forma simultánea con la Tierra. Se ubican en un punto fijo sobre el ecuador terrestre a una distancia de aproximadamente $4 \times 10^7 m$ con respecto al centro de la Tierra. Estos satélites al estar tan alejados tienen una buena cobertura sobre el ecuador y un campo de visión amplio y continuo de 24 horas (Rodríguez, 2004). Los principales satélites meteorológicos que describen este tipo de órbita son los GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), METEOSAT (Europa), GMS (Japón) entre otros.

Los satélites tienen un radiómetro que registra la radiación electromagnética reflejada y emitida por la Tierra. Los satélites permiten analizar esta información en cuatro aspectos (espacio, tiempo, longitud de onda y radiancia). La resolución espacial depende de la sección angular del sensor y de la distancia a la superficie de la Tierra, lo cual establece el área de cada píxel. La resolución temporal se refiere al intervalo de tiempo que pasa entre cada captura de imagen. La resolución espectral hace referencia a la cantidad de bandas y espectros para los cuales es sensible el sensor. Estas bandas son canales de información que permiten analizar variables particulares, de acuerdo a lo que se necesite. La resolución radiométrica aporta información sobre la sensibilidad del sensor y sobre los umbrales máximos y mínimos de la radiación que registra (Olcoz, 2014). La resolución radiométrica depende de la sensibilidad del radiómetro y se expresa como el número de bits necesarios para registrar la información en los píxeles (Badescu, 2008).

La mayoría de los satélites geoestacionarios incluyen al menos tres canales principales: un canal visible ($0.5-1.1 \mu m$), un canal infrarrojo térmico ($10.5-12.5 \mu m$), y un canal de vapor de agua ($5.7-7.1 \mu m$). El sensor de imágenes (imager) del GOES 13 tiene 5 bandas. Las infrarrojas con resolución de 4 km y el visible de 1 km. Para el caso del satélite GOES 13 tiene estos tres canales con una resolución espacial de 4 a 1 km/píxel, y una resolución temporal de al menos 30 minutos (OSCAR, 2011). Sin embargo, las últimas generaciones de satélites geoestacionarios tienen mayor número de canales espectrales (Badescu, 2008).

2. Antecedentes

El uso de imágenes de satélite para la estimación de radiación solar en superficie comienza a finales de la década de los 70, siendo los trabajos más relevantes los que se muestran a continuación y que se utilizaron como base fundamental para el desarrollo de este trabajo.

En el año 1979 se realizó una regresión estadística que tiene en cuenta el nivel de brillo en los píxeles en donde se encuentra cada estación. Ajustando al modelo condiciones de nubosidad de cielo despejado, parcialmente nublado y nublado, los errores que se obtuvieron en el cálculo de la radiación solar en superficie diaria fueron menores al 10%, y para los días despejados menores al 5% (Tarpley, 1979).

Gautier *et al.* (1980) desarrollaron un modelo físico sencillo a partir de las mediciones de brillo que registra el satélite debido al efecto de las nubes, y establecieron dos condiciones de nubes para un modelo de atmósfera despejada y nublada teniendo en cuenta los efectos de absorción y del esparcimiento. Ellos subestimaron el valor de la radiación solar en superficie promedio mensual en un 5% para días despejados, y para días nublados el valor promedio mensual subestima al calculado en un 15%.

Cano *et al.* (1986) desarrollaron una metodología que consiste en determinar estadísticamente la nubosidad de un lugar para obtener una idea del albedo utilizando imágenes satelitales. Para esto se construye un mapa de cobertura de nubes, luego se realizan regresiones estadísticas del mapa de cobertura nubosa y los valores del índice de claridad obtenido de los valores en las estaciones. Las dimensiones de cada píxel son de 5km de lado y los resultados promedio anuales de radiación solar en superficie varían entre el 15 y 25% comparados con los valores calculados por la estación.

Para el año de 1986 a partir de imágenes GOES del canal visible y haciendo una simplificación al modelo de Tarpley en relación a los tipos de cobertura nubosa, se realizaron mapas de insolación de Estados Unidos y Sur América. Los errores promedios estándar con este método fueron de 16.2% para los resultados de radiación solar en superficie horario y de 9.5 % para los acumulados diarios (Justus *et al.* 1986).

Diabaté *et al.* (1988) desarrollaron un proyecto llamado Heliosat, con el cual se define una herramienta operativa para la elaboración de mapas de radiación solar en superficie a partir de imágenes de satélite. La idea básica del método es que la cantidad de cobertura de nubes sobre un área específica determina estadísticamente la radiación solar en superficie para esa área.

Para el año de 1989 se desarrolló el proyecto "Global Atmospheric Research Program Atlantic Tropical Experiment" en el cual se utilizaron datos de estaciones en superficie y observaciones satelitales del canal visible para encontrar la distribución de la radiación incidente en la superficie, obteniendo errores estándar promedio en la estimación de la

radiación en superficie del 22% para los valores horarios y para los acumulados diarios del 8% (Schmetz, 1989).

Moussu *et al.* (1989) presentaron un método para mapear el brillo aparente del suelo utilizando las imágenes satelitales del espectro visible, a través de la detección de nubes, comparando la información de cada pixel del sensor con lo que ocurriría si el pixel estuviera libre de nubes. Esta detección de nubes se realizó utilizando sólo la banda visible, para determinar la radiación solar global en tierra usando las imágenes de satélite geoestacionarios. En este trabajo se realiza una descripción de los tiempos de cómputo y procesamiento de cada imagen de satélite.

Zarco *et al.* (1996) presenta una metodología similar a la utilizada por Cano, pero utilizando satélites de órbita polar los cuales solo registran un máximo de dos imágenes satelitales por día, obteniendo errores de 11,5% en el valor de la radiación solar en superficie mensual. En este trabajo se sugiere la utilización de satélites orbitales que permitan obtener un mayor número de imágenes por día.

Schulze-Kegel & Heidt (1996) definen un índice de cobertura nubosa a partir de los ángulos de elevación del sol y del satélite sobre cada pixel de la imagen, relacionándolo linealmente con el índice de claridad, subestimando en un 15% el valor de radiación solar en superficie mensual con respecto a lo registrado por la estación.

Rubio *et al.* (2003) presentan un modelo estadístico para estimar los valores horarios de radiación solar en superficie al sur de España a partir de las medidas del satélite Meteosat. Ellos realizaron una regresión a partir de un polinomio de grado 2 entre la radiación solar en superficie calculada por el satélite y la registrada por la estación. El resultado que obtuvieron presentó un error cuadrático medio relativamente alto del 31% en el cálculo de radiación solar horaria en superficie.

Zarzalejo & Ramírez (2006) presentan una metodología para la elaboración de un atlas Ibérico de radiación solar a partir de imágenes de satélite, basado en el método Heliosat. Esta metodología se validó para treinta estaciones en la península Ibérica durante el periodo de 1994-2004. Se fundamentó en la estimación y análisis de factores de reflectancia en cada pixel de la imagen, para el cálculo del albedo terrestre. Los resultados presentan un error del 17% en la estimación diaria del valor de la radiación solar en superficie.

En Suramérica uno de los primeros trabajos desarrollados fue en Argentina, donde se utilizó el modelo estadístico de Tarpley usando imágenes de satélite GOES, para calcular la irradiación solar global en diferentes zonas del país (Righini, 2004). Este trabajo se basó en el cálculo de la radiación solar en superficie horaria haciendo uso del brillo del pixel para condiciones de cielo despejado. Se obtuvieron errores cuadráticos medios entre el 24% y 13% para la estimación de la radiación solar diaria en superficie

Para el año 2008 se publicó un libro titulado *Modelización de la radiación solar en la superficie terrestre*. En este libro se presentan 20 capítulos que abordan la teoría general de la radiación, su medición, la modelación y las diferentes aplicaciones. Los capítulos

5, 18 y 19 presentan relaciones entre el brillo solar, la radiación solar en superficie en un lugar y cómo se pueden generar mapas de radiación solar a partir de imágenes de satélite (Badescu, 2008).

Ceballos & Rodríguez (2008) desarrollaron un algoritmo que presenta una relación lineal entre la cobertura de nubes y la reflectancia de los píxeles de las imágenes visibles de los satélites geoestacionarios GOES. Construyeron histogramas a partir de las frecuencias acumuladas para la clasificación de nubes. La precisión en el cálculo de la radiación solar en superficie diaria subestimó en un 10% comparado con la información suministrada por los radiómetros.

Polo (2010) desarrolló una tesis doctoral que analiza varios modelos que utilizan información de las imágenes de satélite de alta resolución del canal visible. El objetivo era establecer una metodología completa y operativa para la estimación de series horarias de radiación solar global horizontal y directa en la geografía española. Se fundamentó en el cálculo del índice de nubosidad, para un modelo de cielos despejados y cubiertos. Los resultados presentan un error promedio mensual entre 13 y 20% comparado con lo que muestran las estaciones.

Suárez *et al.* (2014) aplicaron un modelo tipo Tarpley en Uruguay, haciendo uso de imágenes de satélite GOES y datos de las estaciones de superficie para el periodo 2010-2011. Los resultados en la estimación de la radiación solar en superficie fueron del 12% para el promedio diario, 20% para el promedio horario y 7% para el promedio mensual.

Laguarda *et al.* (2018) desarrollaron un modelo semi-empírico para el cálculo de la radiación solar en superficie a partir de imágenes satelitales GOES. Este modelo manifiesta la importancia y la sensibilidad de los valores máximos y mínimos de radiancia medidos por el satélite. Éste trabajo sugiere utilizar el 80% de los valores máximos y el 100% de los valores mínimos de radiancia obtenidos a partir del nivel digital de la imagen de satélite. El buen rendimiento de este modelo se debe a que fue utilizado en zonas homogéneas en topografía y clima. Como resultado obtuvieron una subestimación del 13% en la radiación solar horaria en superficie.

Para el caso de Colombia se han realizado tres versiones del Atlas de Radiación Solar (1993, 2005 y 2018) que de manera general dan cuenta de la distribución y del comportamiento de la radiación global en Colombia. La metodología empleada es el uso de la información de brillo solar de las estaciones y del modelo de Ångström-Prescott (Ideam & Upme, 2018). Para el caso de lugares carentes de estaciones se realizó un tratamiento estadístico de interpolación de acuerdo a la homogeneidad del terreno y a la distancia que separa las estaciones (Ideam & Upme, 2018).

Suárez (2013) realizó una estimación del valor de la radiación solar en superficie para Bogotá haciendo uso de imágenes de satélite GOES. Teniendo en cuenta algunas correcciones en el cálculo de la nubosidad, utilizó el modelo estadístico de Tarpley haciendo uso de la información registrada por algunas estaciones cercanas, en el

periodo desde enero de 2007 hasta diciembre de 2011. Los resultados obtenidos subestimaron los acumulados diarios entre el 5 y 20% (Suárez, 2013).

Doncel (2018) desarrolló el modelo Heliosat para la estimación de la radiación solar en superficie en la región cundiboyacense para el año 2011, calculando los valores del índice de nubosidad diarios a partir del promedio del número de imágenes de cada día. El modelo presentó una sobreestimación del 20% con respecto a los valores mensuales presentados por el Ideam en su Atlas de Radiación Solar.

En general los trabajos anteriormente descritos, estiman la radiación solar en superficie haciendo uso de las imágenes de satélite basados principalmente en el concepto de índice de nubosidad, debido a que es el factor más relevante en la radiación solar que incide en la superficie. El trabajo que se presenta busca aportar elementos para calcular el índice de nubosidad y el brillo solar a partir de las imágenes de satélite, para estimar la radiación solar en superficie utilizando el modelo empírico propuesto por Ångström- Prescott utilizando el brillo solar calculado a partir de las imágenes de satélite y no el registrado por la estación radiométrica.

3. Justificación y planteamiento del problema

Las diferentes sociedades necesitan servicios energéticos para suplir sus necesidades básicas. En Colombia esta energía proviene en un 70% de hidroeléctricas y el 30% restante de fuentes fósiles. En Colombia existe una alta dependencia de los recursos hidroeléctricos, siendo vulnerables a sequías similares a las causadas por el fenómeno de El Niño (Upme, 2015). Por otro lado las fuentes fósiles no son sosteniblemente indefinidas ya que las reservas son finitas y producen emisiones de gases que afectan el medio ambiente. Por esta razón sería conveniente hacer uso de energías renovables que permitan contribuir al desarrollo social y económico, reduciendo de alguna forma los efectos negativos al medio ambiente.

El incremento de las necesidades energéticas que experimenta la sociedad actual y la dependencia de combustibles fósiles, hace que se busquen nuevas formas de energías limpias y renovables como la energía solar (Zarzalejo *et al.* 2006). El reto está en el adecuado conocimiento del recurso solar, a partir de las pocas estaciones radiométricas y la disponibilidad de series representativas (Ideam & Upme, 2018).

Esto ha generado que los diferentes países elaboren estrategias para aumentar el uso de estas energías renovables en su consumo total energético (Rodríguez, 2009). En países como España y Alemania se generó en el año 1997 una política para el uso y aprovechamiento de energías renovables (Sandoval, 2014). En México y Brasil en el año 2009 se crea una ley para el aprovechamiento de energías renovables. Para el caso particular de Colombia la ley 697 de 2001 fomenta el uso racional y eficiente de la energía, promoviendo la utilización de energías alternativas; en el decreto 3683 de 2003 se hace referencia al inventario de fuentes de energía convencionales y no convencionales. En el año 2014 se propone la ley 1715 por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.

El interés por el uso de las fuentes de energía renovables y en particular en la energía solar no ha sido ajeno a Colombia. Por tal razón se han elaborado 3 versiones del Atlas de Radiación Solar de Colombia en los años 1993, 2005 y 2018. En estos trabajos se presentan diferentes recomendaciones, siendo relevante aumentar el número y la distribución geográfica de las estaciones, y el modelamiento espacial y temporal de las variables meteorológicas radiación solar, brillo solar, temperatura y humedad relativa (Ideam & Upme, 2018).

En la mayoría de países la densidad espacial de las estaciones meteorológicas que recopilan información de radiación solar es inadecuada (Badescu, 2008). Para el caso de Colombia existen muy pocas estaciones radiométricas en el territorio nacional, y las existentes por lo general tienen periodos cortos de información y con muchos datos faltantes (Ideam & Upme, 2018). Esta situación ha motivado el desarrollo de nuevas

formas de estimar el valor de la radiación solar en lugares donde no existen estaciones y donde las que existen tienen registros faltantes de información.

La poca cobertura de las estaciones y la falta de información meteorológica en el territorio nacional en particular en la región de la Orinoquía (Ideam & Upme, 2018), pone de manifiesto usar otra fuente de información que permita mejorar la resolución temporal y espacial de la radiación en superficie como lo es el uso de las imágenes de satélite.

Por esta razón se hace necesario el uso de otras fuentes de información como lo son los satélites geoestacionarios, que permiten obtener información de la radiación solar en grandes áreas geográficas (Hammer *et al.* 2003). Estos registros permiten conocer la distribución espacial cuasi-instantánea de la radiación solar, complementando las formas tradicionales de interpolación de medidas radiométricas de estaciones cercanas basadas en la topografía del lugar, el número y la distancia entre estaciones (Zarzalejo *et al.* 2006).

Teniendo en cuenta todo lo anterior, este trabajo valida la información de radiación solar en superficie obtenida a partir de las imágenes de satélite para la estación La Libertad ubicada en la región de la Orinoquía, tomando como referencia los valores de radiación solar que registra la estación. Se valida la información de radiación haciendo uso de un método estadístico tipo Cano para el tratamiento de las imágenes, para obtener el índice de nubosidad y el respectivo brillo solar. El valor de brillo solar obtenido por las imágenes de satélite se sustituye en el modelo empírico de Ångström-Prescott para estimar la radiación solar en superficie. Lo anterior nos lleva a plantearnos la siguiente pregunta:

¿Es posible estimar la radiación solar en superficie en la estación de La Libertad ubicada en la región Orinoquía a partir de imágenes de satélite?

4. Objetivos

- **Objetivo general:**

- Validar la radiación solar en superficie obtenida a partir de las imágenes de satélite para la estación La Libertad ubicada en la región de la Orinoquía.

- **Objetivos específicos:**

- Determinar los coeficientes de Ångström-Prescott a partir de la información disponible en la estación La Libertad.
- Obtener la información del brillo solar a partir de las imágenes de satélite GOES, para el periodo de información disponible en la estación La Libertad.
- Encontrar la radiación solar en superficie en la estación La Libertad a partir de las imágenes satelitales.
- Comparar la información de radiación solar en superficie de la estación La Libertad con la estimada a partir de las imágenes de satélite.

5. Métodos para el cálculo de la radiación solar en superficie a partir de estaciones radiométricas

- **Modelo Ångström-Prescott:**

El modelo empírico de Ångström-Prescott es muy utilizado y citado en diversos trabajos a nivel mundial. Este modelo relaciona la radiación diaria promedio mensual con la radiación de un día claro (despejado) haciendo uso de la información de horas de brillo solar (Prescott, 1940):

$$\frac{H}{H_{clear}} = a + b \frac{n}{N} \quad (8)$$

Donde H es la radiación solar sobre una superficie horizontal, H_{clear} es la irradiación solar sobre la misma superficie horizontal (asumiendo un cielo perfectamente claro), la variable n es el número de horas de brillo sobre una superficie horizontal y N representa el número de horas de brillo solar asumiendo un cielo perfectamente claro. En esta relación empírica de Ångström se calcularon los valores de los coeficientes a y b a partir de las correlaciones de los datos obtenidos en mediciones en Estocolmo en el año de 1924 (Badescu, 2008) obteniendo:

$$\frac{H}{H_{clear}} = 0,25 + 0,75 \frac{n}{N} \quad (9)$$

En el año de 1940 Prescott modifica la variable de la irradiación solar H_{clear} , por la irradiación solar extraterrestre H_{ext} modificando la expresión (8) obteniendo la siguiente expresión:

$$\frac{H}{H_{ext}} = a + b \frac{n}{N} \quad (10)$$

Estos coeficientes a y b dependen de los diferentes parámetros geográficos, climáticos, propiedades físicas, espaciales y dinámicas de la atmósfera. Para una mayor precisión se recomienda que estos coeficientes deben encontrarse a partir de estaciones radiométricas que registren de manera simultánea radiación solar en superficie y brillo solar (OMM, 2014). El coeficiente a varía en un rango de 0,089 a 0,460, y para el caso de b varía entre 0,208 y 0,851 (Akinoglu, 2008). Algunos autores han presentado modificaciones a esta expresión realizando regresiones y ajustando funciones no lineales buscando obtener resultados más precisos en sus cálculos de radiación en superficie (Badescu, 2008). De igual forma se introduce el término de índice de claridad como la relación de $\frac{H}{H_{ext}}$, y las expresiones H_{ext} y N se calculan de manera teórica a partir de relaciones astronómicas que dependen del lugar, la declinación solar, y la

distancia Tierra-Sol. El significado físico de estos coeficientes se analiza a partir de los valores extremos de la siguiente forma:

Para días claros y despejados, el número de horas n que registra la estación debe ser muy cercano al número de horas de brillo solar máximo posible N para ese lugar. Entonces el valor de $\frac{n}{N}$ sería casi igual a 1, por lo tanto la expresión (8) quedaría de la siguiente forma:

$$\frac{H}{H_{clear}} = a + b \quad (11)$$

Es decir, la suma de los coeficientes da cuenta del índice de claridad en un día claro o perfectamente despejado. Este valor también se puede interpretar como el porcentaje de radiación solar que llega a la superficie comparado con lo que llegaría en un día completamente despejado.

Para días opacos o nublados se tiene que el número de horas n que registra la estación es pequeño comparado con el número de horas de brillo solar máximo posible para ese lugar N , por lo tanto $\frac{n}{N}$ sería aproximadamente igual a cero. En consecuencia la expresión (8) quedaría de la siguiente forma:

$$\frac{H}{H_{clear}} = a \quad (12)$$

En este caso el coeficiente a explica el porcentaje de H_{clear} de la radiación solar para un día despejado que llega a la superficie en un día nublado.

En general se puede evidenciar que cuando la pendiente de la recta es mayor, el punto de intersección de esta con el eje Y disminuye, es decir si la pendiente de la expresión (8) aumenta se tiene que para días despejados el componente de radiación por esparcimiento disminuye. Para los días opacos o nublados sucede lo contrario, la pendiente disminuye y la componente de radiación por esparcimiento aumenta (Pelkowski, 2009).

La siguiente expresión permite relacionar el índice de nubosidad n_c y el brillo solar relativo $\frac{n}{N}$ registrado por el heliógrafo (este brillo solar relativo en este trabajo se denominará brillo solar para no repetir la palabra relativo):

$$n_c + \frac{n}{N} = 1 \quad (13)$$

La expresión (13) permite evidenciar que cuando se tienen días despejados ($\frac{n}{N}$ es muy cercano a 1) disminuye el índice de nubosidad y viceversa para días opacos o nublados ($\frac{n}{N}$ es muy cercano a cero) aumenta el índice de nubosidad. En la práctica sirve como una relación aproximada, con un error que depende de cada estación. El brillo solar que

se calcula a partir de las imágenes de satélite lo llamamos brillo solar calculado $\frac{\hat{n}}{N}$, y se obtiene de la siguiente expresión:

$$\frac{\hat{n}}{N} = 1 - n_c \quad (14)$$

Al combinar las expresiones (10) y (14) se obtiene una expresión para la radiación en superficie horizontal en términos del índice de nubosidad:

$$H = [a + b(1 - n_c)] H_{ext} \quad (15)$$

Tácitamente estos valores de a y b son diferentes a las coeficientes de la expresión (9) debido a que se utilizan los valores de H_{ext} en lugar de H_{clear} .

