

## SPATIAL PREDICTION USING THE TRANSGAUSSIAN KRIGING PARAMETER FOR SOLAR RADIATION ON THE EARTH'S SURFACE

## PREDICCIÓN ESPACIAL USANDO KRIGING TRANSGAUSSIANO DE RADIACIÓN SOLAR EN LA SUPERFICIE TERRESTRE

**Ricardo Castro-Díaz, PhD<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Centro Regional de Geomática – Facultad de Ciencia y Tecnología (FCyT-UADER) Ruta Provincial N° 11. Km 10,5, 3100, Oro Verde, Entre Ríos, Argentina. ircastrod@unal.edu.co

---

**ABSTRACT.** In today's world, knowledge of the local climatic and environmental conditions, especially the dynamics of solar radiation, plays an important role in climate change scenarios developed by international organizations. The need for energy supply in a renewable and sustainable form creates a challenge for data satellite management and its integration to applied research. This article presents the development of the geostatistical method for correcting outliers of solar radiation emitted in a 7.5 km<sup>2</sup> field using a 150 m<sup>2</sup> quadrangular grid. The atmospheric processes that block the arrival of a portion of the electromagnetic wave represent a logistic matter for the localisation and potential exploitation of solar farms for energy production in Latin America. The resulting map indicates changes in the explained variable due to independent conditions of the vegetal cover; it depicts two different sectors (A and B) for the estimated comparison in the same area.

**KEY WORDS.** Solar irradiance. Kriging. Remote Sensing. Emissivity. Radiance.

**RESUMEN.** En el mundo actual, el conocimiento de las condiciones ambientales y climáticas a nivel local, en especial la dinámica de la radiación solar, juega un rol importante frente a los escenarios de cambio climático descritos por organismos internacionales. La necesidad de generar energía de forma renovable y sustentable presenta un desafío directo sobre el manejo de los datos satelitales y su integración a la investigación aplicada. Este artículo presenta el desarrollo del método geoestadístico para la corrección de valores anómalos de radiación solar emitida en un área de 7,5 km<sup>2</sup> usando una grilla cuadrangular de 150 m<sup>2</sup>. Procesos atmosféricos que bloquean la llegada de parte de la onda electromagnética son un tema logístico para la localización y el aprovechamiento potencial de granjas solares para la producción de energía en la región latinoamericana. El mapa resultante indica cambios en la variable estudiada debido a condiciones independientes de la cobertura vegetal explicitando dos sectores (A y B) para la comparación del estimado en la misma zona.

**PALABRAS CLAVES.** Radiación Solar. Kriging. Teledetección. Emisividad. Radiancia.

Recibido: 25 de Julio de 2017  
Aceptado: 7 de Noviembre de 2017

## INTRODUCCIÓN

El estudio de la radiación solar comprende diferentes aspectos de la climatología, la meteorología, el cambio climático y las ciencias de la Tierra que requieren la obtención de datos necesarios para conocer las dinámicas temporales de la atmósfera terrestre (Brown *et al.*, 1997; Kocifaj, 2009; Nair y Moorthy, 1997) responsables de cambios en las condiciones del tiempo meteorológico (Basiouny, 1986; Ertekin y Evrendilek, 2007; Myagkova *et al.*, 2009; Seidlitz *et al.*, 2001), la vegetación natural y proyección de los estados fenológicos de cultivos agrícolas (Basiouny, 1986; Singh, 1995), la distribución espectral y reflexión con la superficie (Jacovides *et al.*, 2004; Wang y Li, 2009), temperatura del aire (Castro-Díaz, 2013) y los efectos sobre la salud (Lim y Cooper, 1999; Mendoza y de la Peña, 2010; Parisi y Wong, 2000)

El sol es la estrella con mayor aportación de ondas electromagnéticas en el balance energético de la Tierra y su dinámica se conoce a través de la Ley de Planck (Ulrickson, 1986) donde se estipula la intensidad de la radiación emitida y sus efectos sobre el fenómeno de la temperatura:

El total de la emisión de un cuerpo negro (Sol) está relacionada directamente con su temperatura y es transferida sobre los elementos terrestres ( $0 < \epsilon(\lambda) < 1$ ). Esto indica que la emisividad espectral  $\epsilon(\lambda)$  es la relación entre la radiancia emitida por un objetivo en una longitud de onda  $\lambda$  y es emitida por un cuerpo negro en la misma temperatura.

