

# Utilización de imágenes GOES en el cálculo de radiación solar en la Región Sur del Ecuador

## Use of Images GOES in the Calculation of solar Radiation in Ecuador South Region

Orlando Alvarez<sup>1\*</sup>,  
Thuesman Montaña<sup>2</sup>,  
Jorge Maldonado<sup>2</sup>,  
Luis Luna<sup>3</sup>

<sup>1</sup>. Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, Universidad Nacional de Loja. Proyecto Prometeo, SENESCYT. \*Autor para correspondencia: orlando21alvarez@gmail.com

<sup>2</sup>. Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, Universidad Nacional de Loja.

<sup>3</sup>. Egresado de la Carrera de Electromecánica. Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables, Universidad Nacional de Loja.

Recibido 10 de junio 2014; Aceptado 03 Septiembre 2014

### Resumen

Se presenta una aproximación a la radiación solar posible a obtener en las provincias de El Oro, Loja y Zamora Chinchipe, Región Sur de Ecuador (RSE) utilizando imágenes del Satélite Geostacionario GOES-Este, y los datos de radiación global obtenidos en una red de cinco estaciones automáticas ubicada en la RSE a partir de las cuales se obtuvo un modelo teórico, mediante análisis de regresión múltiple entre las bandas RGB (Red, Green, Blue) de las imágenes Visible e Infrarroja del GOES y los datos instantáneos de radiación global en las estaciones. Se presentan los datos de radiación global para una muestra independiente de días seleccionados, así como mapas de radiación global en la RSE para los días seleccionados. Se comparan con resultados obtenidos mediante modelos teóricos. Se dan conclusiones y se formulan recomendaciones.

**Palabras clave:** Satélites Geostacionarios, imágenes visibles e infrarrojas, radiación solar global.

### Abstract

An approach is presented to the solar radiation possible to obtain in the provinces El Oro, Loja and Zamora Chinchipe, South Region of Ecuador (RSE) using images of the Geostationary Satellite GOES-East, and the data of global radiation obtained in a net of five automatic stations located in the RSE from which a theoretical model was obtained, by means of multiple regression analysis among the bands RGB (Red, Green, Blue) of the Visible and Infrared images of the GOES and the instantaneous data of global radiation in the stations. The data of global radiation are presented for an independent data set of selected days, as well as maps of global radiation in the RSE for the selected days. They are compared with results obtained by means of theoretical models. Conclusions are given and recommendations are formulated.

**Key words:** Geostationary satellites, visible and infrared images, global solar radiation.

## Introducción

Como parte del Proyecto 754 “Desarrollo de modelos espacio-temporales de variables solares y eólicas para estimar el potencial energético en la Región Sur del Ecuador” auspiciado por la Secretaría Nacional de Educación, Ciencia y Tecnología (SENESCYT) y la Universidad Nacional de Loja (UNL), y considerando las dificultades para la obtención de datos de radiación solar para toda el área comprendida dentro de la Región Sur de Ecuador (RSE) y, conociendo, además, las posibilidades que se podrían explotar utilizando información satelital, se planteó el presente trabajo de investigación como una tarea adicional dentro de aquellas planteadas en el Proyecto Original.

El programa de satélites GOES fue desarrollado por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) de Estados Unidos, principalmente para poder entregar imágenes meteorológicas en tiempo cuasi real. Una vez en órbita, el manejo diario pasa de la NASA a la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

NOAA opera dos satélites geostacionarios que proveen observación continua sobre el Ecuador en las posiciones orbitales 75°W y 135°W. La rutina de toma de imágenes del continente se repite en intervalos de 15 minutos, y puede ser operada en exploraciones de porciones de la tierra en ciclos de 5 o de un minuto si alguna contingencia o emergencia así lo amerita.

Los satélites geostacionarios están ubicados en un punto fijo de la “órbita geostacionaria”, situada a una altura cercana a los 35800 km del ecuador terrestre. Permiten la observación continua de un área geográfica las 24 horas del día, ya que completan en este tiempo una órbita alrededor de la Tierra.