6. Métodos para el cálculo de la radiación en superficie a partir de imágenes de satélite

El uso de imágenes de satélite para la estimación de la radiación solar en superficie permite conocer la distribución espacial y temporal de forma simultánea y en grandes áreas de terreno. Los satélites proporcionan imágenes de manera casi continua (satélites geoestacionarios) que permiten determinar la radiación solar en superficie a partir de dos modelos generales: los modelos estadísticos y los modelos físicos (Zarzalejo *et al.* 2006).

Los modelos para estimar la radiación solar sin importar si sean de tipo estadístico o físico, se basan en la ley de la conservación de la energía (Suárez, 2013). Teniendo en cuenta esta ley de conservación, la radiación solar extraterrestre H_{ext} que llega a la parte superior de la atmósfera es igual a la suma de la energía devuelta al espacio E_S , más las energías absorbidas en la atmósfera E_A y por la superficie E_T (Suárez, 2013).

$$H_{ext} = E_S + E_A + E_T \quad (16)$$

La expresión de E_T se puede escribir en términos de la radiación incidente H y del albedo de la superficie A .

$$E_T = H [1 - A] \quad (17)$$

Al combinar las ecuaciones (16) y (17) se obtiene una expresión para la radiación incidente de la siguiente forma:

$$H = \frac{1}{[1 - A]} [H_{ext} - E_A - E_S] \quad (18)$$

Esta expresión es la base teórica para la estimación de la radiación solar incidente en superficie, y de acuerdo al modelo que se utilice y a la forma en que se parametricen los

términos que no se conocen de la expresión (16), se dan los modelos físicos o estadísticos (Suárez, 2013).

6.1 Modelos estadísticos

Los modelos estadísticos hacen uso de expresiones empíricas que relacionan el flujo radiativo que detecta el satélite y la radiación solar registrada simultáneamente en la superficie terrestre (Zarzalejo *et al.* 2006). Estos modelos requieren de un gran número de datos piranométricos, de acuerdo a la distribución espacio temporal y de estos datos dependerán los resultados en la estimación (Badescu, 2008). Los métodos clásicos más utilizados en la estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite son el método de Hay & Hanson, el de Tarpley, el de Justus (ver anexo A) y el de Cano (Suárez, 2013).

- **Método de Cano:**

El método de Cano o también llamado método Heliosat, estima la radiación solar en superficie haciendo uso de imágenes de satélite a partir de dos pasos principales. El primero parte de analizar la atmósfera y los elementos que pueden alterar la radiación solar que la atraviesa. Para este análisis se propone la idea de un cielo despejado donde el cálculo de la irradiancia total de cielo despejado se da en términos de la suma de la irradiancia normal directa y la irradiancia difusa (Hammer *et al.* 2003). El segundo paso es encontrar un índice de nubes a partir de las imágenes de satélite, que dé cuenta de las alteraciones asociadas principalmente a la presencia de nubes. Esto parte del hecho de que la luminosidad reflejada medida por el satélite es aproximadamente proporcional a la cantidad de nubosidad. Finalmente el cálculo de la radiación solar en superficie resulta de la correlación del índice de claridad K_T y el índice de cobertura nubosa.

El modelo Heliosat fue propuesto originalmente por Cano (Cano *et al.* 1986). Posteriormente se modificó y se mejoró a través de diferentes versiones (Diabaté *et al.* 1988). Este modelo se ha utilizado especialmente con imágenes de satélite como un modelo empírico puro, y evolucionó incorporando parámetros físicos atmosféricos, como el factor de turbidez de Linke (ver anexo B), los parámetros de aerosol y otros absorbentes atmosféricos en las versiones de Heliosat 2 y la futura versión Heliosat-3 (Rigollier *et al.* 2002) (Hammer *et al.* 2003):

$$K_T = \frac{H}{H_{ext}} \quad (19)$$

$$K_T = a + b(1 - n_c) \quad (20)$$

Donde K_T se denomina el índice de claridad, y al combinarse con la expresión (15) se obtiene la expresión (20).

La idea es que la cantidad total de nubosidad establecida estadísticamente para una región específica determina la radiación solar en dicha área (Suárez, 2013). El parámetro central que utiliza este método es K_T , donde éste es proporcional a la razón entre la radiación incidente sobre la superficie H y la radiación solar extraterrestre H_{ext} que llega a la parte superior de la atmósfera (Olcoz, 2014).

Se asume que en este modelo existe una relación lineal entre el índice de claridad K_T en un punto (i, j) determinado y en un instante de tiempo con el índice de cobertura nubosa $n(i, j)$ (Suárez, 2013):

$$K_T(i, j) = a(i, j) + b(i, j)(1 - n_c(i, j)) \quad (21)$$

Los valores de $a(i, j)$ y $b(i, j)$ se encuentran comparando el índice de claridad y la radiación medida en superficie.

Por otro lado el índice de cobertura nubosa n_c se deriva de las imágenes de satélite a partir de la expresión (Suárez, 2013):

$$n_c(i, j, t) = \frac{\rho^t(i, j) - \rho_0(i, j)}{\rho_c - \rho_0(i, j)} \quad (22)$$

Donde $\rho^t(i, j)$ es el albedo aparente, observado por el sensor del satélite en un tiempo t , $\rho_0(i, j)$ es el albedo de la superficie terrestre, y ρ_c es el albedo de las nubes (Olcoz, 2014). Los valores de este índice se encuentran entre 0 y 1. Este valor puede interpretarse como la cobertura nubosa en cada pixel (Suárez, 2013). Analizando la expresión (22), cuando se tiene un día despejado ($\rho^t(i, j) = \rho_0(i, j)$) el valor de n_c es casi igual a cero. Cuando se tiene un día nublado ($\rho^t(i, j) = \rho_c$) el valor de n_c es casi igual a uno.

Es importante hacer la aclaración que hasta este punto sólo se utiliza el modelo estadístico Heliosat (expresión (22)). Las expresiones restantes de este método quedan fuera del alcance de este trabajo, debido a que el modelo Heliosat propone encontrar en términos de la masa del aire y del espesor óptico, la radiación solar en superficie (ver anexo B). Para nuestro caso esta información de radiación solar en superficie es suministrada directamente por la estación La Libertad.

6.2 Modelo físico

El modelo físico se basa en los procesos radiativos que se producen cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera, presentando de manera explícita las consideraciones físicas que dan lugar a intercambios de energía en el sistema Tierra atmósfera (Alvarez

et al. 2014). La principal dificultad que tiene este método es la necesidad de conocer los parámetros atmosféricos locales (Zarzalejo *et al.* 2006).

Cuando la energía solar atraviesa la atmósfera ocurre una transferencia radiativa que puede añadir o hacer perder energía a un rayo del sol, por medio de esparcimiento o absorción. Para presentar la ecuación de transferencia radiativa, es necesario definir los coeficientes de esparcimiento y absorción:

- El coeficiente de esparcimiento η se define como la energía esparcida por unidad de tiempo, por unidad de ángulo sólido y por unidad de volumen, por unidad de frecuencias.
- El coeficiente de extinción k que se define como la pérdida de energía mientras recorre una distancia, donde por convención se utiliza el signo positivo para hablar de pérdida de energía.

Se asume que estos absorbedores y esparcedores están distribuidos al azar y afectan la radiación cuando atraviesa la atmósfera por unidad de ángulo sólido. La ecuación de transferencia radiativa es el resultado de incorporar los efectos de esparcimiento y absorción de cómo varía la energía en términos de la intensidad al atravesar la atmósfera. Se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dI_\nu}{dz} = -k_\nu I_\nu + \eta_\nu \quad (23)$$

Donde I_ν es la intensidad correspondiente a la frecuencia ν , y los coeficientes k_ν y η_ν son dependientes de ν . La solución de esta ecuación implica considerar todo el espectro electromagnético de frecuencias, para lo cual se hace necesario una solución numérica (Zarzalejo *et al.* 2006).

Cuando se integra la expresión (23) para las longitudes de onda del espectro visible y teniendo en cuenta ciertas condiciones de supuestos que simplifican la matemática, se puede deducir una expresión similar a la (10) en función de n_c , y utilizando la expresión (13) se puede expresar una función de la heliofanía, es decir una que corresponde a la ecuación de Ångström-Prescott (Pelkowski, 2007).

7. Metodología

La metodología se presenta en cuatro componentes: El primero es la descripción de la zona de estudio donde se aplica la validación de la radiación solar en superficie. El segundo es la información a utilizar en el desarrollo de este trabajo. El tercero, son las herramientas implementadas para los cálculos de la radiación solar en el tope de la atmósfera, el número máximo de horas de brillo, y el *software* para el procesamiento de las imágenes de satélite para el cálculo del índice de nubosidad y brillo solar. El cuarto es el método de validación de la radiación solar en superficie calculada por el satélite tomando como referencia los registros radiométricos de la estación La Libertad.

7.1 Área de estudio

El área de estudio es la estación La Libertad debido a que es la única en la región de la Orinoquía que registra de manera simultánea la información de radiación solar en superficie y el brillo solar. Para nuestro caso servirá para validar la información de radiación solar en superficie que se obtenga a partir de las imágenes de satélite.

La estación La Libertad está ubicada en las coordenadas (4,06N, -73,47W) con una elevación de 336 msnm. La estación se encuentra al sureste de Colombia, con un régimen de lluvia bimodal, con un primer periodo de lluvias entre los meses de mayo y julio, y un segundo periodo de menor intensidad entre octubre y diciembre (ver figura 7). En los meses de diciembre hasta abril se presenta una temporada seca (ver figura 7). Esta climatología coincide con la presencia y ausencia de la ZCIT en su recorrido intertropical. Los valores de precipitación anual son del orden de los 2800 mm y se presentan con mayor frecuencia en horas de la tarde acompañados de nubosidad. La temperatura promedio oscila entre 22 y 26 °C. Por otro lado se tiene un valor promedio de 5 horas de brillo solar diarias para los diferentes meses del año, siendo enero y diciembre los meses con el mayor número de horas de brillo solar diarias y junio el mes con el menor número de horas de brillo solar diario (ver figura 8). Al observar las figuras 7 y 8 se evidencia en general una relación inversa entre los valores de precipitación y el número de horas de brillo solar, es decir, que cuando aumenta los valores de precipitación el número de horas de brillo solar disminuye y viceversa.

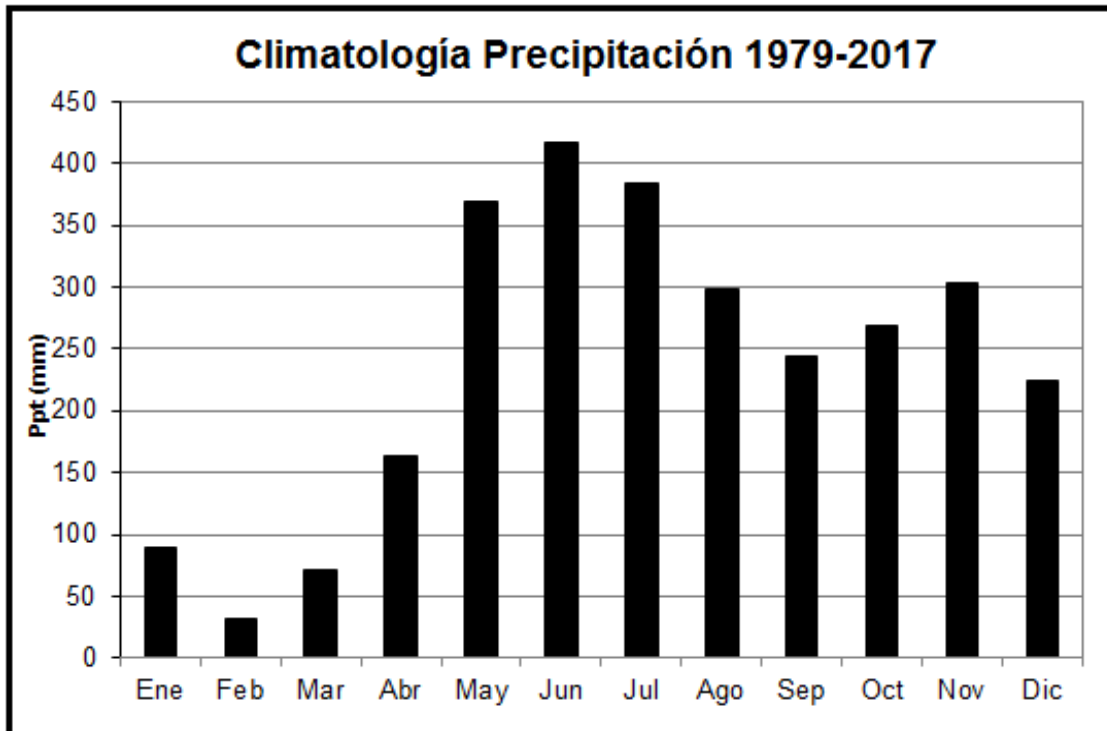


Figura 7: Climatología de la precipitación total mensual en la estación La Libertad (Periodo 1979-2017).

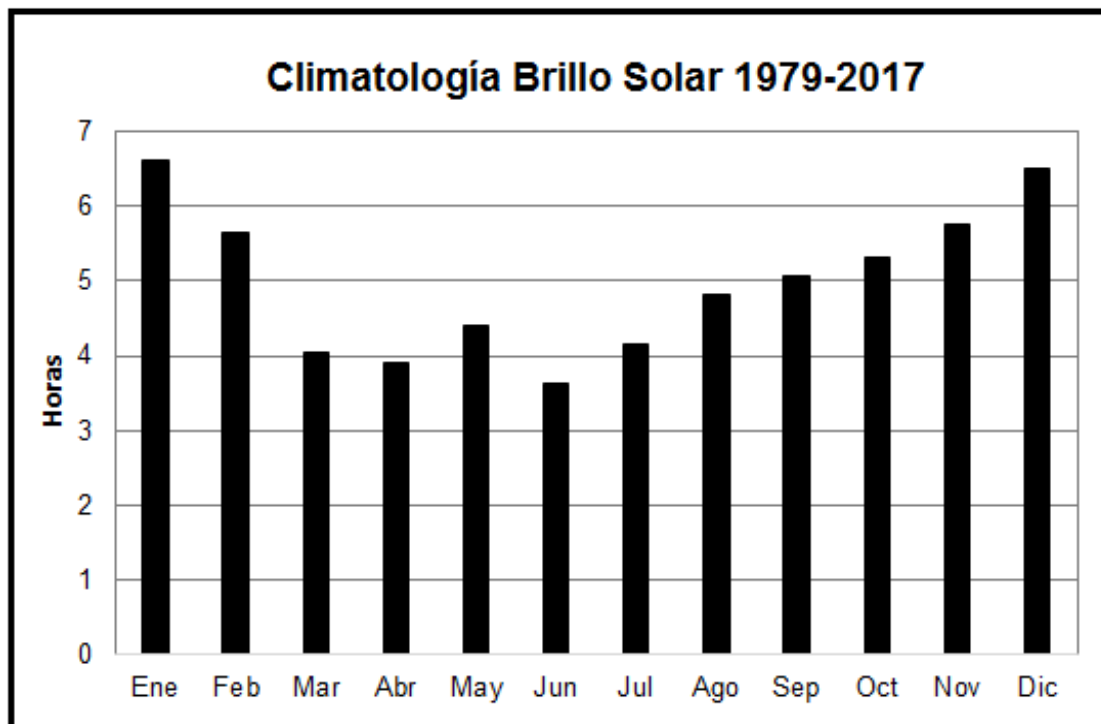


Figura 8: Climatología del brillo solar mensual en la estación La Libertad (Periodo 1979-2017).

7.2 Datos a utilizar

7.2.1 Información de estaciones

Para este trabajo se solicitaron los registros de estaciones de radiación solar en superficie y de brillo solar, para la región de la Orinoquía en el periodo de junio del año 2016 a mayo del año 2017. La información fue suministrada por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (ver tabla 1). Se recopiló información radiométrica de la siguiente forma: 1 estación con registros de radiación solar en superficie, 1 estación con registros de brillo solar y 1 estación con información simultánea de radiación global y brillo solar, para un total de 3 estaciones (ver tabla 1).

	Estación	Municipio	Departamento	Lat	Long	Elevación (m.s.n.m.)	Instrumento
1	La Libertad	Villavicencio	Meta	4,06	-73,47	336	Piranómetro y Heliógrafo
2	La Palomera	Puerto López	Meta	4,26	-72,56	188	Piranómetro
3	Hacienda Las Margaritas	Puerto López	Meta	4,33	-72,15	150	Heliógrafo

Tabla 1: Estaciones del Ideam (Fuente: Ideam)

La investigación se realizó teniendo en cuenta la información de la estación La Libertad para el periodo comprendido entre junio de 2016 hasta mayo de 2017. Esta información se complementó con la información de otras dos estaciones cercanas para el caso de datos faltantes. Para la información faltante de brillo solar en la estación La Libertad se utilizó la información de la estación Hacienda Las Margaritas. Para la información faltante de radiación solar en superficie en la estación La Libertad, se utilizó la información de la estación La Palomera, finalmente se utilizó el método de la media móvil para completar la información en la misma estación de la Libertad (ver anexo C). Los datos faltantes que se complementaron de brillo solar y radiación solar en superficie fueron del 4% y 6% respectivamente del periodo total de estudio.

En la figura 9 y en la tabla 1 se pueden observar las estaciones radiométricas utilizadas en el desarrollo de este trabajo.

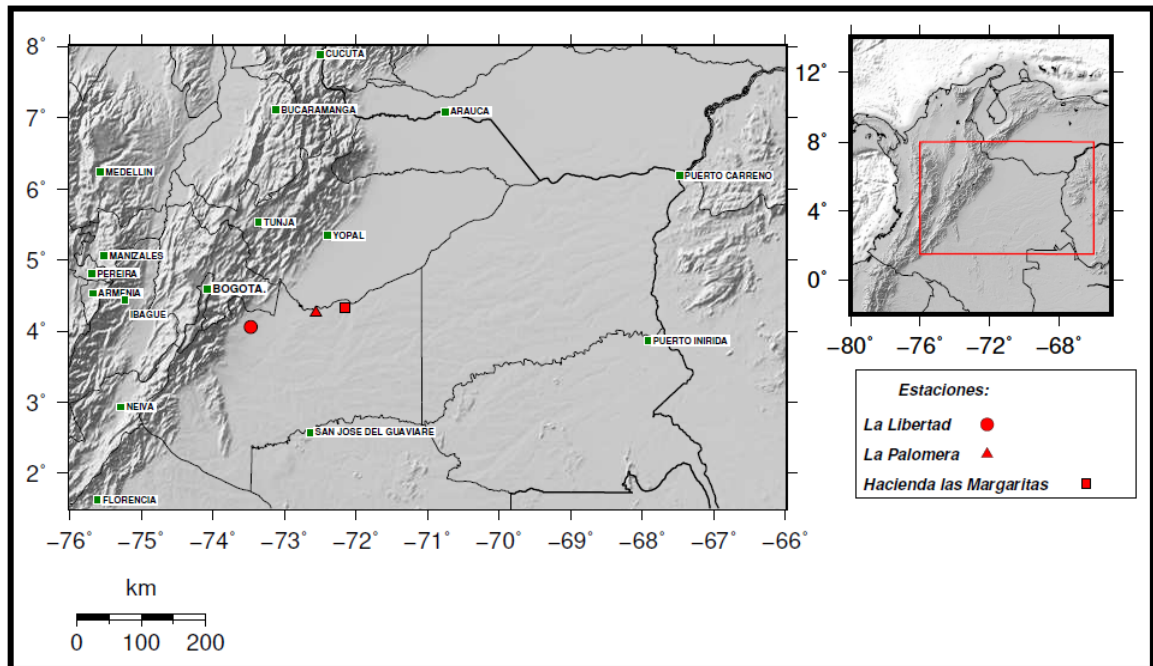


Figura 9: Estaciones radiométricas utilizadas para este trabajo en la región de la Orinoquía.

7.2.2 Información satelital

Para el caso de las imágenes de satélite se utilizó la información de la banda visible ($0,55 - 0,75\mu m$) del satélite geoestacionario GOES 13, entre junio de 2016 hasta mayo de 2017. Las áreas de las imágenes de satélite obtenidas contienen la ubicación de la estación de La Libertad.

Para este trabajo se utilizó la información disponible de imágenes de satélite GOES del canal visible, suministradas por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) (ver anexo D). Se utilizaron en promedio 15 imágenes diarias, para un total de 5500 imágenes para el periodo comprendido entre junio de 2016 a mayo de 2017. La información que se utilizó está comprendida entre las 5:00 y las 19:00 horas, cubriendo en gran parte la región de la Orinoquía.