De la evaluación de las emisiones totales depende la estimación de los efectos atmosféricos sobre la onda electromagnética. Los atributos de absorptividad, reflectividad y transmisividad en los modelos numéricos no son espacialmente cuantificables cuando se usan los métodos tradicionales de la meteorología de registración de radiación solar (piranómetro, pirheliómetro, actinógrafo y heliógrafo) ya que establecen las mediciones únicamente para un punto específico sobre la superficie. Ante esta situación, los sensores remotos ofrecen un número mucho más elevado de datos para múltiples interacciones como el albedo (Román *et al.*, 2009), radiación solar de la atmósfera superior (Scaramuzza *et al.*, 2004) y radiación a nivel superficial (Hammer *et al.*, 2003; Sheng *et al.*, 2009).

La cuantificación de la ganancia o reducción depende de la constante solar que indica el forzamiento radiativo básico del sistema climático. Cualquier cambio en la constante solar se puede atribuir a tres factores principales: 1) Disminución o aumento de la actividad solar; 2) Presencia o ausencia de gases atmosféricos; y, 3) Presencia o ausencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Frente al primer elemento, el reconocimiento de los periodos del ciclo solar, aproximadamente cada 11 años (Labitzke *et al.*, 2002; Weng) sirve para estimar un

## INTRODUCTION

The study of solar radiation includes different aspects of climatology, meteorology, climate change and the earth sciences that require the obtaining of data necessary to know the temporal dynamics of the earth's atmosphere (Brown *et al.*, 1997; Kocifaj, 2009; Nair and Moorthy, 1997), that are responsible for a variety of changes. These changes can be in weather conditions (Basiouny, 1986; Ertekin and Evrendilek, 2007; Myagkova *et al.*, 2009; Seidlitz *et al.*, 2001), natural vegetation and the projection of the phenological state of agricultural crops (Basiouny, 1986; Singh, 1995), spectral distribution and surface reflexion (Jacovides *et al.*, 2004; Wang y Li, 2009), air temperature (Castro-Díaz, 2013) and effects on health (Lim and Cooper, 1999; Mendoza y de la Peña, 2010; Parisi y Wong, 2000)

The sun as a star is the highest supplier of electromagnetic waves in the energy balance of the Earth and its dynamics and this is known through the Law of Planck (Ulrickson, 1986) where the intensity of the emitted radiation and its effects on the phenomena of temperature is stipulated:

The total emission of a black body (The Sun) is directly related to its temperature and is transferred to the earth's elements ( $0 < \epsilon(\lambda) < 1$ ). This indicates that the spectral emissivity  $\epsilon(\lambda)$  is the relation between the radiance emitted by an object in a longitudinal wave  $\lambda$  and a black body at the same temperature emits this.

The estimation of atmospheric effects on the electromagnetic wave depends upon the evaluation of the total emissions. The attributes of absorptivity, reflectivity and transmissivity in the numerical models are not spatially quantifiable when traditional meteorology methods of solar radiation registration are used (pyranometer, pyrliometer, actinograph and heliograph), given that they establish only the measurements for a specific point upon the surface. In such a situation, the remote sensors offer much more data for multiple interactions such as the albedo (Román *et al.*, 2009), solar radiation of the upper atmosphere (Scaramuzza *et al.*, 2004) and radiation at a superficial level (Hammer *et al.*, 2003; Sheng *et al.*, 2009).