Hay cinco canales de imágenes en el satélite: canal visible (0.55-0.75  $\mu\text{m}$ ) con un punto de resolución sub-satélite de 1 km.; un canal mid-IR 1 (3.80-4.00  $\mu\text{m}$ ) en resolución de 4 km.; un canal de vapor de agua (6.50-7.00  $\mu\text{m}$ ) en resolución de 8 km.; y dos de 4 Km. los canales IR en 10.2-11.20  $\mu\text{m}$  y 11.50-12.50  $\mu\text{m}$ , respectivamente (Schmit, T.J., J. Li, y otros; 2008).

Las imágenes del satélite GOES contienen una valiosa información debido a su continua entrega de datos (cada treinta minutos) de una misma región en el globo. Gracias a esta característica dichas imágenes son usadas por diferentes instituciones nacionales, e internacionales, para el monitoreo

continuo de las condiciones atmosféricas de nuestro planeta.

Algunas instituciones han logrado, usando softwares especializados, sacar provecho a esta información y poder así detectar zonas convectivas, estimar vientos, precipitación, temperatura superficial del mar, etc. (Mosquera Vásquez; 2006).

En el presente trabajo se utilizan las 3 bandas correspondientes a los sensores Visible (RMTC - Sector 3 - Ch 1 – Visible) e Infrarrojo (RMTC - Sector 3 - Ch 4 - Thermal Infrared) de este satélite para, utilizando los datos reales de radiación global medidos en cinco estaciones terrestres, tratar de obtener modelos que permitan calcular los valores de radiación global a partir de estos sensores para la Región Sur de Ecuador. En la figura 1 se muestran las áreas de cobertura de los satélites GOES Oeste y Este. En nuestro trabajo se utiliza el satélite correspondiente a la zona Este.

Debido a la frecuencia y las características de las imágenes producidas por los sensores Visible e Infrarrojo, en teoría es posible obtener correlaciones entre los niveles digitales y los valores de radiación global.

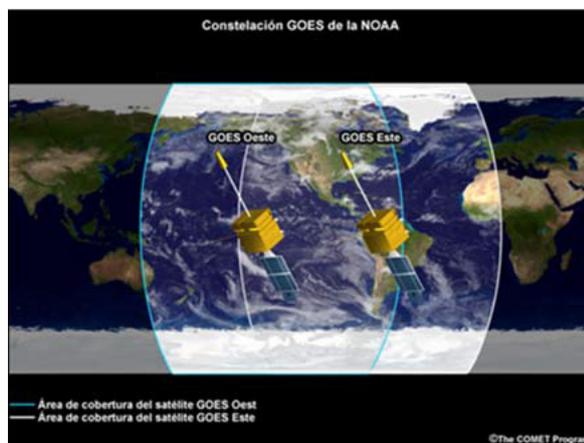


Figura 1. Áreas de cobertura de los satélites GOES

El uso de imágenes de satélite para el cálculo de la radiación solar, presenta grandes ventajas, destacándose sobre todas:

- Los satélites ven simultáneamente grandes áreas de terreno, lo que permite conocer la distribución espacial de la información, así como determinar diferencias relativas de unas zonas a otras.
- Cuando la información disponible (imágenes de satélite) es superponible, es decir, corresponde a la misma área, es posible estudiar la evolución de los valores en un píxel de la imagen, o en una zona geográfica concreta.

– Es posible conocer situaciones anteriores en caso de disponer de imágenes de satélite almacenadas de momentos precedentes.

### Materiales y métodos

A continuación se expondrán los principios de la estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite. Esta metodología se destaca entre todas las demás de estimación de la radiación solar, siendo la herramienta recomendada por la Organización Meteorológica Mundial para la estimación de la radiación solar en ocasiones de ausencia de medidas radiométricas.

Para aplicar esta metodología se necesita la utilización de imágenes de satélite que contengan la zona de estudio. La metodología que se utiliza para la evaluación de la radiación solar a partir de los satélites meteorológicos geoestacionarios, se basa en la estimación de la radiación solar (en todo su espectro) a partir de la información del radiómetro del satélite en cuestión, que tiene un ancho de banda característico.

Como resultado de la resolución no homogénea de las imágenes de los satélites geoestacionarios, estas imágenes no tienen una proyección determinada, siendo necesaria su proyección para cualquier superposición de información o localización en la imagen de puntos de coordenadas conocidas en alguna de las proyecciones usuales (coordenadas geodésicas o UTM).