7.3 Método a utilizar

7.3.1 Información estaciones radiométricas

La estación La Libertad nos proporciona los valores de H y n , donde H es la radiación solar en superficie acumulada para cada hora (Whm^{-2}) que al calcularse para todo el día se convierten en ($Whm^{-2}día^{-1}$), y n el número de horas de brillo solar para cada día.

Posterior a la obtención de las variables anteriores de manera diaria, se procede a calcular de manera teórica las radiaciones en el tope de la atmósfera H_{ext} y el número máximo de horas de brillo solar N para cada día. Con estas variables calculadas se realiza un ajuste de mínimos cuadrados a través de una regresión lineal entre los cocientes $\frac{H}{H_{ext}}$ y $\frac{n}{N}$ para encontrar los coeficientes a y b de Ångström-Prescott (ver expresión 10).

Calculo teórico de los valores de H_{ext} y de N

Para el cálculo de los valores H_{ext} y N se debe tener en cuenta que varían dependiendo la distancia Tierra-Sol, la posición angular de la Tierra en la órbita y la declinación del Sol (ver anexo E). La posición del sol se puede determinar a partir de geometría esférica y del teorema del coseno obteniendo la expresión (24) para encontrar el coseno del ángulo cenital (ver anexo F).

$$\cos \theta_0 = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \Lambda \quad (24)$$

Donde θ_0 es el ángulo cenital, ϕ la latitud geográfica del lugar, δ la declinación del sol y Λ la longitud geográfica del lugar. Esta expresión nos permite determinar el ángulo de incidencia de la luz solar sobre una superficie terrestre horizontal (Ideam & Upme, 2018). Cuando el ángulo cenital $\theta_0 = 0$ (esto ocurre justo cuando el sol se encuentra en el zenit), y dividiendo por $\cos \phi$ la expresión (24) se reduce a la expresión (26) que permite encontrar el valor del ángulo Λ , también llamado ángulo horario:

$$\cos \Lambda = -\tan \phi \tan \delta \quad (25)$$

$$\Lambda = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (26)$$

Para encontrar la duración del día en horas desde la salida hasta la puesta del sol, se duplica el ángulo horario y se divide entre 15 para pasar de grados a horas (Ideam & Upme, 2018):

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (27)$$

Para el cálculo de la radiación solar en el tope de la atmósfera instantánea se utiliza la siguiente expresión:

$$H_{ext} = I_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \cos \theta_z \quad (28)$$

Donde θ_z es el ángulo cenital en grados, r_0 es la distancia promedio de la Tierra al Sol y r es la distancia de la Tierra al Sol para cada día del año. Este cociente es conocido como factor de corrección por excentricidad de la órbita terrestre.

Al combinar la expresión (28) y la expresión (24) del coseno del ángulo cenital e integrando para todo el día se tiene la expresión (29) para la radiación solar en el tope de la atmosfera diaria (ver anexo G):

$$H_{ext} = \frac{24}{\pi} I_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \left(\cos \phi \cos \delta \sin \omega + \frac{2\pi \omega}{360^\circ} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (29)$$

Cálculos de los valores de H y de n

Los valores de H y n se obtienen de forma directa a partir de las mediciones de la estación La Libertad.

7.3.2 Información imágenes de satélite

Georreferenciación de las imágenes

Cada imagen del satélite se georreferencia utilizando el programa WTC (Weather and Climate Toolkit) (NOAA, 2019). Se ajustan las coordenadas geográficas del lugar, el tamaño y las dimensiones de los pixeles de la imagen. Para este trabajo se ajustan las dimensiones de cada pixel a 1 km de lado.

Cálculo del índice de nubosidad a partir de imágenes de satélite

La estimación de la radiación solar en superficie a partir de las imágenes de satélite se basa en el concepto de índice de nubosidad, debido a que es el factor más relevante en la atenuación de la radiación solar que incide en la superficie (Polo, 2010). Los satélites capturan imágenes en diversos rangos del espectro electromagnético, asignando a cada pixel de la imagen un nivel digital en relación a la energía reflejada o esparcida por la superficie terrestre. Estos niveles digitales se pueden convertir en diferentes variables físicas, como por ejemplo el índice de nubosidad.

Este índice de nubosidad se relaciona con el brillo solar medido a partir de una relación (ver expresión 13), donde la suma de estas dos variables debe ser igual a 1. Es decir, en un lugar con pocas horas de brillo solar se debe tener un índice de nubosidad cercano a 1, y en un lugar con bastantes horas de brillo solar se debe tener un índice de

nubosidad cercano a 0. Esta relación es una aproximación útil y práctica con un error que depende de cada estación.

Para calcular el índice de nubosidad se utilizan los niveles digitales de cada pixel de la imagen, en la columna y fila que corresponde a las coordenadas de ubicación de la estación La Libertad. Este cálculo se realiza para cada imagen en el periodo comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017. Se realiza un código en Python utilizando el paquete Jupyter, para convertir los valores digitales a valores de reflectancia (ver anexo H). Se utilizan los coeficientes de calibración del satélite GOES 13 sugeridos por el fabricante (NOAA, 2019), para los cálculos previos y posteriores al lanzamiento del satélite.

Para el cálculo de la reflectancia nominal previa al lanzamiento del satélite se utiliza la siguiente expresión:

$$R_{prev} = k(nd - 29) \quad (30)$$

Donde k es una constante propia de cada satélite GOES, nd es el nivel digital y el valor de 29 corresponde al mínimo nivel digital que registra el satélite. Para el satélite GOES 13 el valor de k es de 0,001160 (NOAA, 2019). Para encontrar la reflectancia posterior al lanzamiento del satélite o también denominada reflectancia nominal se utiliza la expresión:

$$R_{post} = CR_{prev} \quad (31)$$

Donde C es un factor de corrección que debe usarse teniendo en cuenta el mes del año. Finalmente se encuentra la reflectancia haciendo uso de la siguiente expresión:

$$R_p = \frac{R_{post} \cdot r^2}{\cos(\theta_z)} \quad (32)$$

Donde R_p es la reflectancia del pixel en un momento dado, r es la distancia de la Tierra al Sol y θ_z el ángulo cenital. Después de calcular los valores de reflectancia para cada imagen, se utiliza la expresión (33) para obtener el índice de nubosidad. La diferencia entre la expresiones (22) y (33) una en términos del albedo y la otra en términos de la reflectancia para el cálculo del índice de nubosidad y brillo solar, no es importante en este trabajo ya que se supone isotropía en el campo de radiación emitido en el tope de la atmosfera:

$$n_c = \frac{R_p - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} \quad (33)$$

Donde R_{min} es la reflectancia mínima asociada a condiciones de cielo despejado y R_{max} es la reflectancia máxima asociada a condiciones de cielo cubierto. La elección de los valores R_{max} y R_{min} son sensibles en el desempeño del modelo, por tal razón algunos estudios sugieren utilizar los valores originales de reflectancia R_{min} y utilizar el 80% de los valores de R_{max} (Laguarda *et al.* 2018).

Teniendo en cuenta esta sugerencia, se realizaron diferentes pruebas variando los parámetros de R_{max} y R_{min} . Se utilizó el método de mínimos cuadrados para comparar

los R^2 de regresiones lineales, polinómicas y de potencia para verificar cuál podría ser el más adecuado utilizar. Se pudo determinar que efectivamente la sugerencia de Laguarda *et al.* (2018) en cuanto a los porcentajes a utilizar de R_{max} y R_{min} presenta los mejores resultados (Ver anexo I). Calculados los valores de índice de nubosidad con la expresión (33), se promedian los valores horarios de cada día y se sustituyen en la expresión (14) para encontrar el brillo solar diario.

7.4 Validación de la estimación de la radiación solar en superficie

Como sólo se dispone de un año de información se debe realizar la selección de un semestre para calibrar el modelo y otro semestre para validar. Se proponen tres formas para seleccionar estos semestres.

La primera es buscar dos semestres con un promedio similar de horas de brillo solar. La segunda forma es buscar dos semestres en los cuales los coeficientes de Ångström-Prescott semestrales sean similares entre sí. La última forma es buscar dos semestres con promedios similares de precipitación total. Después de seleccionar los semestres para calibrar el modelo (semestre 1) y validar (semestre 2), se realizan los siguientes pasos:

Paso 1: Se realiza una regresión lineal entre los valores de brillo solar diarios obtenidos por la estación y los obtenidos a partir de las imágenes de satélite de acuerdo con la metodología presentada en el capítulo 7 (numeral 7.3.1 y 7.3.2).

Paso 2: Se calculan los coeficientes de Ångström-Prescott para el semestre 1, a partir de los valores de n y H de la estación La Libertad.

Para validar el modelo se realizan los siguientes pasos:

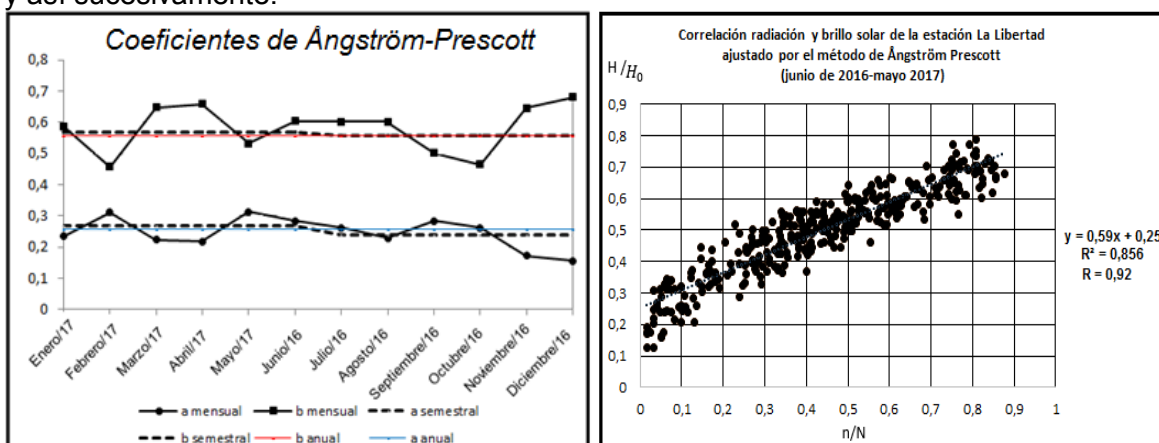
Paso 3: utilizando los coeficientes de regresión del paso 1 y los coeficientes de Ångström-Prescott del paso 2, se realiza el cálculo de la radiación solar en superficie a partir de las imágenes de satélite para los meses del semestre 2.

Paso 4: Se validan los valores de radiación solar en superficie obtenidos en el paso 3 utilizando las imágenes de satélite, tomando como referencia los valores correspondientes medidos en la estación La Libertad.

8 Resultados y análisis

Información radiométrica en superficie

Los registros obtenidos a partir de la información radiométrica de la estación La Libertad permiten encontrar los coeficientes de Ångström-Prescott forma mensual, semestral y anual, para el periodo comprendido entre junio de 2016 a mayo de 2017. Para encontrar los coeficientes a y b de Ångström-Prescott se utiliza la información diaria de radiación solar en superficie H y el número de horas de brillo solar n que registra la estación. De igual forma se utiliza la información diaria de los cálculos teóricos de la radiación solar en el tope de la atmósfera H_{ext} y el número máximo de horas de brillo solar N (ver sección 7.3.1 de la metodología). Después de tener estas variables para cada día, se realiza una regresión lineal entre los cocientes $\frac{H}{H_{ext}}$ y $\frac{n}{N}$ dependiendo del periodo de tiempo para el cual se requiera encontrar estos coeficientes. Es decir, si se desea encontrar los coeficientes mensuales se debe realizar esta regresión utilizando los valores diarios de estos cocientes durante un mes. Si se necesitan los coeficientes semestrales, se realiza la regresión utilizando los valores diarios durante un semestre, y así sucesivamente.



10(a)

10(b)

Figura 10: Coeficientes a y b de Ångström-Prescott calculados de forma mensual, semestral y anual para el periodo de estudio comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017 10(a). Correlación entre la radiación y el brillo solar de la estación La Libertad para el periodo de estudio comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017 10(b).

A partir de la figura 10(a) se puede observar que el coeficiente b , que es la pendiente de la relación lineal propuesta por Ångström-Prescott (ver expresión 10) oscila mensualmente entre 0,456 y 0,681, con un valor semestral y anual aproximado de 0,567. Para el caso del coeficiente a , que es el punto de intersección con el eje y , se puede observar que mensualmente varía entre 0,155 y 0,311. El valor semestral de a varía entre 0,237 y 0,267, y el valor anual es de 0,257. Estas fluctuaciones en los coeficientes se deben a factores propios de cada lugar, como la transparencia de la atmósfera, la

nubosidad, las propiedades ópticas entre otros (Pelkowski, 2009). En la figura 10(b) se puede observar la correlación entre las variables de radiación y brillo solar para el periodo de estudio, el cual presenta un ajuste lineal R^2 igual a 0,85.

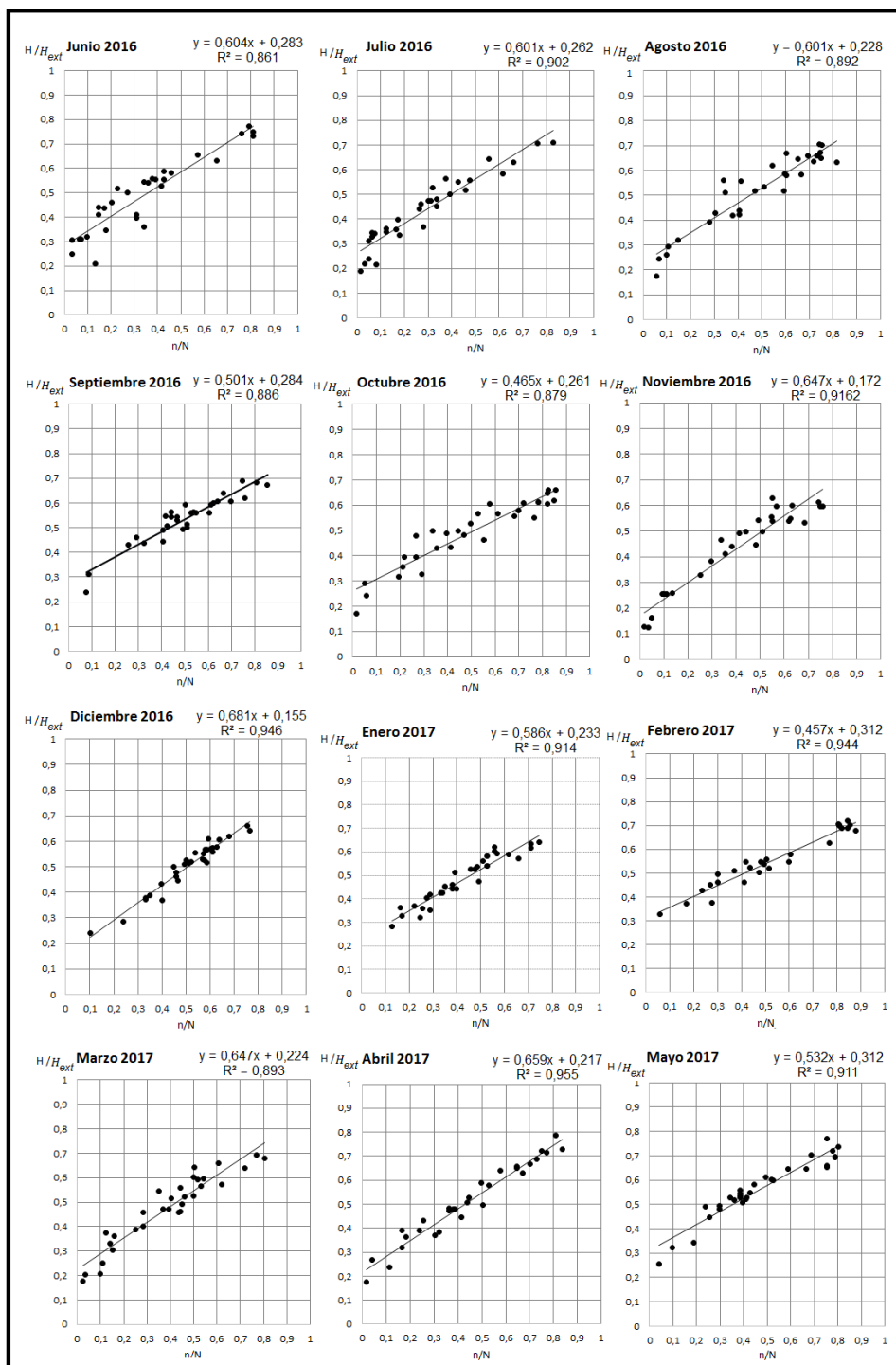


Figura 11: Regresiones mensuales entre H/H_{ext} y n/N para el periodo comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017 que permiten apreciar los coeficientes mensuales a y b de Ångström-Prescott para la estación La Libertad.

En la figura 11 se observan los coeficientes mensuales a y b de Ångström-Prescott, y los ajustes respectivos de R^2 para el periodo comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017 en la estación La Libertad. Se puede observar en general un ajuste lineal con valores de R^2 mayores a 0,86 para los diferentes meses.

En el mes de diciembre se presenta la mayor pendiente, entonces para los días despejados en este mes, se tiene un 83% de radiación solar en superficie del valor de H_{ext} . Para días opacos o nublados solo se tendría un 15% del valor de H_{ext} y estaría asociado a radiación solar por esparcimiento (ver sección 5 explicación del sentido físico de los coeficientes de Ångström-Prescott). Este resultado se puede explicar a partir de la climatología del lugar, donde en el mes de diciembre se tiene que el número de horas diarias de brillo solar es cercano a las 7 horas (uno de los meses con más horas de brillo solar) y el promedio total de precipitación mensual es de 225 mm (superior al promedio mensual de precipitaciones) (ver figura 7 y 8). Esto se podría explicar a partir de nubes que generen altas precipitaciones en tiempos muy cortos y que desaparecen rápidamente.

En el mes de junio se tiene que para los días despejados la radiación solar que llega a la superficie es un 88% del valor de H_{ext} y para días nublados solo un 28% del valor de H_{ext} en superficie, y estaría asociado a radiación solar por esparcimiento (ver figura 11). Este mes se caracteriza por ser uno de los más lluviosos del año (ver figura 8). Debido a esto se podría pensar que se presentan nubes permanentes que generan altas precipitaciones, que hacen que disminuya el número de horas de brillo solar (ver figura 7).

En general el uso de estos coeficientes de Ångström-Prescott, hace posible estimar los valores de radiación solar en superficie, a partir de métodos estadísticos de interpolación. Estos coeficientes son válidos para estaciones cercanas, con orografías y altitudes sobre el nivel del mar similares (Ideam & Upme, 2018). Sin embargo, los valores de estos coeficientes varían por factores atmosféricos como la cantidad y el tipo de nubes, la época del año, la altitud del lugar, la reflectancia del suelo entre otros (Akinoglu, 2008). Se recomienda calcular estos coeficientes de Ångström-Prescott, en estaciones radiométricas que registren de manera simultánea los valores de número de horas de brillo solar y de radiación solar en superficie (NOAA, 2019).

Información Satelital

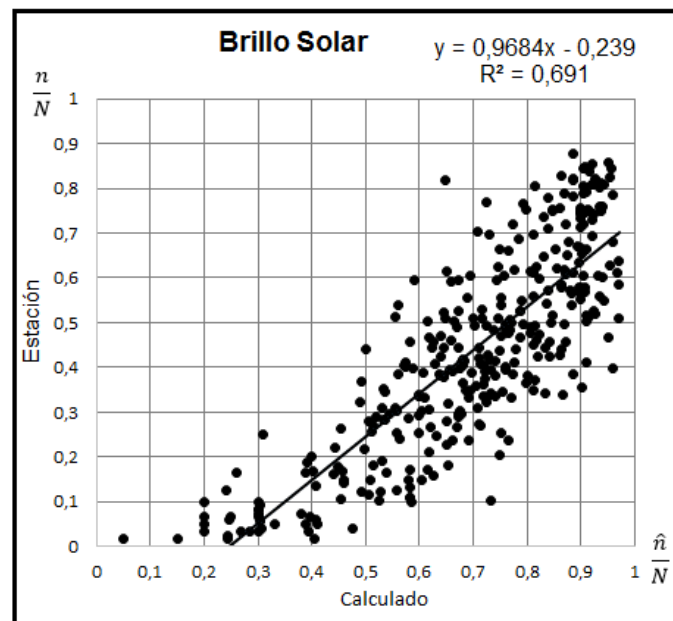


Figura 12: Regresión entre el brillo solar registrado por la estación La Libertad y el calculado a partir de las imágenes de satélite para el periodo comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017.

En la figura 12 se observa la regresión entre el brillo solar registrado por la estación La Libertad y el calculado por el satélite para el periodo comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017. Se evidencia que la pendiente de la expresión que se obtiene de la regresión es cercana a 1, con un ajuste de R^2 igual a 0,69. Por otro lado no pasa por el origen, es decir, se debe realizar una corrección de $-0,24$. Esta expresión ajusta los valores de brillo solar obtenidos a partir del satélite, permitiendo obtener información de brillo solar en lugares desprovistos de estaciones radiométricas.

En la figura 13 se muestra la gráfica entre el brillo solar diario que registra la estación y el calculado por el satélite para el periodo comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017 en la estación La Libertad. Se observa que en la mayoría de meses existe una similitud en la forma y un desfase en el cual el satélite tiende a sobreestimar el valor del brillo solar que registra la estación.