The quantification of the gain or reduction depends on the solar constant that indicates the basic radioactive forcing of the climatic system. Any change in the solar constant can be attributed to three principal factors: 1) Decrease or increase in

error en las mediciones que puedan verse afectadas a razón de la fuerte intervención del polvo solar. El segundo elemento, se puede conocer a través de la cuantificación de la reducción temporal de la radiación solar a la superficie en términos porcentuales siendo el aporte ambiental de las nubes (i.e. masa, la densidad, la altura y la altitud) las de mayor representación. Para el tercero se tiene que la polución en las capas atmosféricas son claves para conocer el aumento de la radiación devuelta al espacio reduciendo la luz solar en la superficie, fenómeno conocido como oscurecimiento global (Stanhill y Cohen, 2001) que incluso puede aumentar diferencialmente la temperatura en algunos ensamblajes urbanos (Castro-Díaz, 2015).

El uso de datos comparativos de radiación solar obtenidos por estaciones terrestres y sensores satelitales ayuda a estimar valores de reflectancia mejorando la robustez de modelos estadísticos espaciales para la detección temprana de incendios, estimación de condiciones y estrés de cobertura vegetal o localizaciones diferenciales de reducción de luz solar causadas por gases atmosféricos.

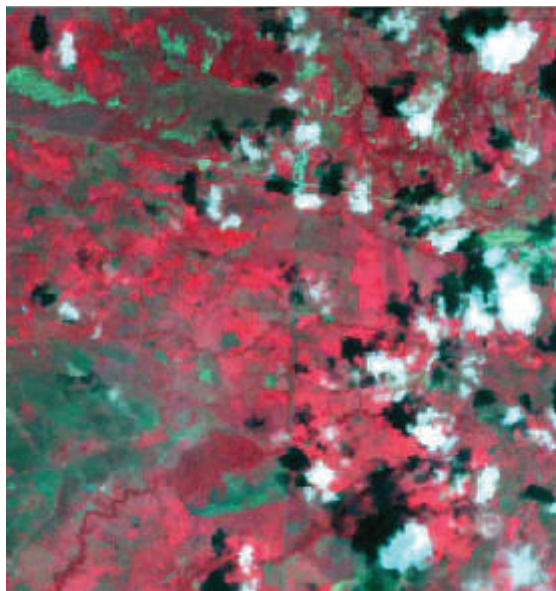
La diversidad de usos y la importancia de capturar un mayor número de datos sobre la reflectancia solar es el objetivo principal de este artículo, que hace uso del análisis geoestadístico usando kriging transgausiano para predecir los valores esperados en zonas sin información del sensor pasivo ETM+ de la plataforma Landsat 7 en sus rangos óptico e infrarrojo.

Con esta evaluación se buscaron dos objetivos específicos: primero, completar series de datos satelitales sobre radiación solar usando los valores de radiancia de la superficie y, segundo, analizar el uso del interpolador kriging para estudios de radiación solar.

El método de Kriging sirve para modelar puntos ubicados en el espacio a través de la estimación de un herramienta de comportamiento espacial conocida como variograma. Éste permite, a partir de la ponderación unidimensional, la estimación de valores desconocidos con base en una variable presente en un espacio dado, en este caso, los espacios vacíos corresponden a sombras y nubes que impiden conocer los valores de la radiación solar sobre la superficie terrestre.

Para esto, se ha seleccionado el área de interés que cuenta con datos satelitales entre los departamentos de Norte de Santander, Cesar, Santander y Bolívar en la República de Colombia y los estados de Zulia y Táchira de la República Bolivariana de Venezuela (Fig.1).

La imagen posee una resolución espacial de 30 m en el sector 8-54 de la grilla Landsat. La distancia solar procesada fue de 1.00119 UA con una elevación solar de 60,34 grados sobre el horizonte ideal. Se seleccionó un área de 7,5 km<sup>2</sup> con base en la necesidad de tener ángulos lambertianos, sin presencia de bandeamiento y con cobertura de nubes inferior al 30%.



**Figure 1.** ETM Image+ (Landsat locality 7: 8-54)  
**Figura 1.** Imagen ETM+ (localización Landsat 7: 8-54)

solar activity; 2) Presence or absence of atmospheric gases; and, 3) Presence or absence of gases having a hibernating effect on the atmosphere.