En el tratamiento de imágenes de satélite para el cálculo de la radiación solar, una imagen es en realidad una tabla de valores que representan el valor detectado por el radiómetro del satélite en un área de terreno determinada. Como diferencia fundamental con las medidas piranométricas, la metodología de tratamiento de imágenes de satélite proporciona una estimación simultánea de un amplio territorio, detectando diferencias relativas de unos lugares a otros en un mismo instante y con un mismo sensor. Asimismo, suministra información de los puntos intermedios entre lugares de medida.

Este hecho sería prácticamente imposible de conocer de otra forma, ya que para alcanzar con medidas piranométricas las mismas resoluciones que con el procesamiento de imágenes de satélite habría que disponer de un piranómetro cada (7x7) ó (4x4) km aproximadamente, dependiendo de las imágenes utilizadas.

En la mayoría de los estudios que han comprobado estos modelos, a través de la comparación de los resultados con datos terrestres, se ha demostrado que el error de estimación de la radiación solar era comparable con los errores proporcionados por las medidas piranométricas.

Aun así, hay una serie de problemas importantes en la comparación de datos de satélite con medidas terrestres:

- Errores en la localización de las medidas piranométricas en las imágenes del satélite.
- Los datos de satélite son medidas sobre un pequeño ángulo sólido de visión, mientras que las medidas de tierra están integradas en un ángulo sólido de  $2\pi$ .
- La información que llega de una imagen es de naturaleza instantánea, mientras que se busca la estimación de la radiación en un periodo horario o diario.
- La respuesta espectral del sensor del satélite no corresponde exactamente con la respuesta de un piranómetro convencional, aunque esto dependerá del satélite empleado.

### Principios básicos

Básicamente el propósito de todos los modelos de estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite es estimar la irradiancia global en cada píxel de la imagen:

$$G_i = (X, Y, d, h) \quad (1)$$

Donde (x,y) representan las coordenadas del píxel en la imagen (que se corresponden con unas coordenadas (X,Y) en la superficie de la tierra. d y h son el día y la hora de adquisición de la imagen.

Este valor de irradiancia global es calculado en cada píxel a partir del valor de irradiancia original de la imagen. Esto es posible basándonos en el balance energético del sistema Tierra-atmósfera (Figura 2):

De donde se puede deducir que la radiación global (IG) puede expresarse como:

$$I_{0e} = (I_{0s} + I_{ts}) + E_a + E_t \quad (2)$$

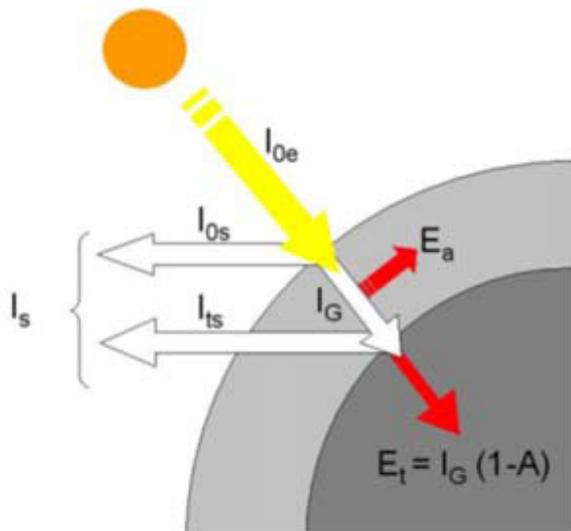


Figura 2. Balance energético en el sistema tierra – atmósfera

Posteriormente, a partir de la integración de varias irradiaciones, dependiendo del número de imágenes disponibles a lo largo del día se puede calcular el valor de irradiación diaria según:

$$G_{di} = (X, Y, d) \quad (3)$$

El uso de datos de satélite para la estimación de la radiación solar, representa una alternativa válida a las medidas terrestres de esta variable. Los modelos existentes pueden clasificarse en modelos físicos y estadísticos, dependiendo de la aproximación utilizada para tratar la interacción entre la radiación solar y la atmósfera.