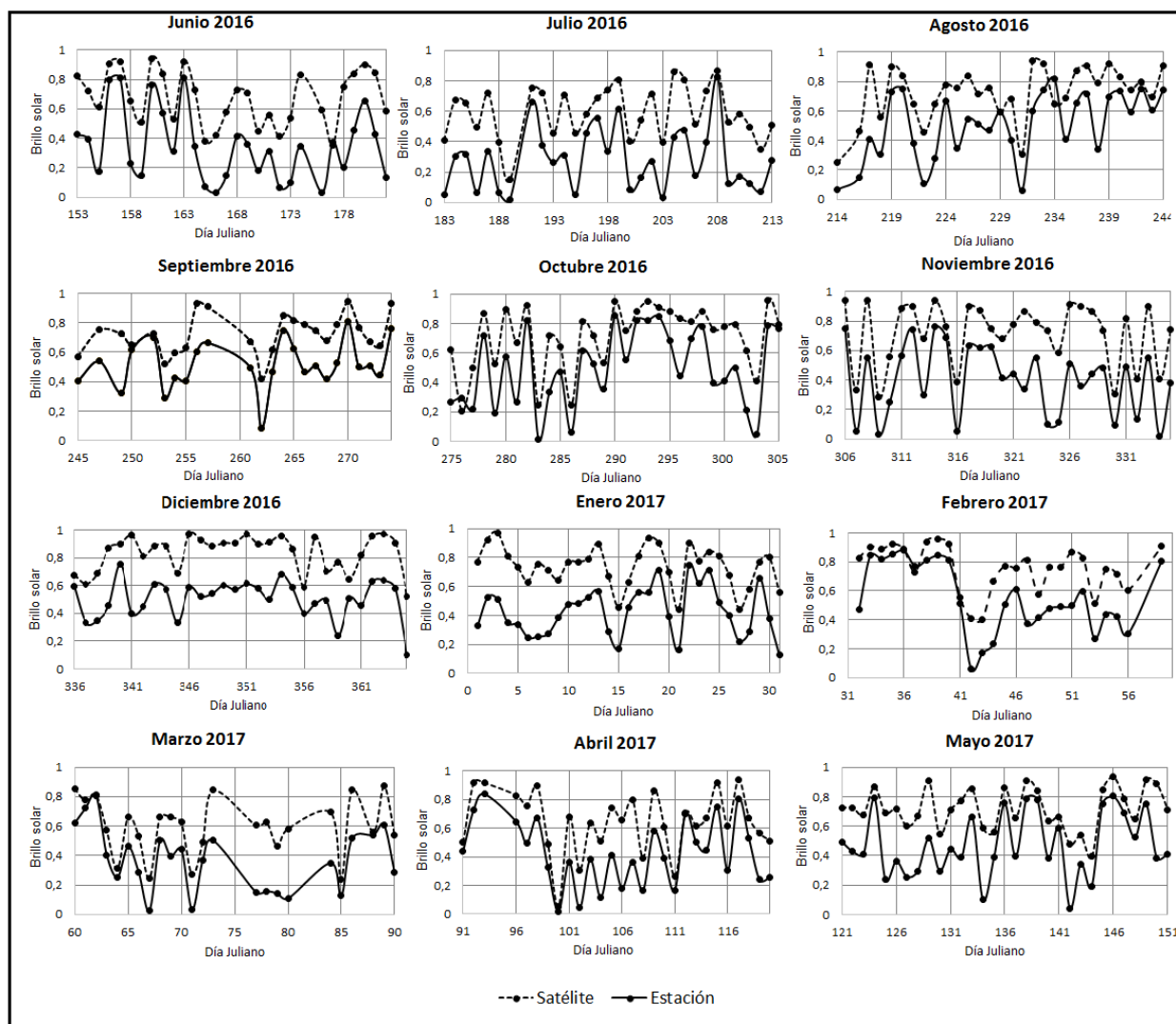


Figura 13: Brillo solar diario calculado a partir de las imágenes de satélite y por la estación La libertad para el periodo comprendido entre junio de 2016 a mayo de 2017.

En la figura 14 se muestra la regresión entre el brillo solar diario para cada mes que registra la estación, y el calculado por el satélite para el periodo comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017 en la estación La Libertad. Se encuentra que las pendientes para el periodo de estudio varían entre 0,719 y 1,260, mostrando que la razón de cambio entre los valores de brillo solar calculado por la estación y el calculado a partir de las imágenes de satélite son cercanas 1. Sin embargo se debe efectuar un ajuste de corrimiento en el eje x para los diferentes meses debido a que los registros de brillo solar obtenidos a partir de las imágenes de satélite no pasan por el origen.

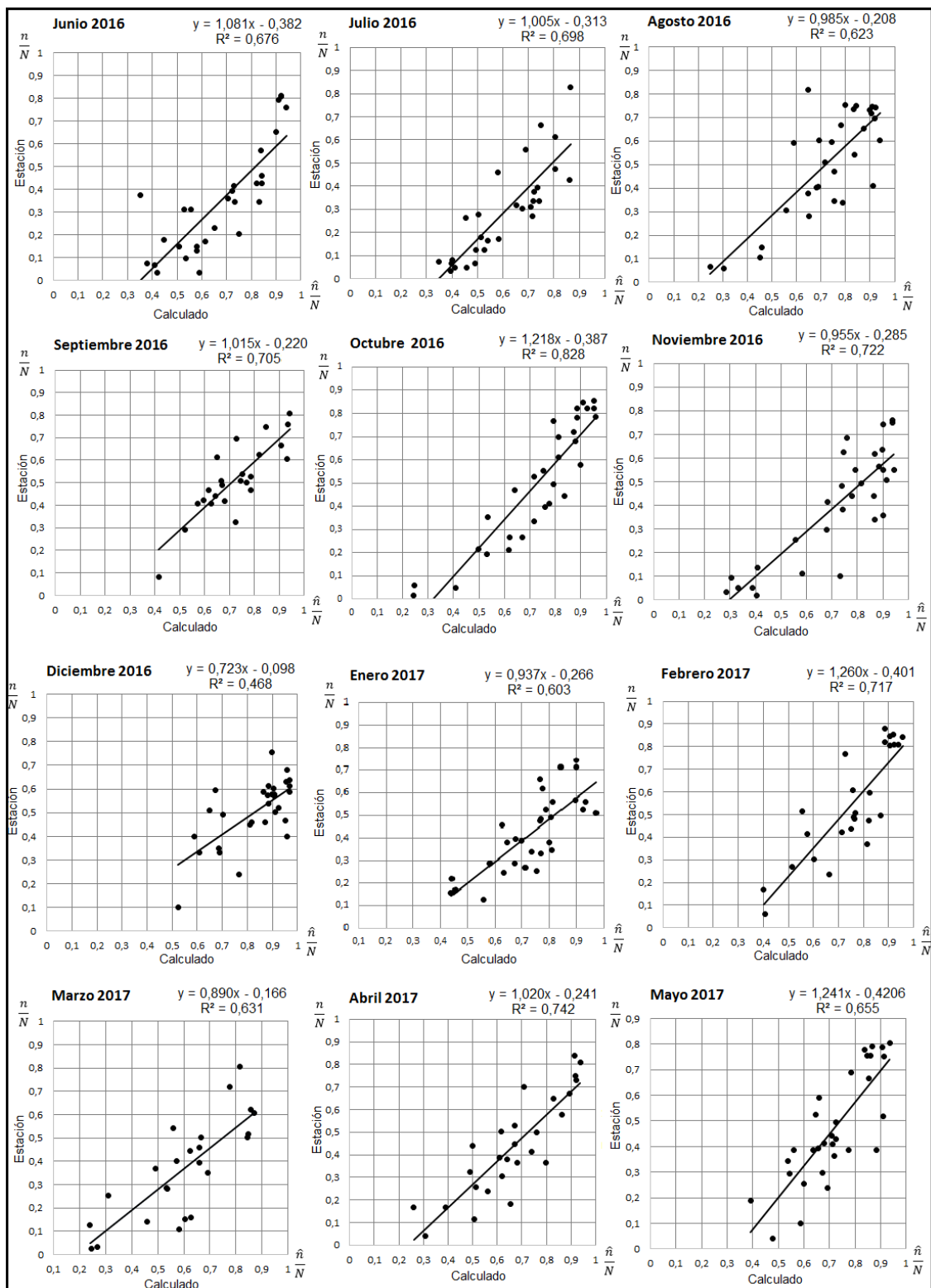


Figura 14: Regresión entre el brillo solar diario calculado por la estación La Libertad y el calculado por el satélite para el periodo comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017.

Validación

Para validar la radiación solar en superficie a partir de las imágenes de satélite, se efectúan las tres formas propuestas en la metodología para la elección de los semestres para calibrar y validar el modelo. La idea es buscar dos semestres en los cuales sean muy similares los coeficientes de Ångström-Prescott, las horas en promedio semestral de brillo solar y los promedios totales semestrales de precipitación acumulado. Dos de las formas propuestas coinciden en la selección de los semestres las cuales son: el promedio de horas de brillo solar y los coeficientes similares semestrales de Ångström-Prescott. Bajo estos dos criterios, el semestre propuesto para calibrar (semestre 1) es desde junio de 2016 a noviembre de 2016 y el semestre para validar (semestre 2) es desde diciembre de 2016 a mayo de 2017 (ver figuras 15 y 16).

Para el caso de la información de brillo solar el semestre 1 tiene un promedio de 4,8 horas diarias de brillo solar y el semestre 2 un promedio de 5,2 horas (ver figura 15). Para el caso de los coeficientes a y b varían 3,1% y 5,7% respectivamente comparando los semestres 1 y 2 (ver figura 16).

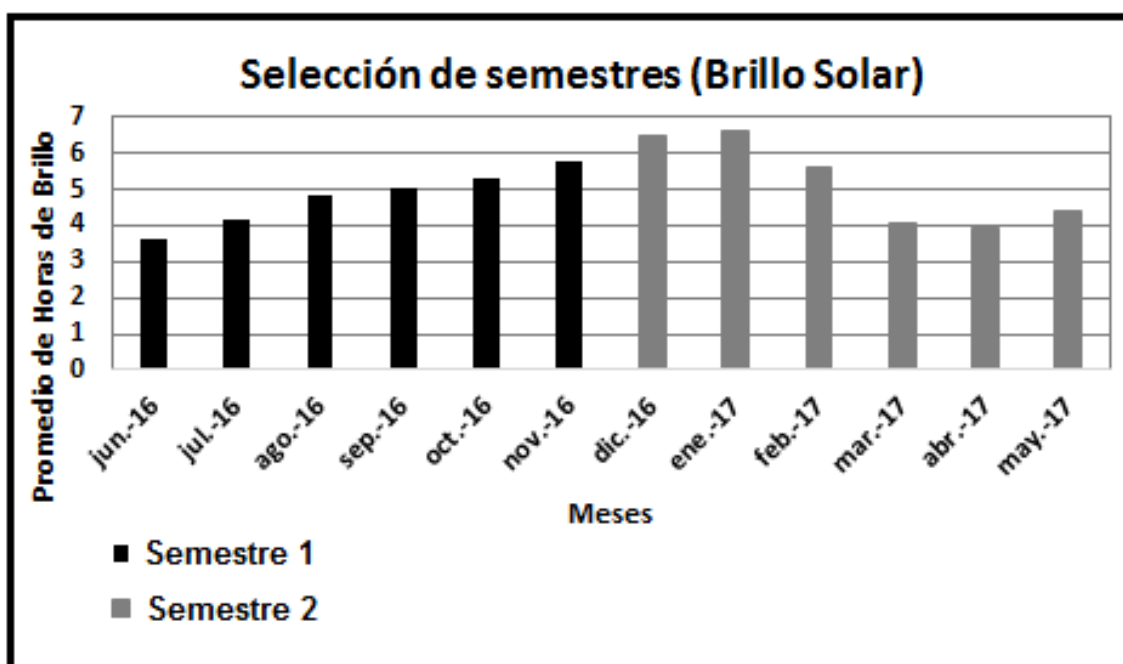


Figura 15: Selección de semestres para calibrar y validar el modelo a partir de la información de brillo solar para la estación La Libertad.

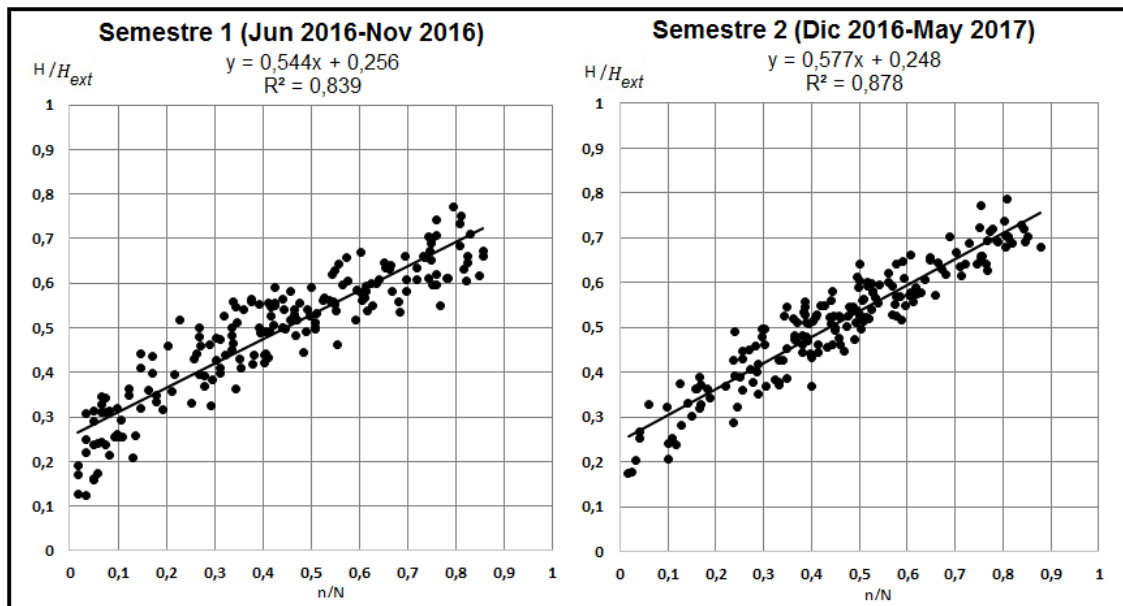


Figura 16: Selección de semestres para calibrar y validar el modelo a partir de los coeficientes de Ångström-Prescott.

Se realiza la calibración del modelo a partir de los datos del semestre 1 descritos en los pasos 1 y 2 de la metodología, y con las expresiones obtenidas de estos pasos se valida los datos del semestre 2 utilizando los pasos 3 y 4 descritos en la metodología.

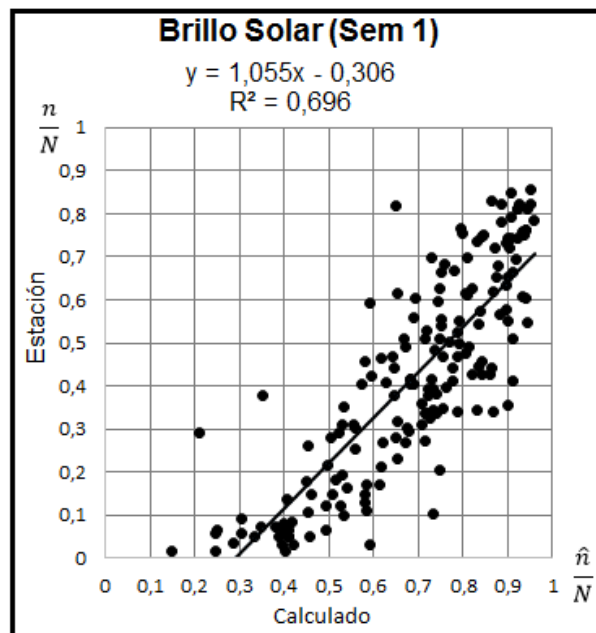


Figura 17: Regresión entre el brillo solar diario registrado por la estación La Libertad y el calculado por las imágenes de satélite para el semestre 1 (semestre de calibración).

En la figura 17 se muestra la regresión diaria del brillo solar registrado por la estación La Libertad y el brillo calculado por las imágenes de satélite para el semestre 1. Se evidencia una pendiente cercana a 1 con un valor de R^2 igual a 0,69. Este es un buen

ajuste si se tiene en cuenta que los valores de brillo solar que se obtienen provienen de una medida indirecta e independiente. Esto significa que la expresión que se obtiene explica en un 69% la variabilidad diaria semestral entre una variable y la otra. Este es un buen acercamiento teniendo en cuenta que se está encontrando los valores de brillo solar diarios de una manera indirecta haciendo uso de las imágenes de satélite.

Para el caso de los coeficientes de Ångström-Prescott del semestre 1 presentan un valor de R^2 mayor a 0,83 (ver figura 16). Con las expresiones que se obtienen de las figuras 16 y 17 se calibran los valores obtenidos de brillo solar a partir del satélite para estimar la radiación solar en superficie para el semestre 2.

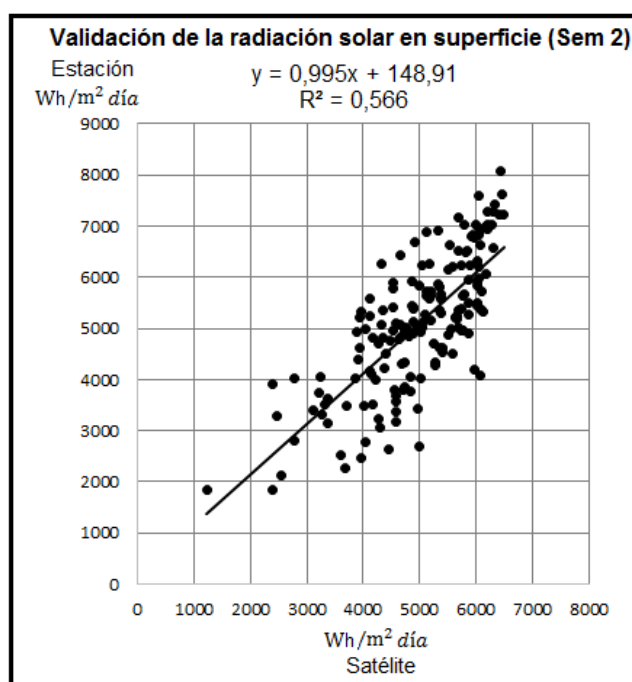


Figura 18: Regresión lineal entre la radiación solar diaria en superficie registrada por la estación, y la calculada a partir de las imágenes de satélite para el semestre 2 (semestre de validación).

En la figura 18 se observa la regresión entre la radiación solar en superficie diaria que registra la estación y la calculada a partir de las imágenes de satélite. La expresión que se obtiene de esta regresión lineal tiene una pendiente cercana a 1 con un valor R^2 de 0,56. Semestralmente la expresión que se obtiene explica en un 56% la variabilidad diaria. El valor de R^2 que se obtiene al compararlos con una medida directa y puntual como la estación sería en principio un buen acercamiento. Por otro lado se debe tener en cuenta que los niveles digitales de las imágenes de satélite para el cálculo del brillo solar, son el resultado de un promedio de un pixel de dimensiones de un cuadrado de 1km de lado.

Las correlaciones de los valores de radiación solar en superficie diaria registrados por la estación La Libertad, y los calculados por las imágenes de satélite para los diferentes meses del semestre 2 (semestre de validación), presentan valores de R^2 mayores a 0,6

a excepción del mes de diciembre de 2016 donde disminuye a 0,4 (ver figura 19). En este mes en particular se presenta un promedio diario de 7 horas de brillo solar acompañado de precipitaciones totales mensuales cercanas a los 250 mm (ver figura 7 y 8). Se podría pensar que la nubosidad o el tipo de nubes que se dan generan fuertes precipitaciones en tiempos muy cortos, donde la presencia de estas nubes aumenta los valores en el cálculo del brillo solar y por consiguiente los valores de la radiación solar en superficie. Esto podría ser el efecto del promedio de las dimensiones del pixel en las imágenes de satélite y al tipo de nubes que se encuentran dentro de este promedio.