Given the first element, the recognition of the periods of the solar cycle, approximately every 11 years (Labitzke *et al.*, 2002; Weng) serves to estimate an error of the measurements that could be affected due to the strong intervention of solar dust. The second element, can be known through the quantification of the temporal reduction of solar radiation on the surface in percentage terms, and here, the environmental contribution of clouds (i.e. mass, density, height and altitude) is the most represented. The third element is the pollution is the atmospheric layers which are key to knowing the rise in the radiation returned to space and reducing the solar light on the surface, a phenomenon known as global darkening (Stanhill and Cohen, 2001) that can even raise the temperature differentially in some urban assemblies (Castro-Díaz, 2015).

The use of comparative data of solar radiation obtained by the earth's seasons and satellite sensors help estimate reflectance values improving the robustness of spatial statistical values for the early detection of fires, estimation of conditions and vegetal cover stress or differential localities of light reduction caused by atmospheric gases.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Ya que las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 del sensor ETM+ contienen la información del píxel en número digitales (DN), se procedió a realizar la transformación radiométrica a través el software Erdas Imagine usando la ecuación 1. Estos nuevos valores expresados en  $W/(m^2 \cdot ster \cdot \mu m)$ , indican la radiancia espectral atmosférica superior medida por el sensor por encima de la atmósfera terrestre, lo que define los aportes en los errores de medición debido a aerosoles, nubes y gases.

$$L(\lambda) = \{ [L_{max}(\lambda) - L_{min}(\lambda)] / 255 \} * DN + L_{min}(\lambda) \quad (1)$$

donde  $L(\lambda)$  es la radiancia espectral atmosférica superior (*Radiancia Espectral TOA*) en la apertura del sensor; y  $L_{min}(\lambda)$  y  $L_{max}(\lambda)$ , son las radiancias espectrales que corresponden a  $0 < DN < 255$ .

Una vez realizada esta calibración, la conversión de radiancia en el sensor a la reflectancia planetaria se obtuvo a través de la ecuación 2:

$$\rho = \frac{\pi L(\lambda) d^2}{Es(\lambda) \cos \theta_s} \quad (2)$$

donde,  $\rho$  es la reflectancia planetaria,  $d$  es la distancia Tierra-Sol (en Unidades Astronómicas),  $Es(\lambda)$  es la media de la radiancia solar espectral, y  $\theta_s$  es el ángulo cenit del sol (en grados).

La conversión de la reflectancia planetaria en superficial involucró el uso de un modelo atmosférico general de dispersión estructurado con valores de vapor de agua y aerosoles suspendidos. La dependencia del coseno de la brillantez de la superficie resulta del área de la superficie iluminada por el ángulo sólido de radiación solar entrante con el coseno de los ángulos de elevación del sol, específico solamente para zonas de ángulo lambertiano (Bindschadler *et al.*, 2008).

### Ajuste de Saturación

La saturación en el sensor ETM+ varía en cada una de las bandas afectando directamente la exactitud de los datos, i.e. estructuración de la ganancia (aumentada o disminuida); mientras que la geometría de la iluminación corresponde a valores de elevación del sol y pendiente de la superficie (Bindschadler *et al.*, 2008).

### Análisis geoestadístico

Se estableció una grilla de valores de radiancia continua con valores desde un centroide imaginario cada 30 metros a la redonda donde se encontrase información efectiva. Se realizó el análisis exploratorio de datos usando el Software R Cran Project y eliminando los valores atípicos no consistentes que difieren 0 veces el intervalo intercuartílico (coeficiente 0). Estos fueron causados, principalmente, por estelas de nu-

The diversity of uses and the importance of capturing more data on solar reflectance is the principal objective of this article, which makes use of geostatistical analysis using transgaussian kriging analysis for predicting the values expected in zones without information using a passive platform 7 ETM+ Landsat sensor in its optic and infrared ranges

This evaluation has two specific objectives: firstly, to complete the series of satellite data on solar radiation using surface radiance values and, secondly to analyse the use of interpolating kriging for studies on solar radiation.