Los modelos estadísticos están basados en una o más relaciones, tratadas generalmente como regresiones estadísticas, entre las medidas piranométricas de la radiación solar y el valor de la cuenta digital simultánea del satélite para la localización correspondiente al sitio del piranómetro. Esta relación es asumida válida y a continuación utilizada para la estimación de la radiación solar en la superficie terrestre para la región entera en consideración.

La mayor ventaja de los modelos estadísticos es su simplicidad, dada por el uso del valor del nivel digital del satélite directamente y la no necesidad de convertir estos valores en una densidad de flujo de la radiación solar emergente. Además, estos modelos no precisan normalmente de medidas meteorológicas complementarias.

La mayor limitación de los modelos estadísticos es la necesidad de datos terrestres de radiación

solar y la falta de generalidad. No hay garantías de que los coeficientes de las regresiones tengan los mismos valores en otras áreas.

Los modelos físicos, por otra parte, están basados exclusivamente en consideraciones físicas que permiten que los intercambios de energía radiante que tienen lugar dentro del sistema Tierra-atmósfera sean representados explícitamente. Principalmente, se consideran los coeficientes de dispersión y absorción de los componentes de atmósfera clara, el albedo de las nubes y los coeficientes de absorción de las mismas, y el albedo superficial.

La principal ventaja de los modelos físicos, en comparación con los modelos estadísticos, es su naturaleza generalista ya que no dependen de una región particular y pueden ser aplicados en cualquier lugar. Sin embargo, los modelos físicos precisan datos meteorológicos complementarios para determinar la interacción de la radiación solar con la atmósfera. Otro inconveniente de estos modelos es que el valor de la cuenta digital del satélite necesita ser convertido en la correspondiente densidad de flujo de la radiación solar saliente.

### Obtención y organización de las imágenes Visibles e Infrarrojas de los satélites GOES

La descarga de imágenes se realizó a partir de la información que proporciona el satélite GOES en la web y seleccionando los canales 1 y 4 en el sector 3 (<http://rammb.cira.colostate.edu/ramstdis/online/rmtc.asp>) que se corresponden con la zona donde se encuentra la República del Ecuador (Figura 3).

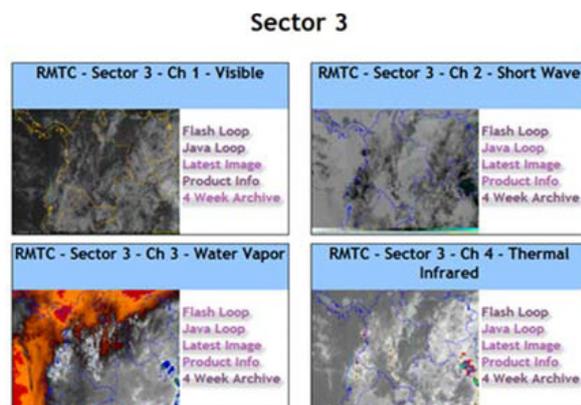


Figura 3. Página Web correspondiente al Sector 3 del Satélite GOES – ESTE



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
3555	31-Aug-13	1	19:45	175	175	175	166	166	166						
3556	31-Aug-13	1	20:15	133	133	133	154	154	154						
3557	31-Aug-13	1	20:45	136	136	136	171	171	171						
3558	31-Aug-13	1	21:15	129	129	129	166	166	166						
3559	31-Aug-13	1	21:45	78	78	78	155	155	155						
3560	31-Aug-13	1	22:15	79	79	79	160	160	160						
3561	31-Aug-13	1	22:45	42	42	42	156	156	156						
3562	31-Aug-13	1	23:15	0	0	0	156	156	156						
3563															
3564	FECHA	ESTACIÓN		visibles			infrarrojos								
3565	31-Aug-13	2	11:15	0	2	0	138	143	137						
3566	31-Aug-13	2	11:45	21	26	20	138	143	137						
3567	31-Aug-13	2	12:15	26	31	25	129	134	128						
3568	31-Aug-13	2	12:45	37	42	36	122	127	121						
3569	31-Aug-13	2	13:15	39	44	38	118	123	117						
3570	31-Aug-13	2	13:45	47	52	46	120	125	119						
3571	31-Aug-13	2	14:15	50	55	49	103	108	102						
3572	31-Aug-13	2	14:45	54	59	53	105	110	104						

Figura. 6. Ejemplo de hoja de cálculo

En este software, se ha diseñado un procedimiento para construir un modelo estadístico que describa el impacto de dos o más factores cuantitativos sobre una variable dependiente Y. El modelo fijado puede ser utilizado para realizar predicciones, incluyendo los límites de confianza y/o límites de predicción.