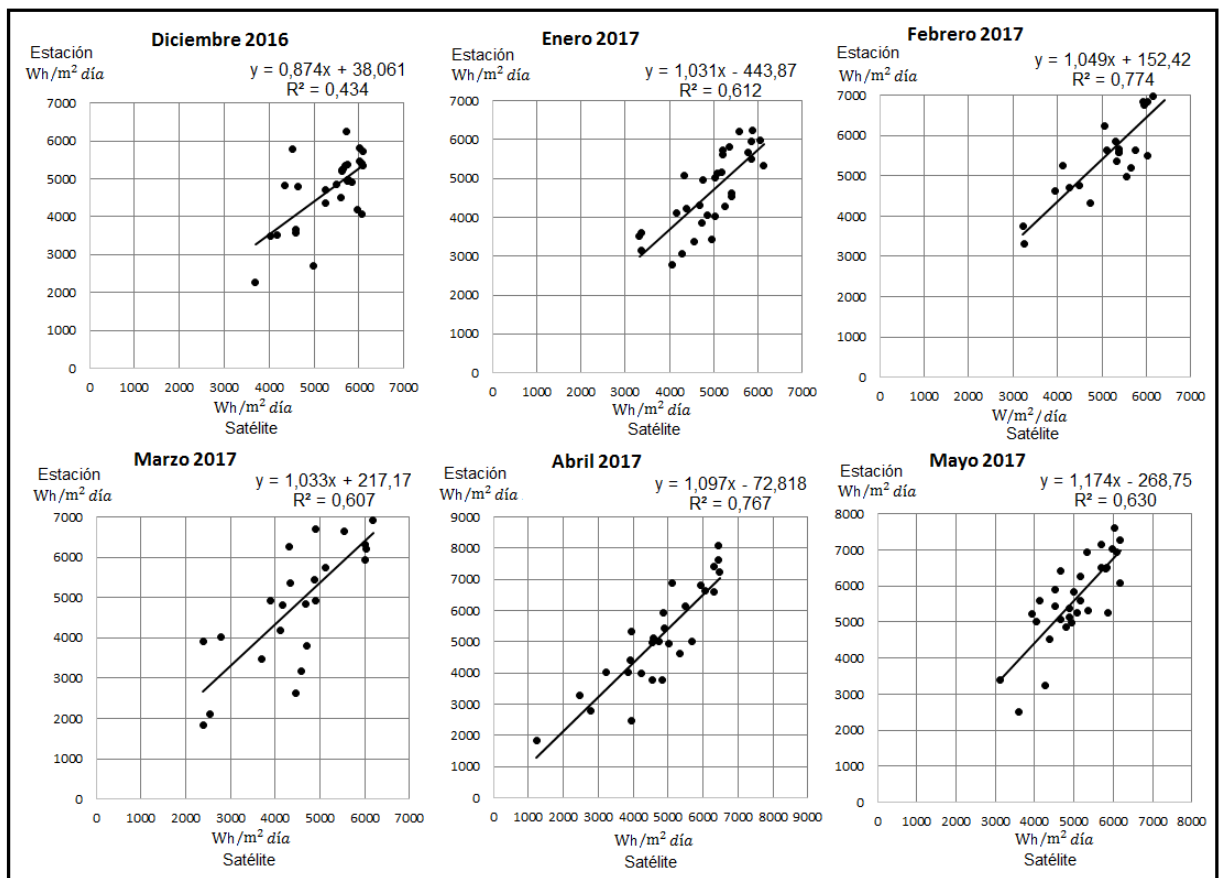


Figura 19: Regresión entre la radiación solar en superficie diaria mensual registrada por la estación y la calculada por las imágenes de satélite para el semestre 2 (semestre de validación).

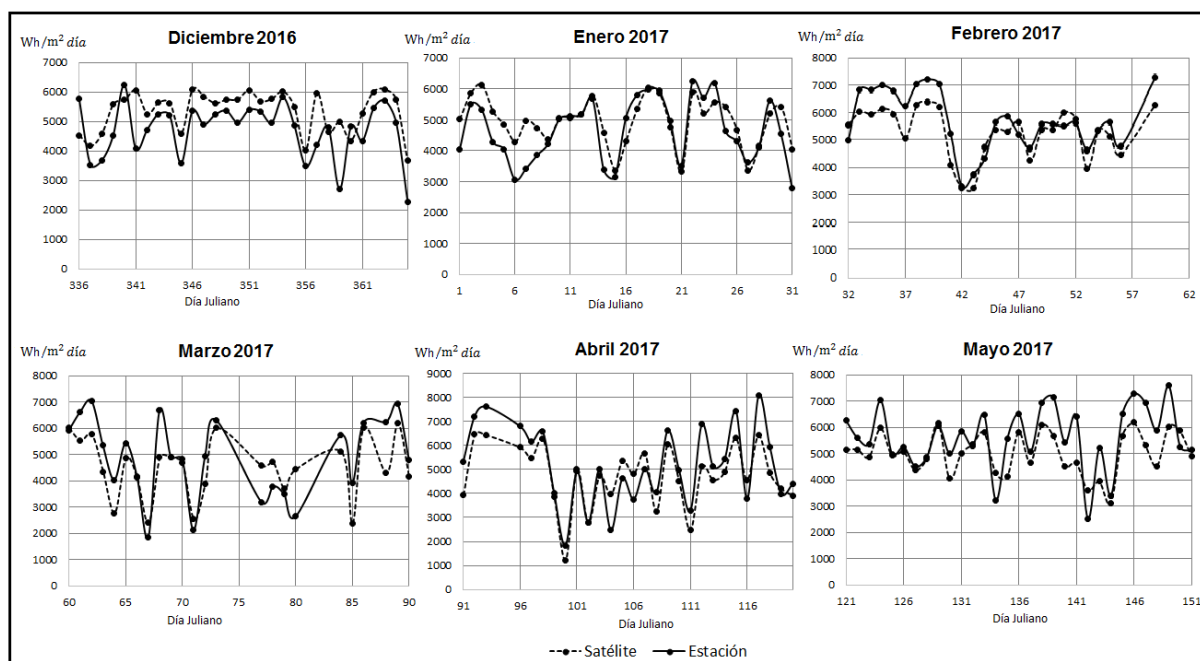


Figura 20: Radiación solar en superficie diaria mensual calculado a partir de las imágenes de satélite y la registrada por la estación La Libertad para semestre 2, (semestre de validación).

En la figura 20 se evidencia correspondencia y similitud entre la radiación registrada por la estación y la calculada por las imágenes de satélite. En general cuando se estima la radiación solar en superficie a partir de las imágenes de satélite los resultados que se obtienen tienden a subestimar los valores que registra la estación. Sin embargo, para el mes de diciembre y para algunos días de enero el satélite sobrestima la radiación solar en superficie debido a la presencia de nubes que generan alteraciones en los niveles digitales de la imagen, lo cual se evidencia en el ajuste de la regresión de la figura 19.

Al validar los promedios de radiación solar en superficie mensual y semestral se puede observar que para los promedios mensuales de dic-2016 y ene-2017 el satélite sobrestima los valores de radiación solar en superficie registrados por la estación La Libertad en un 13% y 6 % respectivamente. La tendencia a sobrestimar la radiación solar en superficie podría estar asociada a la presencia de nubes que estarían aumentando los valores de los niveles digitales en la imagen satelital (ver figura 21). Para los meses de febrero a mayo de 2017 el satélite subestima en un 8% los valores de radiación solar en superficie comparados con los registros de la estación (ver imagen 21).

Estos valores son similares a los obtenidos por Gautier *et al.* (1980), Polo (2010) y Suárez *et al.* (2014) en los promedios mensuales para días despejados. Para los meses nublados como el mes de mayo, se reduce el porcentaje de subestimación del satélite comparado con el 15% calculado por Gautier *et al.* (1980). Se mejoran los porcentajes de sobrestimación mensual comparados con el 20% en los valores mensuales obtenidos por Doncel (2018)

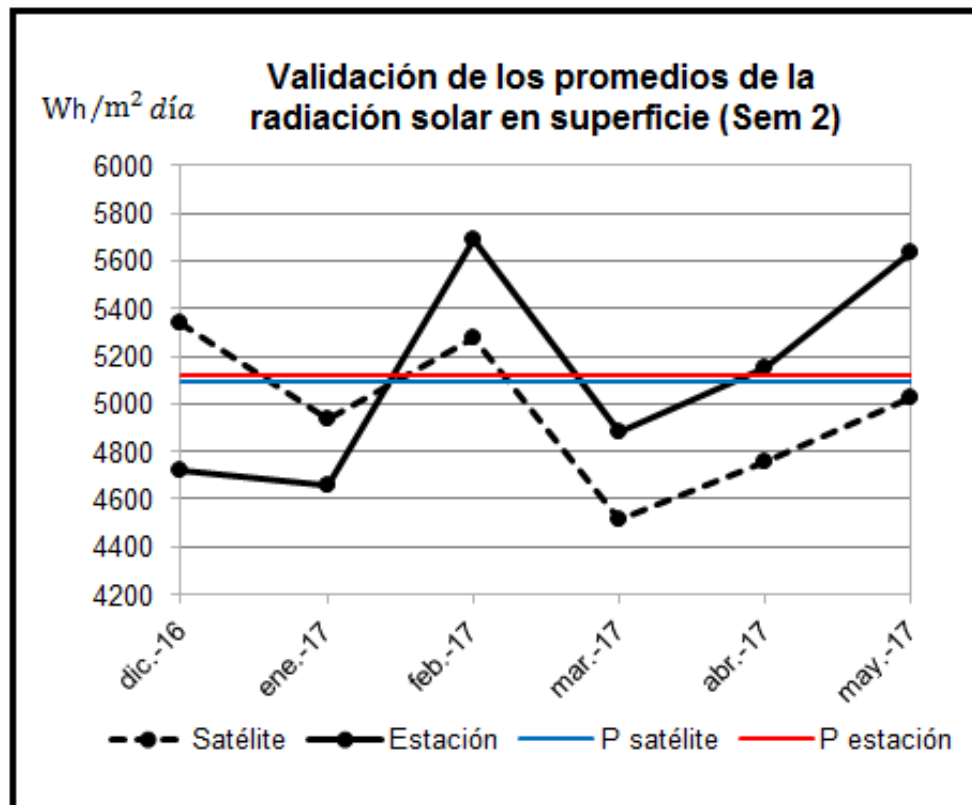


Figura 21: Promedios de la radiación solar en superficie mensual y semestral registrada por la estación La Libertad y la calculada por las imágenes de satélite para el semestre 2 (semestre de validación).

El valor promedio semestral de la radiación solar en superficie que se obtiene a partir del satélite, subestima en tan solo un 2,460 % el valor promedio semestral que registra la estación. Se puede observar que se compensan los promedios mensuales y el error que se obtiene es un valor pequeño (ver figura 21).

Validación a partir de la climatología de precipitación:

Recordando que en la metodología se describió una tercera forma de seleccionar los semestres de calibrar y validar el modelo, se repite el mismo procedimiento de los pasos 1, 2, 3 y 4 de la metodología con una nueva selección de semestres, a partir de los promedios totales semestrales de precipitación. Los nuevos semestres de calibración y validación los llamaremos 1a y 2a respectivamente (ver figura 22). Los promedios de precipitación total semestral en promedio que se tienen son de 1430 mm.

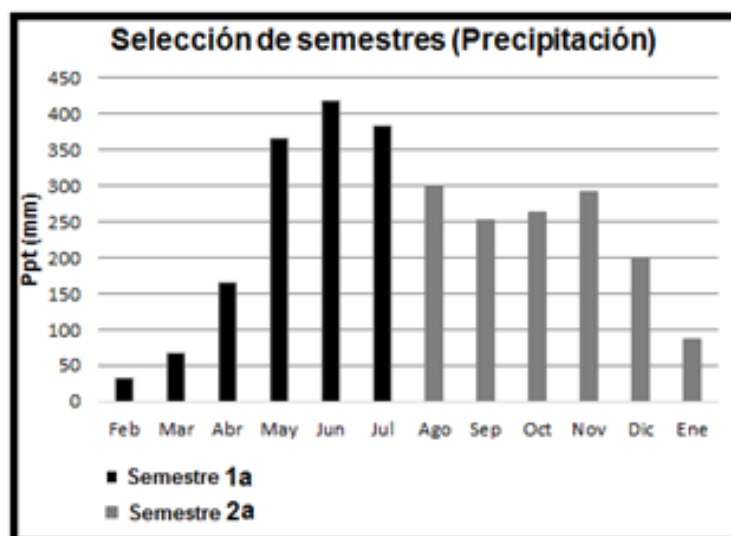


Figura 22: Grafica de selección de semestres para calibrar y validar el modelo a partir de la precipitación total semestral.

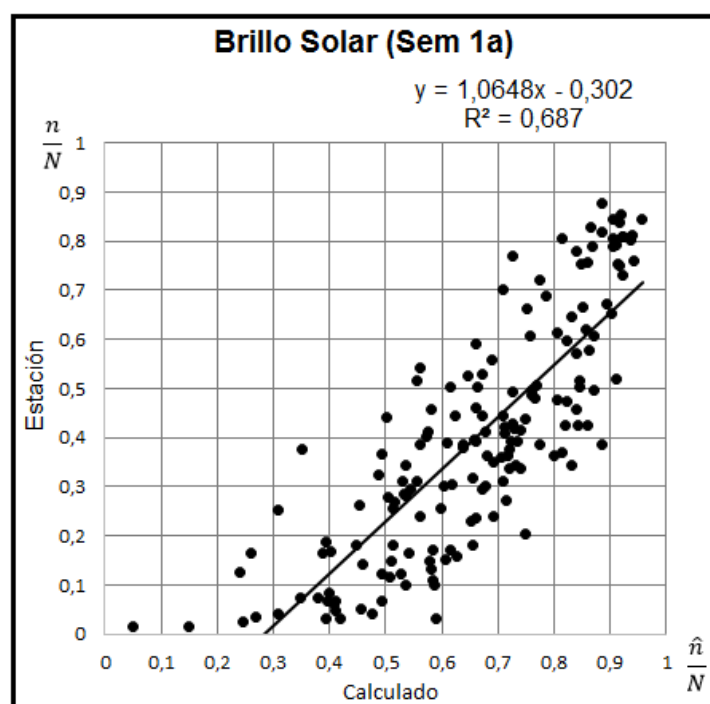


Figura 23: Regresión entre los valores de brillo solar diarios registrados por la estación La Libertad y los calculados a partir de las imágenes de satélite para el semestre 1a (semestre de calibración).

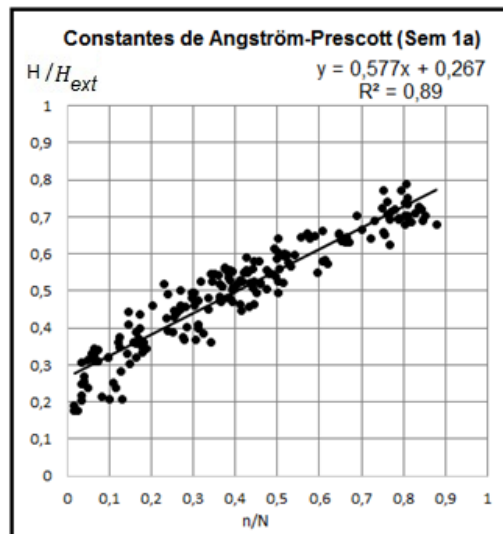


Figura 24: Coeficientes de Ångström-Prescott para el semestre 1a (semestre de calibración).

En la figura 23 se muestra la regresión entre el brillo solar registrado por la estación La Libertad y el calculado por las imágenes de satélite para el semestre 1a (semestre de calibración del modelo). Es decir, el paso 1 de la metodología. La pendiente es cercana a 1 y el valor del ajuste de R^2 es de 0,687.

En la figura 24 se muestra el valor de los coeficientes de Ångström-Prescott para el semestre 1a (semestre de calibración del modelo). Es decir, el paso 2 de la metodología. El valor del ajuste de R^2 es de 0,89.

En la figura 25 se muestra la regresión entre los valores de radiación solar en superficie registrados por la estación y los calculados por las imágenes de satélite. La pendiente de la expresión que se tiene es cercana a 1 y el valor de R^2 es de 0,673.

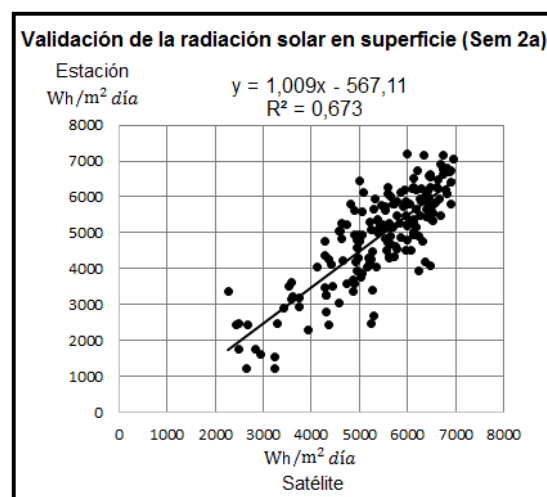


Figura 25: Regresión lineal entre la radiación solar en superficie diaria registrada por la estación La Libertad, y la calculada a partir de las imágenes de satélite para el Semestre 2a (semestre de validación).

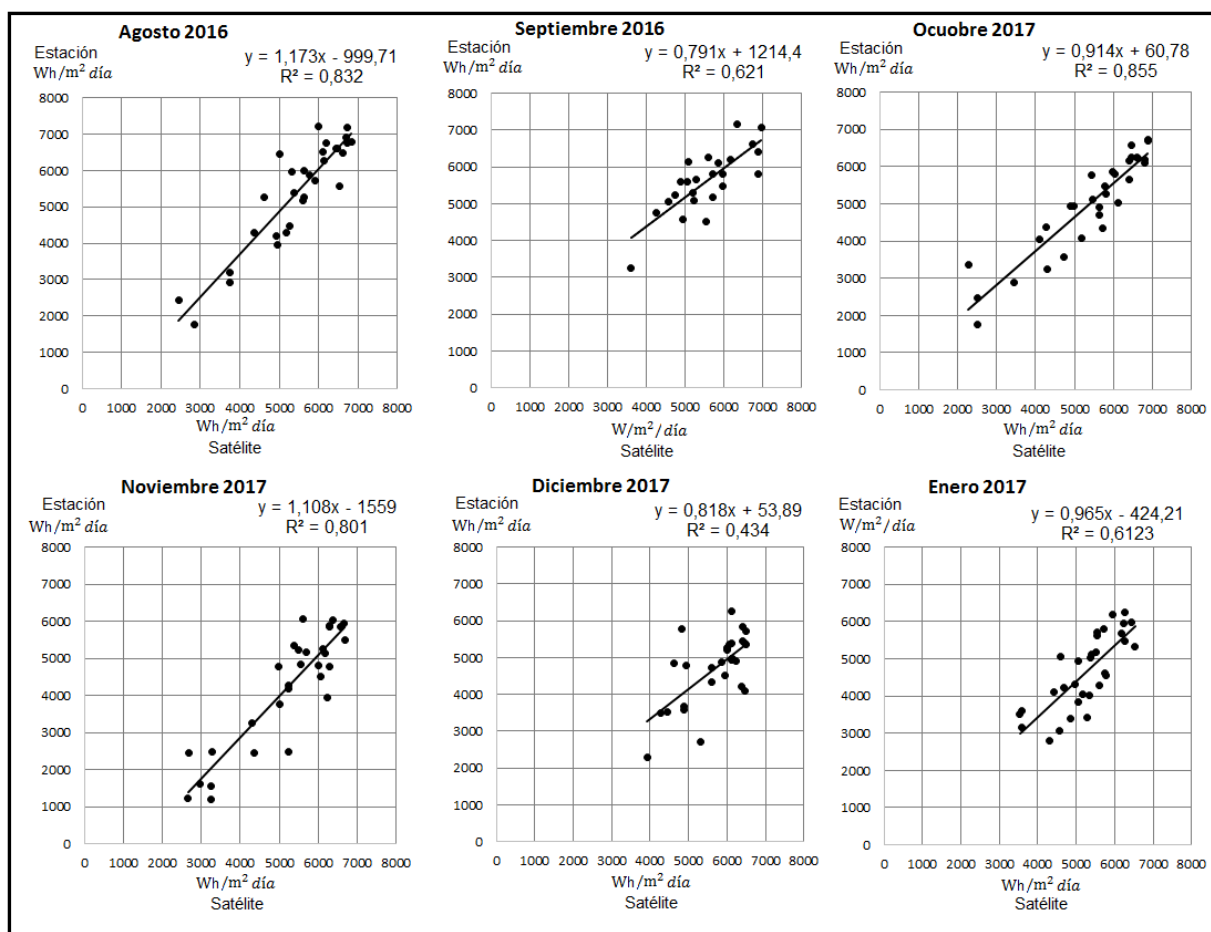


Figura 26: Regresión mensual diaria entre la radiación solar en superficie calculada por la estación La Libertad y por las imágenes de satélite para el semestre 2a (semestre de validación).