The Kriging method serves to model points located in space through the estimation of a spatial behaviour tool known as variogram. This allows, through unidimensional weighting, the estimation of unknown values based on a variable present in a given space. Here the empty spaces correspond to shadows and clouds that impede the calculation of the solar radiation values on the earth's surface.

For this, the selected area of interest that rely on satellite data is between the North of Santander, Cesar, Santander and Bolivar in the Republic of Colombia and the states of Zulia and Táchira if the Bolivarian Republic of Venezuela (Fig. 1).

The image has a spatial resolution of 30 m in sector 8-54 of the Landsat grill. The solar distance processed was 1.00119 UA with a solar elevation of 60,34 grades on the ideal horizon. An area of 7,5 km<sup>2</sup> was selected based on the need for lambertian angles without the presence of bands and with a cloud cover inferior to 30%.

## MATERIALS AND METHODS

Since the bands 1, 2, 3, 4, 5 and 7 of the ETM+ sensor contain the information of the pixel in digital numbers (DN), the radiometric transformation was realised with Erdas Imagine software using the equation 1. These new values expressed in  $W/(m^2 \cdot ster \cdot \mu m)$ , indicate the superior atmospheric spectral radiance, measured by a sensor above the earth's atmosphere, that defines the contributions in the errors of measurement due to aerosols, clouds and gases.

$$L(\lambda) = \{ [L_{max}(\lambda) - L_{min}(\lambda)] / 255 \} * DN + L_{min}(\lambda) \quad (1)$$

where  $L(\lambda)$  is the superior atmospheric spectral radiance (*Spectral Radiance TOA*) at the opening of

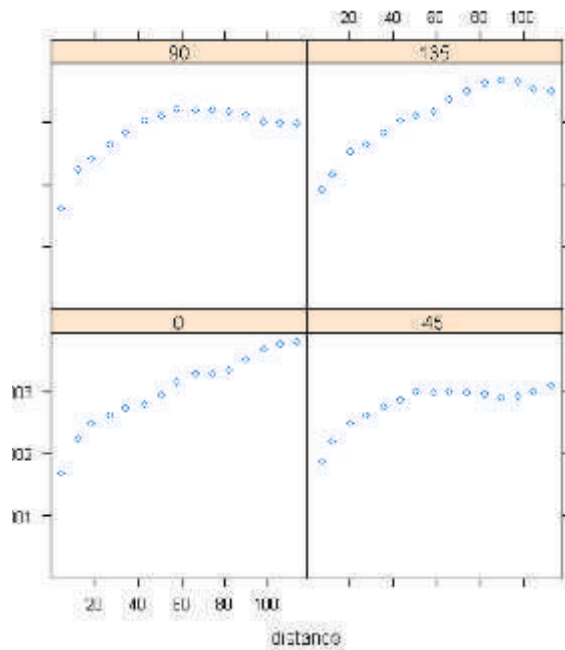


Figure 2. Function of semivariance  
 Figura 2. Función de Semivarianza

bes, deformaciones subpíxel, scattering y sombras y fueron enmascarados como regiones de datos desconocidos o sin información.

De esta manera, se estableció que el rango de los valores de radiancia superiores a 0,135 o inferiores a 0,100 corresponde a nubes y sombras. Un total de 62.500 valores de radiancia fueron dispuestos en una grilla de muestreo cada 150 metros de igual proporción cubriendo 7,5 km<sup>2</sup> del área de estudio. Según las muestras recolectadas el número total de datos fue de 51 por 51 posiciones en x y y, obteniendo 2.090 valores de radiación solar luego de utilizar tres filtraciones por análisis de normalidad.

Se observó anisotropía híbrida (zonal y geométrica) a través de la función de semivarianza (Fig. 2) pero no estacionariedad direccional en alguno de los casos (Fig. 3) dada la función de correlación en x (0,16) y y (-0,34).