La forma general del modelo es la siguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \dots + \beta_kX_k \quad (4)$$

Donde k es el número de variables independientes. Además se obtienen los siguientes tipos de residuales

1. Residuales: Son los residuales a partir del modelo mínimo cuadrado ajustado. –
2. Residuales Estudentizados: Corresponden a la diferencia entre los valores observados y cuando el modelo es calculado utilizando todas las observaciones excepto la i-ésima, dividida entre el error estándar estimado. Este residual es denominado en ocasiones como residuos externamente eliminados, ya que mide cuán alejado está el valor del modelo fijado cuando se utilizan todos los datos excepto el punto en consideración. Este residual es importante debido a que valores grandes pueden afectar el modelo.

Los valores de residuales estudentizados mayores que tres en valor absoluto responden a puntos con valores superiores

a tres veces la desviación estándar a partir del modelo fijado, lo cual es muy raro para distribuciones normales.

### Resultados

Los modelos de regresión con mejor coeficiente de determinación se obtuvieron a partir de la correlación entre el canal R de las imágenes visibles y el canal B de las infrarrojas.

Se consideraron los residuales estudentizados de predicción superiores a 2,5 en valor absoluto (superiores a 2,5 veces la desviación estándar a partir del modelo fijado) como erróneos sustituyendo los mismos por el valor pronosticado en la ecuación de regresión, mejorándose el modelo obtenido anteriormente (Figura 7) y quedando el modelo en la forma siguiente:

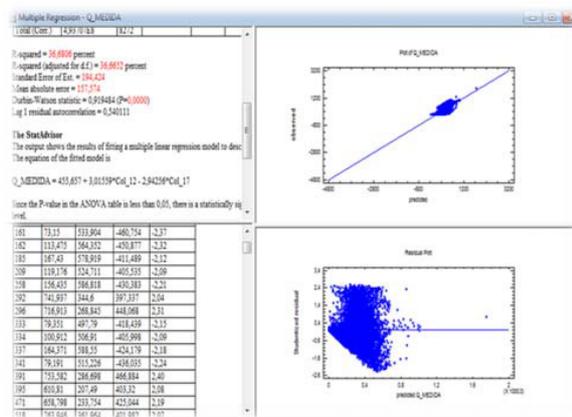


Figura. 7. Ejemplo de obtención de ecuación de regresión múltiple.

La ecuación de regresión múltiple con mejor coeficiente de determinación ( $\approx 0,37$ ) y un coeficiente de correlación múltiple igual a 0,60564511 resultó ser la siguiente:

$$Q = 455,657 + 3,01559*B1 - 2,94256*B2 \quad (5)$$

Donde las incógnitas B1 y B2 correspondieron a las bandas R de la imagen visible y la B de la imagen infrarroja respectivamente para cada imagen seleccionada.

A partir de las imágenes de radiación global obtenidas, que son representativas de la radiación global para cada hora y día, se pueden calcular las marchas diarias, mensuales y anuales de la radiación global para la zona del proyecto.

Ya extraídos los datos calculados a través de las imágenes satelitales se procedió a comparar con los datos reales de las estaciones meteorológicas automáticas para poder emitir un criterio sobre los errores.

Se tomaron las imágenes Visible (Figura 8) e Infrarroja (Figura 9) correspondientes al día 21 de febrero de 2014, de las 12:45 a.m. (17:45 UTC), las cuales fueron georreferenciadas, y cortadas y posteriormente se aplicó el comando de multiplicación, utilizando la ecuación (4) a las

bandas R del Visible y B del Infrarrojo a fin de obtener una imagen de Radiación global de acuerdo con el modelo calculado mediante regresión lineal múltiple.