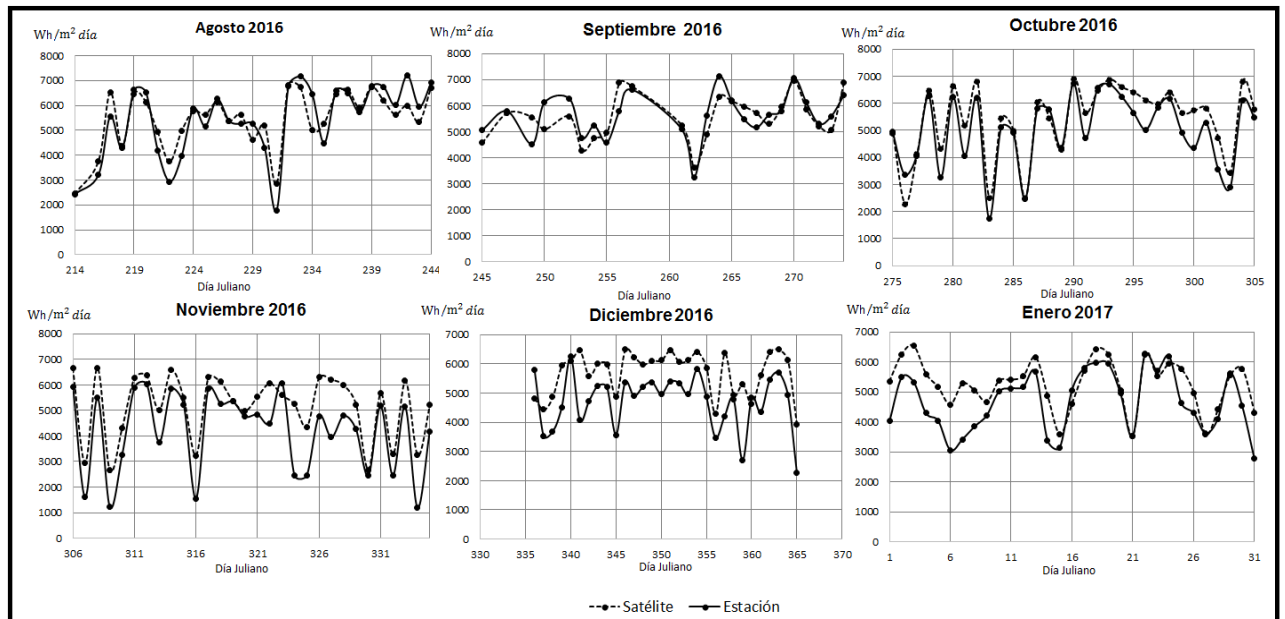


Figura 27: Radiación solar en superficie diaria mensual calculado a partir de las imágenes de satélite y la registrada por la estación La Libertad para semestre 2a (semestre de validación).

La figura 26 muestra el resultado de las regresiones diarias mensuales de la radiación solar en superficie registrada por la estación y la calculada por el satélite para el semestre 2a. Los valores de los R^2 son más cercanos a 1, a excepción del mes de diciembre que vuelve a presentar un valor de R^2 igual a 0,4 similar al presentado en la figura 19.

La figura 27 muestra la radiación solar mensual en superficie calculada a partir de las imágenes de satélite y las registradas por la estación La Libertad para el semestre 2a (semestre a validar). Se evidencia que existe semejanza entre las estimaciones de la radiación de estas dos fuentes. Se observa que en el mes de diciembre la radiación calculada a partir de las imágenes de satélite sobrestiman el valor de radiación solar en superficie, lo cual es consecuente con el valor bajo de R^2 de las figuras 19 y 26.

Cuando se validan los promedios de radiación solar mensual y semestral en superficie (ver figura 28), se observa que el error es cercano a 1% para los meses de agosto y septiembre. De octubre a noviembre el satélite sobrestima el valor de radiación solar en superficie en un 16%. Para el caso del valor promedio semestral, el satélite sobrestima en 9,5 % del valor promedio semestral de la estación.

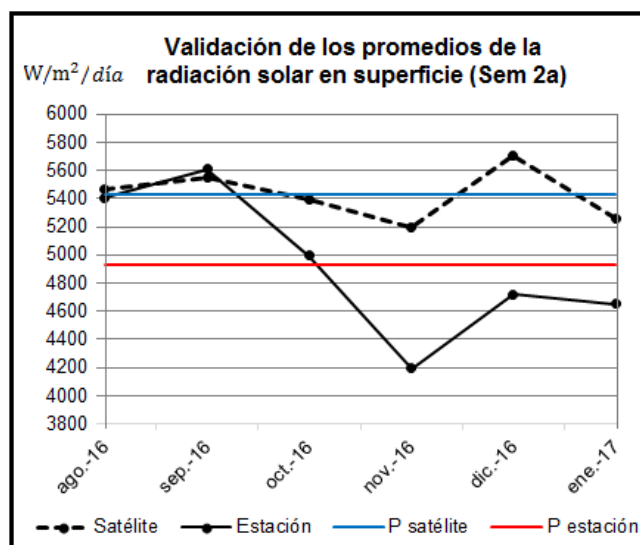


Figura 28: Promedios de la radiación solar en superficie mensual y semestral registrada por la estación La Libertad y la calculada por las imágenes de satélite para el semestre 2a (semestre de validación).

Calibración del modelo	Expresión	R ²	Error promedio semestral
Brillo solar y Ångström- Prescott	$f(x) = 0,9954x + 148,9086$	0,566	2,4598%
Precipitación	$f(x) = 1,0091x - 567,1098$	0,673	9,5480%

Tabla 2: Resumen de las expresiones encontradas para validar la radiación solar en superficie obtenida a partir de las imágenes de satélite. Con los respectivos R-cuadrado y errores promedio semestrales a partir de las selecciones de semestres propuestas para calibrar y validar.

En la tabla 2 se presenta un resumen de las expresiones que se obtienen para encontrar la variabilidad diaria entre la radiación solar en superficie calculada por las imágenes de satélite y la registrada por la estación La Libertad. Con la elección de los semestres de calibración y validación del modelo a partir de los coeficientes de Ångström-Prescott y de las horas de brillo solar, se obtienen resultados en relación a los promedios mensuales y semestrales similares a los obtenidos por Polo (2010).

Para el caso de la calibración y validación del modelo a partir de los coeficientes de Ångström-Prescott, la variabilidad diaria durante un semestre presenta un valor de R^2 igual a 0,566. Para el caso del promedio semestral se obtiene una subestimación de 2,4 % comparado con el valor que registra la estación.

Para el caso de la calibración y validación del modelo a partir de los valores de precipitación total semestral la variabilidad diaria durante un semestre presenta un valor de $R^2 = 0,673$. Para el caso del promedio semestral se obtiene un sobrestimación de 9,54 % comparado con el valor que registra la estación.

9. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Las medidas radiométricas simultáneas de brillo solar y radiación solar en superficie de la estación La Libertad permiten encontrar los coeficientes de Ångström-Prescott para el periodo comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017. Para esta estación el coeficiente a varía mensualmente entre 0,16 y 0,31. Con respecto al valor semestral y anual, es casi constante con un valor de 0,25. El valor del coeficiente de a permite identificar el porcentaje en comparación con el valor de H_{ext} que se tiene para un día nublado. Este porcentaje se asocia a la radiación solar por esparcimiento. Para el caso de la estación La Libertad para días completamente nublados sería aproximadamente del 25%. Para el caso del coeficiente b , éste varía mensualmente entre 0,46 y 0,68. Con respecto al valor semestral y anual, el coeficiente b presenta un valor constante de 0,57. El valor de este coeficiente indica el porcentaje de radiación global respecto a lo que llega al tope de la atmósfera. Los valores de los ajustes de R^2 mensuales fueron mayores a 0,87. En los cálculos de estos coeficientes para el semestre y para el año, los valores de R^2 son mayores a 0,85. Esto evidencia que las expresiones obtenidas por este modelo lineal logran explicar gran parte de la variabilidad entre $\frac{H}{H_{ext}}$ y $\frac{n}{N}$.
- Existe una coherencia entre la variable de brillo solar calculada por las imágenes de satélite y las registradas por la estación de La Libertad. Esta semejanza se evidencia en el valor cercano a 1 de la pendiente entre estas dos variables, a pesar de que se encuentra un error sistemático. Algunos errores que se dan en este cálculo se deben a la utilización de la expresión (13) que depende de un error propio de cada estación. Sin embargo, este trabajo pone en evidencia que se pueden calcular los valores de brillo solar, a partir de los niveles digitales de cada pixel de la imagen teniendo en cuenta ciertas expresiones propias de cada satélite. Los valores de ajuste de R^2 para la regresión de los valores diarios de un semestre entre el brillo solar calculado y el registrado por la estación son cercanos a 0,7 (ver figura 17 y 23). Esto demuestra que es posible obtener información de brillo solar a partir del uso de las imágenes de satélite en lugares desprovistos de estaciones radiométricas. Esto permitiría pensar en la posibilidad de tener una estación de brillo solar para cualquier punto contenido en la imagen de satélite.

- La metodología presentada para la estimación de la radiación solar en superficie de manera indirecta es buena, teniendo en cuenta las dimensiones del pixel de la imagen. Esta metodología permite complementar la distribución espacial y temporal de las estaciones radiométricas, en particular de las estaciones que registran información de brillo solar. En el caso de las expresiones de regresión obtenidas entre la radiación solar en superficie registrada por la estación La Libertad y la calculada a través de las imágenes de satélite, el valor de los ajustes mensuales y semestrales explican entre un 56% y 67% la variabilidad diaria. Por otro lado cuando se analizan los promedios mensuales y semestrales los errores que se obtienen son del 8% para los promedios mensuales y del 2,4% para el promedio semestral.
- La elección de los semestres para calibrar y validar el modelo no es tan relevante si se quiere encontrar una expresión para la variabilidad diaria semestral de la radiación solar en superficie calculada a partir de las imágenes de satélite y los registrados por la estación. Los valores del ajuste de R^2 en las dos elecciones de semestres desarrolladas son similares. Para el caso de los promedios semestrales se evidencia que es más precisa la elección de los semestres a partir de los coeficientes de Ångström-Prescott y de las horas de brillo solar.
- Se podría aplicar una corrección a la expresión 22 para el cálculo del índice de nubosidad, basados en alguna teoría física para disminuir el error sistemático que presenta la figura 12. Teniendo en cuenta que La atmosfera no solamente consta de una capa de nubes y de una superficie.

Recomendaciones

- Utilizar un mayor tiempo de estudio por lo menos de dos años, para calibrar y validar con un año completo esta metodología.
- Desarrollar un código que optimice las rutinas de descarga, para el procesamiento, georreferenciación y almacenamiento de las imágenes de satélite.
- Cuando se convierten los niveles digitales a reflectancia para obtener el índice de nubosidad se sugiere utilizar el 80% de los valores máximos y los mínimos con los valores originales, tal como lo sugiere Laguarda *et al.* (2018).

ANEXO A MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA EL CÁLCULO DE LA RADIACIÓN EN SUPERFICIE

- **Método de Hay & Hanson:**

El método de Hay & Hanson (1978, citado en Noia *et al.* 1993, p. 451) se desarrolló en el programa llamado “Global Atmospheric Research Atlantic Tropical Experiment”, donde a partir de imágenes de satélite se determina la radiación de onda corta incidente sobre la superficie del mar, haciendo uso del canal visible para el espectro comprendido entre $0,5\mu m - 0,75\mu m$ (Suárez, 2013).

El método propone una relación lineal simple entre la radiación visible $\frac{H_{Sa}}{H_{ext}}$ y el índice de claridad T , donde H_{Sa} es la irradiancia medida por los sensores satelitales y H_{ext} es la irradiancia extraterrestre (ver expresión (1A)). Sabiendo que por definición T es la relación entre la irradiancia en superficie H y la irradiancia extraterrestre H_{ext} , se obtiene una expresión para la irradiancia en superficie H dada por:

$$T = a - b \left[\frac{H_{Sa}}{H_{ext}} \right], \quad (1A)$$

$$\frac{H}{H_{ext}} = a - b \left[\frac{H_{Sa}}{H_{ext}} \right] \quad (2A)$$

$$H = aH_{ext} - bH_{Sa} \quad (3A)$$

Donde a y b , son coeficientes que deben ser calculados para ajustar el modelo. Estos valores dependen del contenido y de la concentración de los gases, vapor de agua, aerosoles, partículas de polvo y cobertura de nubes presentes en la atmósfera (Suárez, 2013).

- **Método de Tarpley:**

El método de Tarpley se caracteriza por el cálculo de la radiación solar horaria en superficie para tres tipos de cobertura de nubes, cielo claro, parcialmente nublado, y nublado, de acuerdo a las siguientes ecuaciones (Suárez, 2013):

$$H_H = a + b \cdot \cos \theta_z + c \cdot T + d \cdot n + e \cdot \left[\frac{B_m}{B_0} \right]^2 \quad n^c \geq 0.4 \quad (4A)$$

$$H_H = a + b \cdot \cos \theta_z + c \cdot n \cdot \left[\frac{B_{cld}}{B_n} \right]^2 \quad 0.4 \leq n^c \leq 1.0 \quad (5A)$$

$$H_H = a + b \cdot \cos \theta_z + c \cdot \left[\frac{B_{cld}}{B_n} \right]^2 \quad n^c = 1.0 \quad (6A)$$

Donde n es el índice de nubosidad, θ_z el ángulo cenital, B_m es el brillo medio del objetivo, B_o es el brillo claro, B_{clid} es el brillo de las nubes, $B_n = B_o$ es el brillo claro normalizado, a, b, c, d y e son los coeficientes de regresión (Suárez, 2013).

El índice de nubosidad se expresa de la siguiente forma:

$$n_c = \frac{0.5 \cdot N_2 + N_3}{N} \quad (7A)$$

Donde N es el número total de píxeles en el área, N_2 el número de píxeles para la categoría parcialmente nublado, y N_3 el número de píxeles para la categoría nublado (Suárez, 2013).

- **Método de Justus, Paris & Tarpley:**

El método de Justus, Paris & Tarpley desarrolla mapas de insolación considerando solo una ecuación para cualquier condición de nubosidad, y no requiere datos meteorológicos de entrada. Algunos autores consideran este método como una simplificación del método de Tarpley (Suárez, 2013):

$$H = I_{SC} \cdot \varepsilon_0 \cdot \cos \theta_z \cdot [a + b \cdot \cos \theta_z + c \cdot \cos^2 \theta_z] + d \cdot [B_m^2 - B_0^2] \quad (8A)$$

Donde I_{SC} es la constante solar, ε_0 es la corrección por excentricidad debido a la trayectoria elíptica que describe la Tierra alrededor del Sol, θ_z el ángulo cenital, B_m es el brillo medio, B_0 es el brillo para un cielo despejado y los valores a, b, c, d son los coeficientes de regresión.

ANEXO B CÁLCULO DE LA RADIACIÓN GLOBAL A PARTIR DEL MÉTODO HELIOSAT

El método Heliosat establece el cálculo de las medidas del albedo a partir de la reflectancia que mide el satélite, por medio de la cual se obtiene la radiancia, que es la magnitud real que registra el radiómetro satelital. Esta medida se realiza suponiendo isotropía en la atmósfera (Badescu, 2008):

$$\rho = \frac{\pi L_{\Delta}}{E_{\Delta}} \quad (1B)$$

Donde ρ es el albedo, L_{Δ} es la radiancia y E_{Δ} denota la radiación solar incidente dentro de la banda espectral del radiómetro satelital. El albedo de suelo corresponde a un cielo claro, limpio y seco. La importancia del concepto de índice de nubes se basa en el hecho de que la información satelital (básicamente información de cobertura de nubes) puede relacionarse con la radiación solar que llega a la superficie de la tierra. En consecuencia la mayoría de las metodologías, se basan en el supuesto de una relación lineal entre el índice de claridad y el índice de nubes para el cálculo de la radiación solar en superficie (Cano *et al.* 1986; Diabaté *et al.* 1988; Rigollier *et al.* 2002).

El modelo Heliosat identifica las nubes de tamaño mayor o igual a un pixel, mediante el análisis de una serie temporal de imágenes, en la estimación del albedo para cada pixel (Olcoz, 2014). Para cielos muy claros el albedo instantáneo o aparente de la superficie $\rho^t(i, j)$ corresponde a la fracción de radiación visible reflejada por la superficie terrestre, que corresponde a un pixel de la imagen para un instante de tiempo t (Moussu *et al.* 1988). Este valor se encuentra a partir de la siguiente expresión:

$$\rho^t(i, j) = \frac{\pi L^t(i, j)}{I_{0\ met} \varepsilon(t) \cos \theta_s(t, i, j)} \quad (2B)$$

Donde $L^t(i, j)$ es la radiancia observada por el satélite en un instante de tiempo t y para un pixel (i, j) , $I_{0\ met}$ es la irradiancia total del canal visible del satélite, ε es la corrección por excentricidad debido a la trayectoria elíptica que describe la Tierra alrededor del Sol y θ_s es el ángulo cenital del Sol.

Para el cálculo de la radiación directa y de esparcimiento se utilizan los modelos de Page y Dumortier (1996 & 1995, citado en Selmin. 2018, p.334) los cuales para condiciones de cielo despejado, proponen la siguiente expresión para la radiación normal directa:

$$H_{dclear} = I_0 \varepsilon e^{-0.8662 \cdot T_L(2)\delta_R(m)m} \quad (3B)$$

Donde I_0 es la constante solar, $T_L(2)$ es el factor de turbidez Linke para la masa de aire 2, $\delta_R(m)$ el espesor óptico de Rayleigh y m la masa de aire. El factor ε esta dado por la siguiente expresión (Spencer, 1971):

$$\varepsilon = 1.000110 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.001280 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \sin 2\Gamma \quad (4B)$$

Donde Γ depende del día juliano del año J de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\Gamma = 2\pi \frac{J - 1}{365} \quad (5B)$$

La masa de aire de aire se calcula utilizando la siguiente expresión introducida por Kasten & Young (1989):

$$m = \frac{1 - z/10000}{\cos \theta_z + 0,50572 (96.07995 - \theta_z)^{-1.6364}} \quad (6B)$$

Donde z es la altura del sitio en metros y θ_z el ángulo cenital del sol en grados.

El espesor óptico de Rayleigh δ_R es el espesor óptico de una atmósfera seca y limpia, donde solo se produce el esparcimiento de Rayleigh, para valores de m inferiores a 20 se utiliza la expresión (Kasten, 1996):

$$\delta_R = \frac{1}{6.6296 + 1.7513m - 0.1202m^2 + 0.0065m^3 - 0.00013m^4} \quad (7B)$$

Para valores de m mayores a 20 se utiliza la expresión:

$$\delta_R = \frac{1}{10.4 + 0.718m} \quad (8B)$$

La turbidez de Linke se define como el número de atmósferas de Rayleigh (limpias y secas) necesarias que tiene que atravesar un haz de radiación solar para representar el espesor óptico real $\delta(m)$. Es una forma de caracterizar el estado de una atmosfera para un cielo completamente despejado, cuando no se cuenta con información detallada sobre aerosoles o vapor de agua, su expresión es la siguiente:

$$T_L = \frac{\delta(m)}{\delta_R(m)} \quad (9B)$$

La radiación por esparcimiento H_{sc} se calcula utilizando un método empírico propuesto por Dumortier (1995, citado en Selmin. 2018, p.334):

$$H_{sc} = H_{ext} \varepsilon (0.0065 + (-0.045 + 0.0646T_L(2)) \cos \theta_z + (0.014 - 0.0327T_L(2)) \cos^2 \theta_z) \quad (10B)$$

Donde H_{ext} es la radiación extraterrestre diaria sobre un plano horizontal de la forma:

$$H_{ext} = I_{SC} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \cos \theta_z \quad (11B)$$

Donde θ_z es el ángulo cenital en grados, I_{SC} la constante solar, r_0 es la distancia promedio de la Tierra al Sol y r es la distancia de la Tierra al Sol para cada día del año. Este cociente es conocido como factor de corrección por excentricidad de la órbita terrestre.

Teniendo en cuenta que los canales espectrales del satélite GOES no suministran información sobre la turbidez atmosférica, se utiliza el modelo propuesto para tener en cuenta la variación de la turbidez (Bourges, 1985):

$$T_L(2) = T_0 + u \cos \left(\frac{2\pi}{365} J \right) + v \sin \left(\frac{2\pi}{365} J \right) \quad (12B)$$

Los parámetros T_0 , u , y v son específicos del lugar (Hammer *et al.* 2003). Esta expresión permite ajustar el factor de Linke con las particularidades de una localidad. Finalmente la radiación solar en superficie para un cielo despejado es la suma de los componentes de la radiación directa y difusa:

$$H_{clear} = H_{dclear} \cos \theta_z + H_{sc} \quad (13B)$$

El método Heliosat determina la radiación solar en superficie de la siguiente forma:

$$H = H_d + H_{sc} \quad (14B)$$

Donde H_d es la radiación directa para cualquier día sin importar que no sea un día despejado.

ANEXO C MÉTODO DE LA MEDIA MÓVIL PARA EL CÁLCULO DE LA INFORMACIÓN FALTANTE.

Este método se caracteriza por promediar cada valor con algunas de las observaciones que le proceden y le siguen. Permitiendo eliminar posibles variaciones accidentales y suavizar la serie. Existen varios tipos de medias móviles, para nuestro caso utilizaremos una que nos permita predecir aquellos valores faltantes.

Ejercicio: Encontrar a partir de la media móvil los valores faltantes en la tabla 1e:

FECHA/HORA	UNIDAD
	Wh/m ²
26/05/2011 6:00	4,692187329
27/05/2011 7:00	49,26796695
28/05/2011 8:00	93,84374658
29/05/2011 9:00	
30/05/2011 10:00	329,1534395
31/05/2011 11:00	526,6455032
01/06/2011 12:00	656,906226
02/06/2011 13:00	617,6879439
03/06/2011 14:00	
04/06/2011 15:00	801,1734782
05/06/2011 16:00	378,1762922
06/06/2011 17:00	274,5279751
07/06/2011 18:00	1,372639875

Tabla 1e

Para el valor faltante del día 29/05/2011 09:00 am se tiene:

$$X_1 = \frac{(49,26796695) + (93,84374658) + (329,1534395) + (526,6455032)}{4}$$

$$X_1 = 249,727664$$

Para el valor faltante del día 03/06/2011 14:00 pm se tiene:

$$X_2 = \frac{(656,906226) + (617,6879439) + (801,1734782) + (378,1762922)}{4}$$

$$X_2 = 613,485985$$

ANEXO D SOLICITUD DE IMÁGENES DE SATÉLITE A LA NOAA

Para la solicitud de imágenes de satélite se debe crear el respectivo usuario en la página de la NOAA Comprehensive Large Array-Data Stewardship System (Class) <https://www.avl.class.noaa.gov/saa/products/welcome>, el registro se realiza en la pestaña izquierda llamada User Profile. Se debe registrar la respectiva información, finalizando con el botón register. Después del registro se debe seleccionar en la parte superior central el producto a buscar, se debe seleccionar GOES Satellite Data-Imager (GVAR_IMG). Acá aparece una descripción general del producto, de igual forma se selecciona la longitud y latitud para obtener el área máxima de la imagen (ver imagen D1).

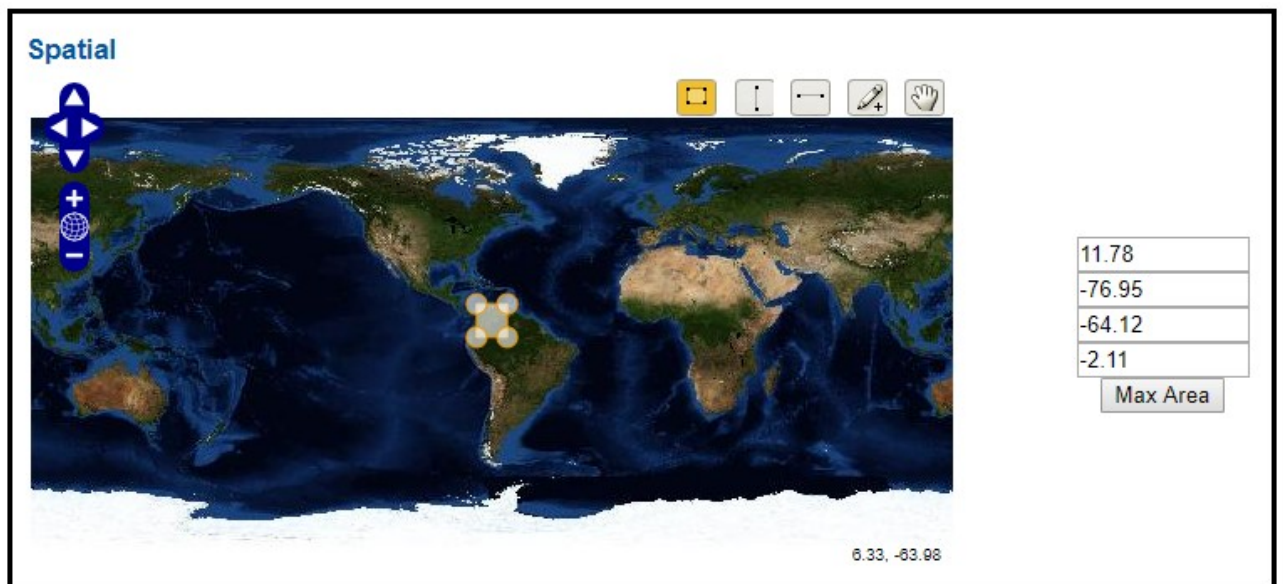


Imagen D1: Selección del área máxima de la imagen a solicitar

Imagen tomada de:

https://www.avl.class.noaa.gov/saa/products/search?sub_id=0&datatype_family=GVAR_IMG&submit.x=29&submit.y=11

Se selecciona el periodo de tiempo y la hora UTC de la o las imágenes a solicitar. En búsqueda avanzada se debe seleccionar Full Disk y Northern Hemisphere y el satélite GOES a utilizar (ver imagen D2).

Temporal

(maximum range is 366 days)

<p>Start Date (format: YYYY-MM-DD) <input type="text" value="2016-01-01"/> </p> <p>End Date (format: YYYY-MM-DD) <input type="text" value="2016-01-31"/> </p>	<p>Start Time (UTC) (format: HH:MM:SS) <input type="text" value="00:00:00"/></p> <p>End Time (UTC) (format: HH:MM:SS) <input type="text" value="23:59:59"/></p>
---	---

Specify the range of the times for: Each Day Or The Entire Range Of Days

Advanced Search

<p>Coverage</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Continental United States <input checked="" type="checkbox"/> Full Disk <input checked="" type="checkbox"/> Northern Hemisphere <input type="checkbox"/> Northern Hemisphere Extended <input type="checkbox"/> Other <input type="checkbox"/> 15 Minute Full Disk <input type="checkbox"/> 9.5 Minute Sector <input type="checkbox"/> Pacific United States <input type="checkbox"/> Southern Hemisphere <input type="checkbox"/> Southern Hemisphere Small Sect <input type="checkbox"/> Short Full Disk <input type="checkbox"/> Super Rapid Scan Over Hawaii <input type="checkbox"/> Super Rapid Scan Over Maryland <input type="checkbox"/> Sub Continental United States 	<p>Satellite Schedule</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Routine <input type="checkbox"/> Rapid Scan Operation <input type="checkbox"/> Super Rapid Scan Operation <input type="checkbox"/> Other <p>Filter By Dataset Size (bytes)</p> <p>Minimum: <input type="text"/></p> <p>Maximum: <input type="text"/></p>
---	--

Satellite

GOES-12 ▲
GOES-13
 GOES-14 ▒
 GOES-15 ▼

Imagen D2: Selección del periodo de tiempo y de búsqueda avanzada de las imágenes a solicitar.

Imagen tomada de:

https://www.avl.class.noaa.gov/saa/products/search?sub_id=0&datatype_family=GVAR_IMG&submit.x=29&submit.y=1

1

Estos criterios de búsqueda se pueden guardar y cargar cada vez que se necesite volver a solicitar una nueva imagen, utilizando Save Criteria y Load criteria respectivamente, finalmente se selecciona Search. Luego se observan los detalles del producto, donde solo se pueden solicitar máximo 100 imágenes por solicitud por lo que se deben seleccionar en estos rangos y finalizar con Goto Cart (ver imagen D3).

NOAA COMPREHENSIVE LARGE ARRAY-DATA STEWARDSHIP SYSTEM (CLASS)

GOES Satellite Data - Imager (GVAR_IMG)

Data Product Search Results - GVAR_IMG

(click here for a printable listing)

Recently Searched Data Sets: GVAR_IMG

Displaying page 1 of approximately 28 page(s).
There are an estimated 275 hit(s).
There are 0 (GVAR_IMG) items in your shopping cart. The shopping cart limit is 100.

Shopping Cart:

View Details	Shopping Cart	Inventory ID	End Time	Satellite	Coverage	Satellite Schedule
1	<input type="checkbox"/>	514652873 101-200 201-275	2016-01-01 00:11:24.000	G13	FD	R
2	<input type="checkbox"/>	514696093	2016-01-01 02:45:18.000	G13	FD	R
3	<input type="checkbox"/>	514739813	2016-01-01 05:45:18.000	G13	FD	R
4	<input type="checkbox"/>	514777893	2016-01-01 08:45:19.000	G13	FD	R
5	<input type="checkbox"/>	514811373	2016-01-01 11:45:17.000	G13	FD	R
6	<input type="checkbox"/>	514857093	2016-01-01 14:45:18.000	G13	FD	R

Imagen D3: Selección de rangos de imágenes y descripción de detalles del producto a solicitar.

Imagen tomada de:

https://www.avl.class.noaa.gov/saa/products/search?sub_id=0&datatype_family=GVAR_IMG&submit.x=29&submit.y=1

Después de realizar este procedimiento se debe completar el carrito de compras, se verifica la dirección electrónica del destinatario, el formato en el que se desea la imagen el canal y la resolución espacial. Finalizando esto se da clic en Place Order y se selecciona que el uso de estas imágenes es para fines educativos (Ver imagen D4).

Shopping Cart

Total size of selected data sets: 365,952,993 Bytes You will be notified at: wilmar.poveda@gmail.com

Number of data sets: 100 Order Comment:

GVAR_IMG

Order	Dataset Name	Include Digital Signature	Geog. Subset	Output Format	Bits/Pixel	Spatial Resolution*		Bands	Map Overlay
						VIS	IR		
<input checked="" type="checkbox"/>	Click on a dataset name to see the dataset details	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Area NetCDF GIF JPG Raw	8 16	1 2 4 8	1 2 4	1 2 3 4 5/6	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	GVAR_IMG goes13.2015.2345 17.tar	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Area NetCDF GIF JPG Raw	8 16	1 2 4 8	1 2 4	1 2 3 4 6	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	GVAR_IMG goes13.2016.001.0245 18.tar	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Area NetCDF GIF JPG Raw	8 16	1 2 4 8	1 2 4	1 2 3 4 6	<input checked="" type="checkbox"/>

imagen D4: Verificación de la dirección de correo, formato de la imagen, canal y la resolución de las imágenes a solicitar.

Imagen tomada de:

https://www.avl.class.noaa.gov/saa/products/search?sub_id=0&datatype_family=GVAR_IMG&submit.x=29&submit.y=1

ANEXO E RELACIONES ASTRONÓMICAS SOL-TIERRA

Distancia Tierra – Sol

La Tierra en su movimiento alrededor del Sol describe una órbita elíptica, con uno de sus extremos un poco más cerca del Sol que el otro, presentando un grado de desviación de una sección cónica respecto a una circunferencia de 1,7%. (Ideam & Upme, 2018) La órbita de la tierra se puede describir en coordenadas polares mediante la expresión:

$$r = \frac{UA (1 - e^2)}{1 + e \cos a} \quad (1E)$$

Donde r representa la distancia entre la Tierra y el Sol en unidades astronómicas UA, e la excentricidad de la órbita terrestre, (0,01673 aproximadamente) y a la posición angular de la tierra en la órbita.

Posición angular de la Tierra en la órbita

Esta posición angular varía durante el año dependiendo el día juliano, obteniendo un valor mínimo y máximo el 1 de enero y el 31 de diciembre respectivamente, (ver figura B1) de acuerdo a la siguiente expresión:

$$a = \frac{2\pi(nd - 1)}{365} \quad (2E)$$

Donde nd representa el día juliano.

Declinación del sol: Es el ángulo formado entre el ecuador y la línea trazada desde el centro de la Tierra al centro del Sol, este ángulo varía negativa o positivamente alrededor de un valor 23.5° , solo en los equinoccios de primavera y otoño el ángulo de declinación es 0° , mientras que alcanza sus valores máximos de declinación los solsticios de verano e invierno (ver figura E1).

Ejemplo: Encontrar la posición angular y la respectiva distancia desde la Tierra al Sol para el día 03 de enero de 2019.

Inicialmente se debe establecer el correspondiente día juliano, el cual sería 3, es decir sustituyendo en la ecuación (2E) se obtendría:

$$a = \frac{2\pi(3 - 1)}{365}$$

$$a = 0,0109 \pi \text{ rad}$$

Para el cálculo de la distancia tierra sol para ese día utilizamos la expresión (1E), teniendo en cuenta que 1 UA es aprox. $1,5 \times 10^{11}$ m se obtendría:

$$r = \frac{1,5 \times 10^{11} \text{ m} (1 - (0,01673)^2)}{1 + 0,01673 \cos(0,0109 \pi \text{ rad})}$$

$$r = \frac{1,499580 \times 10^{11} \text{ m}}{1,016729}$$

$$r = 1,4749062 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$r = 0,983 \text{ UA}$$

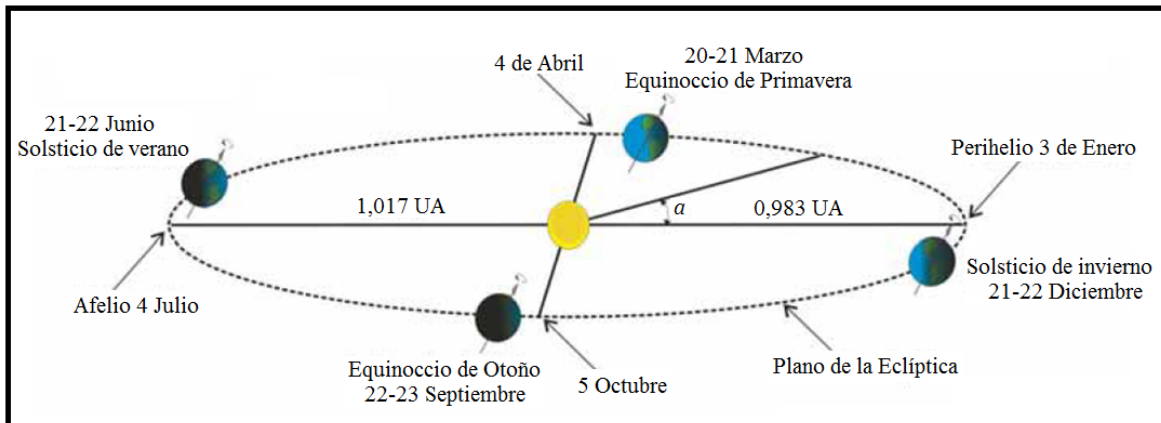


Figura E1: Movimiento de la Tierra: Imagen modificada del atlas del Ideam 2005

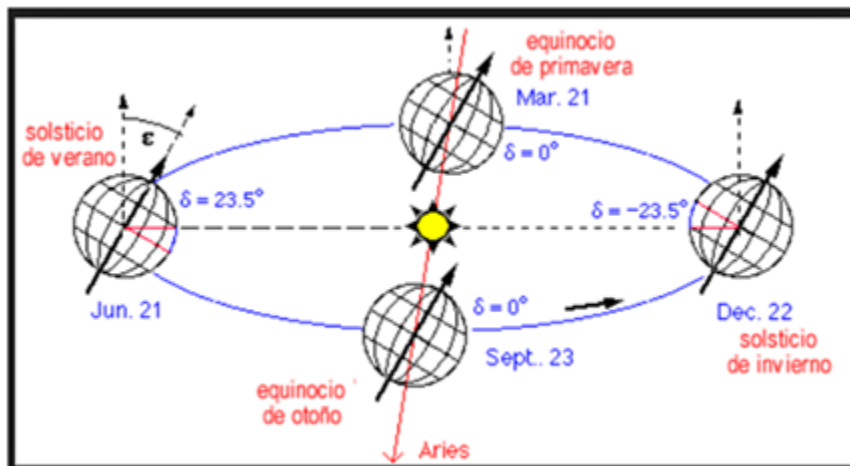


Figura E2: Variación del ángulo de declinación del sol: Imagen modificada del atlas del Ideam 2005

ANEXO F CÁLCULO DE LA POSICIÓN DEL SOL A PARTIR DE LA GEOMETRÍA ESFÉRICA Y DEL TEOREMA DEL COSENO.

Partiendo del triángulo esférico para un arco de círculo máximo similar al de la figura F1

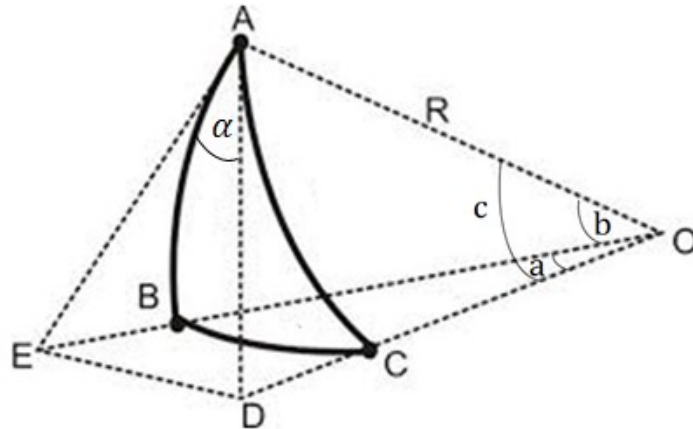


Figura F1: Teorema del coseno en geometría esférica.

Y utilizando el teorema del coseno para el triángulo **EDO** se tiene:

$$(ED)^2 = (EO)^2 + (DO)^2 - 2 (EO)(DO) \cos(a) \quad (1F)$$

La expresión $(EO)^2$ se puede obtener haciendo uso del teorema de Pitágoras ya que es la hipotenusa del triángulo **EDO**, de igual forma para la expresión $(DO)^2$ sería la hipotenusa del triángulo **ADO**, obteniendo:

$$(EO)^2 = (EA)^2 + (AO)^2 \quad (2F)$$

$$(DO)^2 = (AD)^2 + (AO)^2 \quad (3F)$$

Al sustituir las expresiones (2c) y (3c) en (1c) se tiene:

$$(ED)^2 = 2(AO)^2 + (EA)^2 + (AD)^2 - 2 (EO)(DO) \cos(a) \quad (4F)$$

Si se utiliza el teorema del coseno ahora para el triángulo **EDA** se tiene:

$$(ED)^2 = (AD)^2 + (EA)^2 - 2 (AD)(EA) \cos(\alpha) \quad (5F)$$

Igualando las expresiones (4F) y (5F) y dividiendo por 2 se tiene:

$$(AO)^2 - (EO)(DO) \cos(a) = - (AD)(EA) \cos(\alpha) \quad (6F)$$

Dividiendo la expresión (6c) por $(EO)(DO)$ se tiene:

$$\frac{(AO)(AO)}{(EO)(DO)} - \cos(a) = -\frac{(AD)(EA)}{(EO)(DO)} \cos(\alpha) \quad (7F)$$

Observando la imagen C1 se puede sustituir estos cocientes por sus respectivos cosenos

$$\cos(b) \cos(c) - \cos(a) = -\sin(b) \sin(c) \cos(\alpha) \quad (8F)$$

$$\cos(a) = \cos(b) \cos(c) + \sin(b) \sin(c) \cos(\alpha) \quad (9F)$$

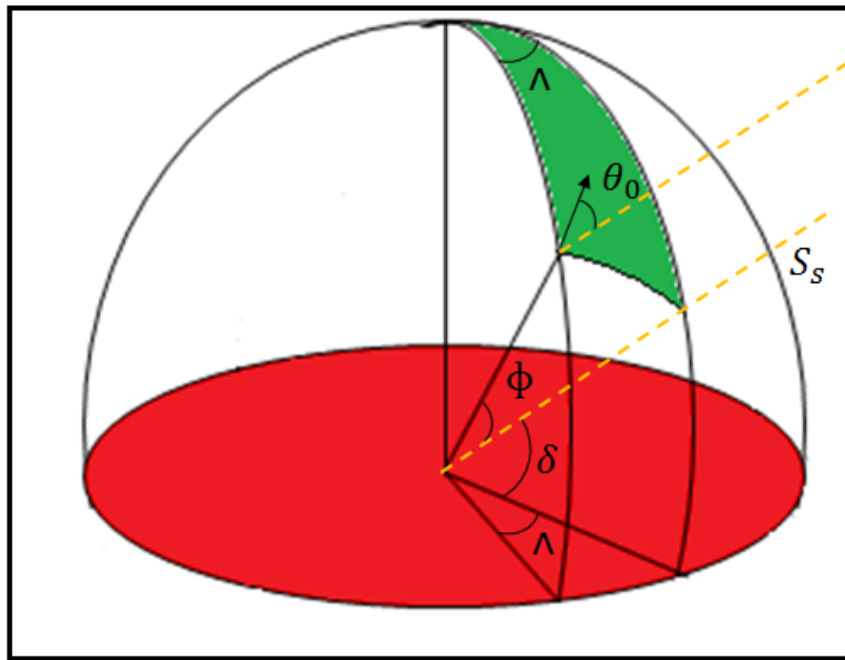


Figura F2: Posición del sol en el triángulo esférico.

Si se asume que la tierra esta quieta, en un punto de la esférica unitaria se tiene:

$$\cos \theta_0 = \cos(90 - \phi) \cos(90 - \delta) + \sin(90 - \phi) \sin(90 - \delta) \cos \lambda \quad (10F)$$

$$\cos \theta_0 = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \lambda \quad (11F)$$

Elaborado con base en Pelkowski (2018)

ANEXO G CÁLCULO DE LA RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE DIARIA EN EL TOPE DE LA ATMÓSFERA.