Una vez obtenida la imagen de Radiación Global, se tomaron los valores ubicados en las coordenadas de las estaciones automáticas UNL, Zapotepamba y Padmi, y se compararon con los valores reales medidos a las 18:00 UTC (13:00 HL), calculando un valor promedio mediante el cual se obtendrían los valores más próximos a los reales en cada estación, procesando la imagen de Radiación Global dividida por el coeficiente calculado y se llegó a la imagen final que se muestra en la figura 10. El error que se comete en cada estación y como promedio se muestra en los cuadros 1 y 2.

En el Cuadro 2 se puede observar que con la excepción de la Estación No. 4, las restantes estaciones muestran porcentajes por debajo del 26 % para observaciones horarias. Los errores en esta estación deben estar dados por errores en la georreferenciación, por lo cual sería necesario obtener imágenes referenciadas automáticamente. De igual forma se decidió no considerar la hora correspondiente a las primeras horas de la mañana y final de la tarde (06:15, 06:45, 17:15 y 17:45) toda vez que los valores medidos son muy pequeños y no se corresponden con los calculados por la ecuación.

Long.	Lat.	Est.	Valor Real	Valor Calc.	% Error
-79,19953	-4,029639	UNL	13126,2	11695,85	10,90
-79,77331	-4,045444	ZAP	27423,1	23026,283	16,03
-78,61481	-3,743639	PAD	14118,8	14180,545	-0,44
		Promedio	18222,7	16300,893	10,55

Cuadro 1. Correspondencia entre los valores reales y calculados. 21 de febrero 2014, 11:45 HL

Estación	5/4/2013 (%)	6/4/2013 (%)	Promedio (%)
1	5,01	-6,78	-0,88
2	21,48	-1,49	9,99
3	13,90	-26,75	-6,43
4	34,45	49,02	41,73
5	-4,98	-3,31	-4,14
Promedio (%)	13,97	2,14	8,06

Cuadro 2. Correspondencia entre los valores reales y calculados. Mes de abril 2013

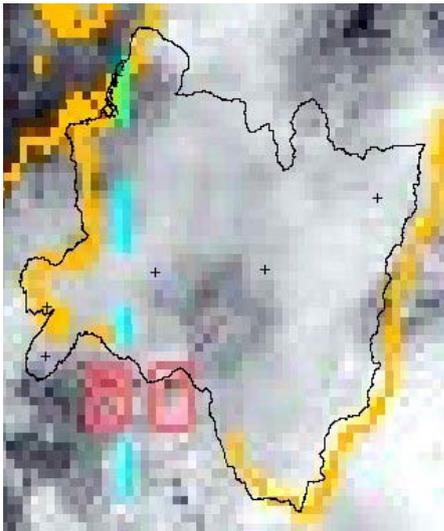


Figura. 8. Imagen Visible correspondiente al 21 de febrero 2014 a las 11:45 HL

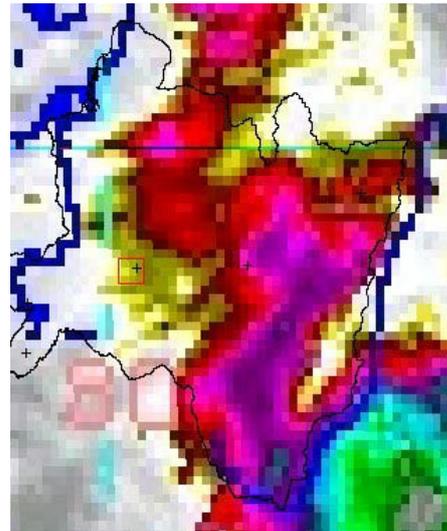


Figura. 9. Imagen Infrarroja correspondiente al 21 de febrero 2014 a las 11:45 HL