Partiendo de la expresión (1G) (radiación solar instantánea en el tope de la atmósfera) se plantea una integral en el tiempo para el cálculo diario de la irradiancia en el tope de la atmósfera:

$$H_{ext} = I_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \cos \theta_z \quad (1G)$$

Donde H_{ext} es la irradiancia en el tope de la atmósfera, $\left(\frac{r_0}{r} \right)^2$ es la corrección por excentricidad y θ_z el ángulo cenital se tiene:

$$H_{ext} = \frac{1}{T} \int_0^T I_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \cos \theta_z dt \quad (2G)$$

Por otro lado si se hace un cambio de variable y de los límites de integración en términos del ángulo horario y de la velocidad angular a la expresión (2G) se tiene:

$$\omega_0(t) = \Omega t - \pi \quad ; \quad d\omega = \Omega dt$$

$$H_{ext} = \frac{1}{2} \int_{-\omega_0}^{\omega_0} I_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \cos \theta_z d\omega \quad (3G)$$

$$H_{ext} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_0}^{\omega_0} I_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega d\omega \quad (4G)$$

Obteniendo finalmente:

$$H_{ext} = \frac{24}{\pi} I_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \left(\cos \phi \cos \delta \sin \omega + \frac{2\pi \omega}{360^\circ} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (5G)$$

(Pelkowski, 2018)

ANEXO H CÓDIGO UTILIZADO PARA EL CÁLCULO DE LA REFLECTANCIA.

```

from datetime import datetime, timedelta #Modulos del paquete
datetime, que me permiten manipular fechas
import numpy as np #libreria de matematicas
import pandas as pd #libreria para manejar tablas lee en formato
txt,
import os #libreria para tener comandos del sistema

I0 = 1367.
meridiano_ref = -75.
lat = 4.06
lon = -73.47
def declinacion_solar( dia_juliano ):
    dia_rad=2.*np.pi*(dia_juliano-1.)/365.
    return 0.006918-0.399912*np.cos(dia_rad) +
0.070257*np.sin(dia_rad) - 0.006758*np.cos(2.*dia_rad) +
0.00097*np.sin(2.*dia_rad) - 0.002697*np.cos(3.*dia_rad)

def e_t( dia_juliano ):
    dia_rad=2.*np.pi*(dia_juliano-1.)/365.
    return (0.000075 + 0.001868*np.cos(dia_rad)-
0.032077*np.sin(dia_rad)-0.014615*np.cos(2.*dia_rad)-
0.04089*np.sin(2.*dia_rad))*229.18

def tiempo_solar_verdadero( dia_juliano, lon, hlc ):
    return ((lon-meridiano_ref)*4. + e_t( dia_juliano ))/60. + hlc

def distancia( dia_juliano):
    dia_rad=2.*np.pi*(dia_juliano-1.)/365.
    return 1.00011+0.034221*np.cos(dia_rad) +
0.00128*np.sin(dia_rad)+0.000719*np.cos(2.*dia_rad) +
0.000077*np.sin(2.*dia_rad)

def cos_zenit( lat, lon, dia_juliano, hlc ):
    lat = lat*np.pi/180.
    decl = declinacion_solar(dia_juliano)
    angulo_horario = (12 - tiempo_solar_verdadero( dia_juliano,
lon, hlc ))*15.*np.pi/180.
    return np.sin(lat)*np.sin(decl) +
np.cos(lat)*np.cos(decl)*np.cos(angulo_horario)

os.chdir('/home/dario/Escritorio')#codigo para pararme en una
carpeta o lugar
Estacion = pd.read_csv('Estacion/estacionEnero.csv')
Estacion = Estacion.set_index('Fecha')
Estacion.index = pd.to_datetime(Estacion.index, dayfirst=True)
Nivel = pd.read_csv('Rapido/Eneroprueba.csv')
Fechas = [datetime.strptime(Nivel['fecha'][i] + Nivel['hora '][i],
'%d/%m/%y%H:%M:%S') for i in range(Nivel.shape[0])]
Nivel['FECHA'] = Fechas
Tabla = pd.read_csv('Tabla 3.csv')
Tabla = Tabla.set_index('Hora')

```

```

Tabla.loc[Nivel['hora '][0]]
Tablaco=pd.read_csv('Tablaco.csv')

Dis_Solar = [distancia(int(i.strftime('%j')))) for i in
Nivel['FECHA']]
Cos_Zenit = [cos_zenit(lat=lat, lon=lon,
dia_juliano=int(i.strftime('%j')),
                hlc=(int(i.strftime('%-H')) + float(i.strftime('%-
M'))/60)) for i in Nivel['FECHA']]
Nivel['DisSolar'] = Dis_Solar
Nivel['CosZenit'] = Cos_Zenit

Nivel['Vmax'] = [Tabla.loc[i]['Vmax'] for i in Nivel['hora ']]
Nivel['Vmin'] = [Tabla.loc[i]['Vmin'] for i in Nivel['hora ']]

Nivel['Ref']=(Nivel['Ndigital']-29)*1.366*0.00116
Nivel['RMax']=(Nivel['Vmax'])*1.366*0.00116
Nivel['Rmin']=(Nivel['Vmin'])*1.366*0.00116
Nivel['Rp-Rmin']=(Nivel['Ref']-Nivel['Rmin'])
Nivel['RMax-Rmin']=(Nivel['RMax']-Nivel['Rmin'])
Nivel['c']=(Nivel['Rp-Rmin']/Nivel['RMax-Rmin'])
Nivel.loc[Nivel['c'] > 1, 'c'] = 1
Nivel.loc[Nivel['c'] <= 0, 'c'] = np.nan
Nivel['cprom'] = [1 - Nivel.loc[[i.strftime('%Y%m%d') ==
j.strftime('%Y%m%d') for i in Nivel['FECHA']], :].mean()['c'] for j
in Nivel['FECHA']]

Nivel[['FECHA', 'Ndigital', 'Ref', 'RMax',
'Rmin', 'DisSolar', 'CosZenit', 'Rp-Rmin', 'RMax-Rmin', 'c', 'cprom']]

Nivel[['FECHA', 'cprom']]
FECHAS = []
dia = Nivel['FECHA'][0]
FECHAS = [datetime(dia.year, dia.month, dia.day)]
cpromLista = [Nivel['cprom'][0]]
for i in range(len(Nivel['FECHA'])):
    if Nivel['FECHA'][i].day != dia.day:
        cpromLista.append(Nivel['cprom'][i])
        dia = Nivel['FECHA'][i]
        FECHAS.append(datetime(dia.year, dia.month, dia.day))
df_final = pd.DataFrame({'FECHA':FECHAS, 'CPROM':cpromLista})
estacionLista = []
for i in df_final['FECHA']:
    estacionLista.append(Estacion.loc[Estacion.index ==
i]['Estacion'][0])

df_final['Estacion'] = estacionLista
df_final['J'] = [int(i.strftime('%j')) for i in df_final['FECHA']]
df_final = df_final.set_index('FECHA')
df_final.to_csv('daeio4.csv')

```

ANEXO I VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE REFLECTANCIA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE NUBOSIDAD

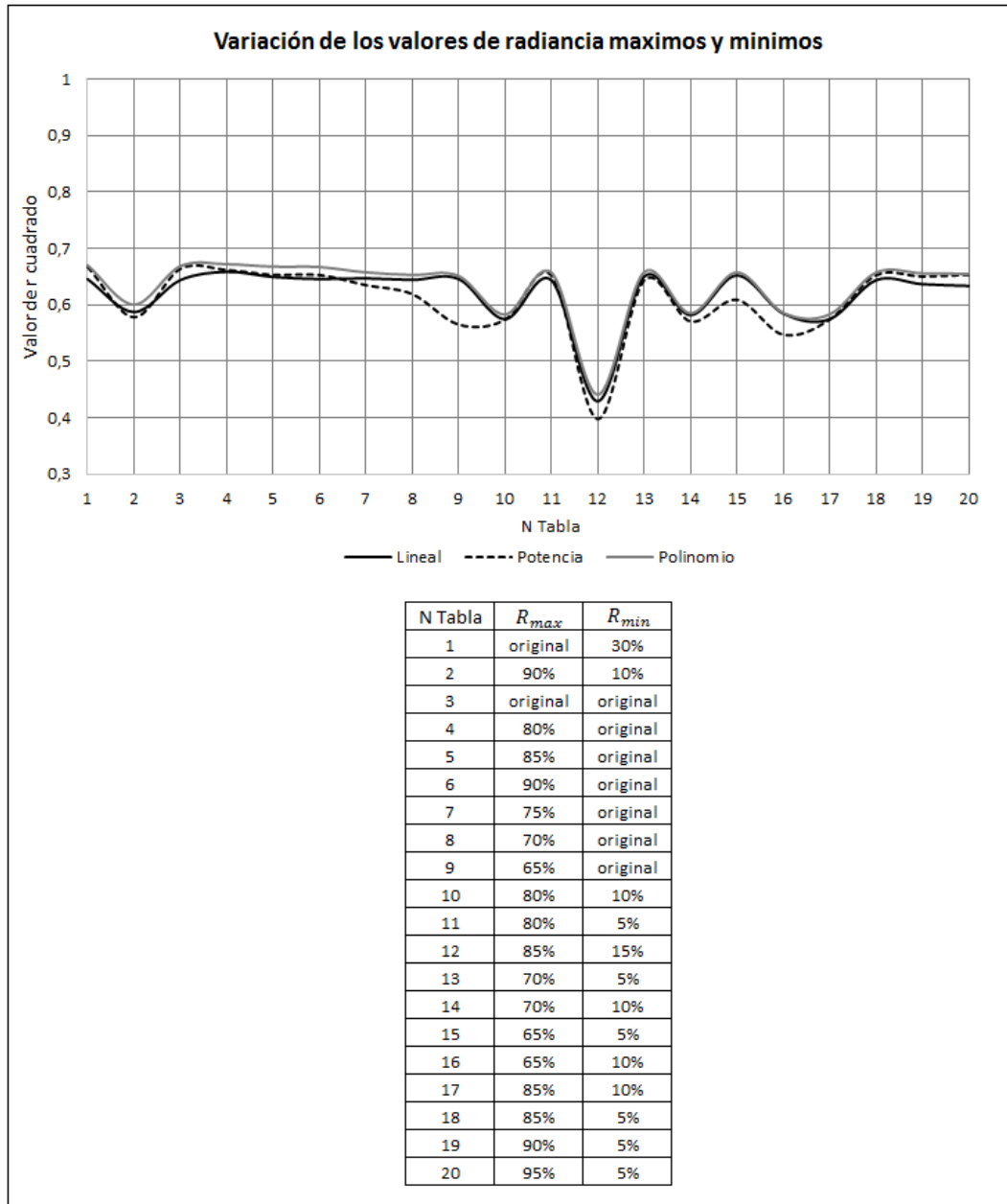


Figura I1: Valores de R^2 calculados a partir de diferentes condiciones de máximos y mínimos de reflectancia con ajustes lineales, de potencia y polinomios.

En la figura I1 se evidencia que los ajustes de manera lineal, polinómica o potencia son similares uno del otro y los mejores ajustes se encuentran con las tablas 1,3,4,5,6,7,8,11,13,15,18,19 y 20. En la figura I2 se muestran las mejores tablas con

mayores R^2 y a partir de regresiones lineales, se evidencia que la tabla 4 es la que mejor tiene ajuste, coincidiendo con lo propuesto por Laguarda *et al.* (2018) acerca de utilizar el 80% en los valores máximos de reflectancia y los valores mínimos como los originales.

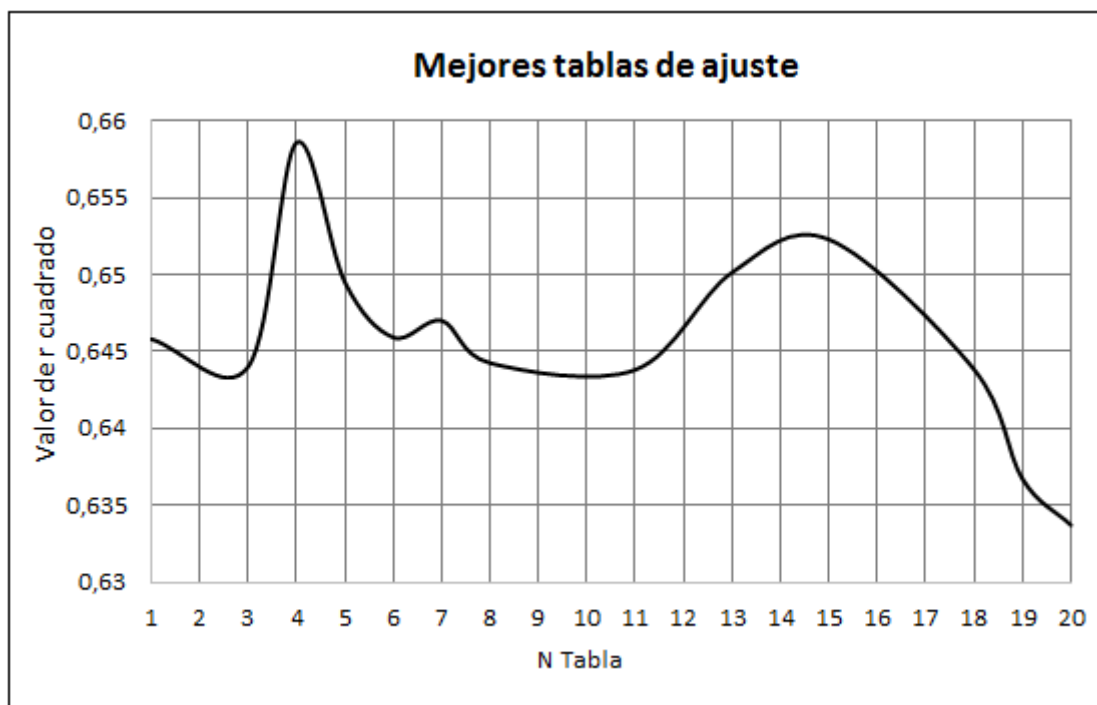


Figura 12: Ajustes de R^2 calculados a partir de diferentes condiciones de máximos y mínimos de reflectancia con ajustes lineales.

Bibliografía

- Akinoglu, B. (2008). Recent advance in the relations between bright sunshine hours and solar irradiation. En V. Badescu, *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface: Recent Advances*, 5, 115-143. Romania: Springer, Berlín Heidelberg.
- Alvarez, O. (2014). Utilización de imágenes GOES en el cálculo de radiación solar en la región sur del Ecuador. *Cedamaz*, 4, 97-105.
- Badescu, V. (2008). *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface: Recent Advances*. Romania: Springer-Berlin Heidelberg, 517.
- Bourges, B. (1985). Improvement in solar declination computation. *Solar Energy*, 35(4), 367-369.
- Cano, D., Monget, M., Albuissou, M., Guillard, H., Regas, N. & Wald, L. (1986). A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, 37(1), 31-39.
- Ceballos, J & Rodriguez M. (2008). Estimativa de insolacao mediante satélite geostacionário: Resultados preliminares. *Trabalho Submetido para Apresentacao XV Congresso Brasileiro de meteorologia*, 1-6. Sao Paulo Brasil. Tomado de:
http://satellite.cptec.inpe.br/radiacao/docs/RefIN/Cebs_Rodr_insolacao_15CBM ET2008.pdf.
- Diabaté, L., Demarco, H., Regas, N. & Wald, L. (1987). Estimating Incident Solar Radiation at the Surface from images of the earth transmitted by geostationary satellites the Heliosat project. *International Journal of Solar Energy*, 5, 261-278.
- Doncel, D. (2018). *Estimación de irradiancia solar aplicando el algoritmo Heliosat 1 con imágenes de satélite Goes en la región Cundiboyacense para el año 2011*. Bogota: Tesis de Maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Gautier, C., Georges, D. & Mase, S. (1980). A simple Physical Model to Estimate Incident Solar Radiation at the Surface from GOES Satellite Data. *Journal of Applied Meteorology*, 19(8), 1005-1012.
- Hammer, A., Heinemann, D., Hoyer, C., Kuhlemann, R, Lorenz, E., Muller, R. & Beyer, H. (2003). Solar energy assessment using remote sensing technologies. *Remote Sensing of Environment*, 86, 423-432.
- Ideam & Upme. (2018). *Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) & La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Obtenido de:
<http://atlas.ideam.gov.co/presentacion/>. Obtenido de Ideam.

-
- Jaramillo, O. (1998). *Transporte de energía solar concentrada a través de fibras ópticas: Acoplamiento fibra-concentrador y estudio térmico*. México: Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Justus J.D. Tarpley, C. & Paris, V. (1986). Satellite Measured Insolation in the United States, Mexico, and South America. *Remote Sensing of Environment*, 20, 57-83.
- Kasten, F & Young, A. (1989). Revised optical air mass tables and approximations formula. *Applied Optics*, 28, 4735-4738.
- Kasten, F. (1996). The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness. *Solar Energy*, 56, 239-244.
- Kegel, S. & Heidt, F. (1996). Mapping of global radiation with Meteosat. *Solar Energy*, 58, 77-90.
- Laguarda, A. (2018). Modelo Semi-empírico simple de radiación solar global a partir de imágenes satelitales GOES. *Trabajo sometido a revisión para presentación en el VII congreso Brasileiro de Energía Solar*, (págs. 2-10). Brasil, Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/325402180_MODELO_SEMI-EMPIRICO_SIMPLE_DE_IRRADIACION_SOLAR_GLOBAL_A_PARTIR_DE_IMAGENES_SATELITALES_GOES.
- Moussu, G., Diabaté, L., Obrecht, D. & Wald, L. (1989). A method for the mapping of the apparent ground brightness using visible images from geostationary satellites. *International Journal of Remote Sensing*, 10, 1207-1225.
- NOAA. (2019). NOAA. Obtenido de Star Center for Satellite Applications and Research: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/spb/fwu/homepage/GOES_Imager_Vis_OpCal.php
- Noia, M., Ratto, C.F. & Festa, R. (1993). Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: I statistical models. *Solar Energy*, 51, 449-456.
- Olcoz, A. (2014). *Implementación del método Heliosat para la estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite*. Pamplona España: Centro Nacional de Energías Renovables Cener.
- OMM. (2014). *Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación*. San Petersburgo: Organización Meteorológica Mundial OMM.
- OSCAR. (2011). *Observing Systems Capability Analysis and Review Tool*. Obtenido de OSCAR: <http://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/879>
- Ovalle, L & García, W. (2017). *Modelo para determinar la irradiancia solar en diferentes zonas del territorio Colombiano a partir de imágenes aéreas o satelitales*. Bogotá: Tesis de Maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

- Pelkowski, J. (2007). El albedo terrestre. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 31, 499-520.
- Pelkowski, J. (2018). Meteorología física avanzada. *Apuntes de clase*. Bogota, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Pelkowski, Joaquín. (2009). A physical rationale for generalized Ångström–Prescott regression. *Solar Energy*, 83, 955-963.
- Petty, G. (2006). *A first course in atmospheric radiation*. Madison, Wisconsin: Sundog Publishing, 472.
- Polo, J. (2010). *Optimización de modelos de estimación de la Radiación solar a partir de imágenes de Satélite*. Madrid: Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.
- Prescott, J. (1940). Evaporation of a water surface in relation to solar radiation. *Transaction of the Royal Society of South Australia*, 64, 114-118.
- Righini, R. (2004). Empleo de Imágenes Satelitales GOES 8 en el Cálculo de la Irradiación Solar Global en Distintas Zonas de Argentina (2004). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 8, 1-6.
- Rigollier, C., Lefevre, M., Cros, S. & Wald, L. (2002). Heliosat 2: An improved method for the mapping of the solar radiation from METEOSAT imagery. *Eumetsat Meteorological Satellite Conference, Sep 2002, Dublin, Ireland*, p, 585-592.
- Rodríguez, H. (2009). Development of Solar Energy in Colombia and its Prospects. *Revista de Ingeniería*, 28, 83-89.
- Rodríguez, M. (2004). *Meteorología y Climatología*. España: Fundación española para la ciencia y la tecnología Fecyt.
- Rubio, M., Lopez, G., Tovar, J. & Batlles, F. (2003). Estimación de los valores horarios de radiación directa mediante una modificación del modelo Heliosat. *Trabajo sometido a revisión para presentación en el X Congreso de Teledetección*, (págs. 349-352). España, Tomado de:
<http://www.aet.org.es/congresos/x/cac79.pdf>.
- Sandoval, I. (2014). *La política europea de renovables y su influencia en España y el Reino Unido*. España: Estudios de Progreso. Fundación Alternativas.
- Schmetz, J. (1989). Towards a surface radiation climatology: Retrieval of downward irradiances from satellites. *Atmospheric Research*, 23, 287-321.
- Schulze, K & Heidt, F. (1996). Mapping of global radiation with METEOSAT. *Solar Energy*, 58, 77-90.

-
- Selmin, E. (2018). Modeling and analysis of global and diffuse solar irradiation components using the satellite estimation method of Heliosat. *CMS Computer Modeling Engineering & Sciences*, 115(3), 327-343.
- Spencer, J. (1971). Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 2, 171-172.
- Suárez, A., Abal, G., Muse, P. & Siri, R. (2014). Satellite-derived solar irradiation map for Uruguay. *Energy procedia*, 57, 1237-1246.
- Suárez, D. (2013). *Evaluación de la radiación solar en Bogotá a partir de imágenes del satélite Goes*. Bogotá: Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Tarpley. (1979). Estimating Incident Solar Radiation at the Surface from Geostationary Satellite Data. *Journal of Applied Meteorology*, 18, 1172-1181.
- Upme. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética-UPME.
- Zarco, P., Ariza, F. & Lopez, R. (1996). Métodos de obtención de la radiación solar mediante teledetección: órbita polar vs órbita geoestacionaria. *Espacio y desarrollo*.
- Zarzalejo, L. (2006). Estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 10, 71-78.
- Zarzalejo, L., Ramirez, L. & Polo, J. (2006). Irradiancia solar a partir de imágenes de satélite. Hacia un nuevo atlas ibérico de radiación solar. *Trabajo sometido a revisión para presentación en el CIES 2006-XIII Congreso Ibérico eVIII Congreso Ibero-Americano de Energía Solar 9-10 Noviembre 2006, Lisboa Madrid*, Tomado de:
https://www.researchgate.net/publication/290946311_IRRADIANCIA_SOLAR_A_PARTIR_DE_IMAGENES_DE_SATELITE_HACIA_UN_NUEVO_ATLAS_IBERICO_DE_RADIACION_SOLAR.