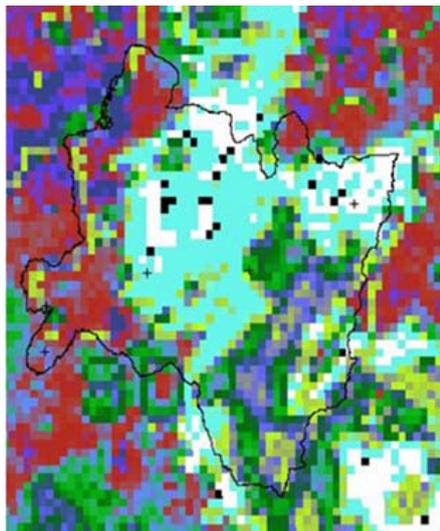


Figura. 10. Imagen de Radiación Global correspondiente al 21 de febrero 2014 a las 11:45 HL

## Discusión

Se puede observar, en los Cuadros 1 y 2, las diferencias existentes en los errores en diferentes fechas y horas, es decir que es necesario continuar trabajando a fin de obtener ecuaciones de regresión múltiple, bien sean lineales o no lineales, que respondan mejor a las condiciones atmosféricas para periodos temporales diferentes.

Por otra parte, los errores que se cometen en la georreferenciación de las imágenes tienen un componente alto en los errores que ocurren al calcular la radiación global a partir de ecuaciones de regresión obtenidas considerando diferentes puntos en la zona donde se deseen obtener esos valores.

Es importante a futuro utilizar metodologías similares para lograr la obtención de nuevos modelos de regresión múltiple, lineales o no lineales, considerando meses individuales, en diferentes momentos del día, y de ser posible utilizando softwares que permitan realizar todo el proceso de forma automatizada. Además es necesario conformar grupos de trabajo especializados para poder realizar aplicaciones de la información satelital posible a obtener. En el caso que nos ocupa permitiría la utilización de imágenes satelitales para la obtención de valores horarios, diarios, mensuales y anuales de forma continua.

## Conclusiones

A partir de imágenes obtenidas de la página Web de la NASA y los valores reales medidos en puntos del territorio, se pudo demostrar que es posible, mediante la utilización de un método estadístico de correlación lineal múltiple obtener valores de radiación solar global horaria con un error de la radiación promedio inferior al 26 %.

Es necesario confeccionar un archivo de imágenes por meses y horas, a fin de realizar estudios más exhaustivos diferenciando por horas y meses, lo cual permitirá obtener ecuaciones más confiables.

De poder contar con los softwares y componentes tecnológicos correspondientes para la obtención de las imágenes georreferenciadas y en tiempo real, el proceso puede ser más sencillo, menos laborioso y más preciso, debido a que en este caso las imágenes ya vendrían georreferenciadas, aunque considerando siempre modelos para zonas reducidas del territorio nacional de Ecuador (por ejemplo una provincia).

## Agradecimientos

Este trabajo científico ha sido financiado por el Proyecto Prometeo de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Ecuador).

## Literatura Citada

Beneficios de la observación ambiental de próxima generación. Versión para imprimir. htm. Disponible en: <http://www.GOES/>

GOES-R (Consultado Diciembre 2013)

Ficha técnica de la familia GOES. Disponible en: [http://www2.elo.utfsm.cl/~elo352/2002/experiencias/electivas/experiencias\\_%20satelitales/goes/goes.htm](http://www2.elo.utfsm.cl/~elo352/2002/experiencias/electivas/experiencias_%20satelitales/goes/goes.htm) (Consultado Febrero 2014)

Hillger, D.W., 2008: GOES-R Advanced Baseline Imager Color Product Development. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 25, 853–872.

Mosquera Vásquez, Kobi A. 2006. Imágenes GOES en GrADS. Grilla regular. Disponible en: <http://www.GOES/GOES8.htm> (Consultado Diciembre 2013)

RAMMB: GOES-West/ GOES-East RAMSDIS online. Disponible en: <http://rammb.cira.colostate.edu/ramsdisk/online/rmtc.asp>. (Consultado Febrero 2014)

Schmit, T.J., J. Li, J.J. Gurka, M.D. Goldberg, K.J. Schrab, J. Li y W.F. Feltz, 2008. The GOES-R Advanced Baseline Imager and the continuation of current sounder products. *J. Appl. Meteor. y Climatol.*, 47, 2696–2711.

Schmit, T.J., M.M. Gunshor, W.P. Menzel, J.J. Gurka, J. Li y S. Bachmeier, 2005. Introducing the next-generation advanced baseline imager on GOES-R. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86, 1079–1096.