La normalización de los datos (ecuación 3) fue aplicada usando la función de transformación Boxcox con potencia  $\lambda = -3,5814$  a través del criterio de máxima verosimilitud. Este proceso le da el nombre de *kriging* por el método interpolador de varianzas que se usa y *transgaussiano* por la transformación sobre los datos originales recreando normalidad.

Aunque la normalización no fue la esperada bajo los test de Pearson, Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilks, Cramer-von Mises o Lilliefors, el bajo coeficiente de asimetría obtenido (0,05) permite la aplicación de

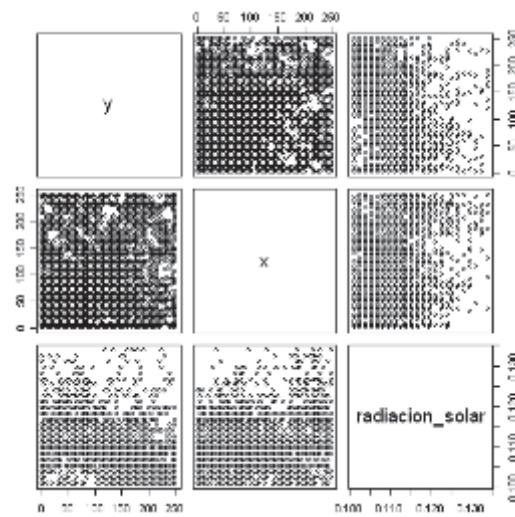


Figure 2. Correlogram  
 Figura 3. Correlograma

the sensor; and  $L_{min}(\lambda)$  and  $L_{max}(\lambda)$ , are the spectral radiances that correspond to  $0 < DN < 255$ .

Once this calibration is realised, the radiance conversion in the planetary reflectance sensor was obtained through the equation 2:

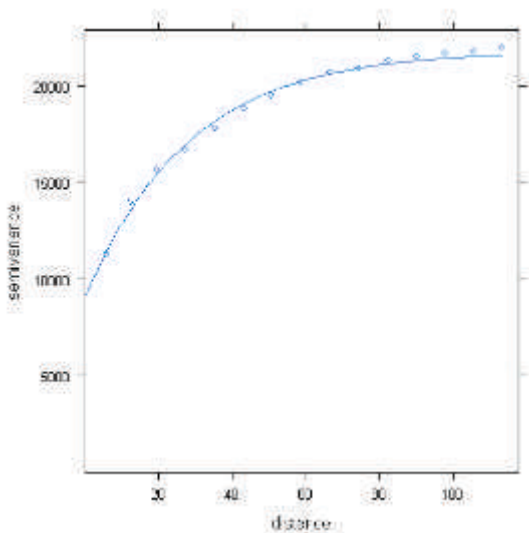
$$\rho = \frac{\pi L(\lambda) d^2}{E_s(\lambda) \cos \theta_s} \quad (2)$$

where,  $\rho$  is the planetary reflectance,  $d$  is the distance Earth-Sun (in Astronomic Units),  $E_s(\lambda)$  is the mean solar spectral radiance, and  $\theta_s$  is the zenith angle of the sun (in degrees).

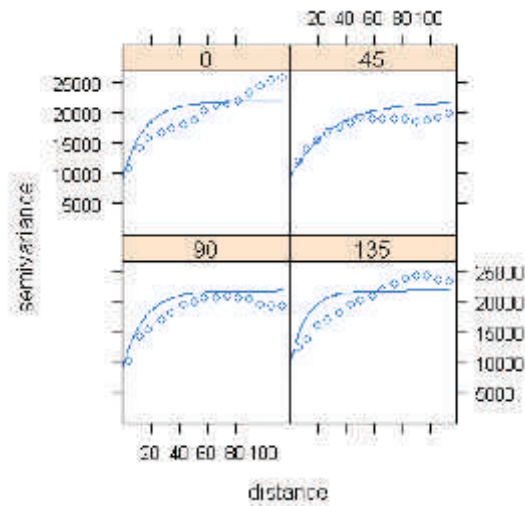
The conversion of planetary reflectance on the surface involved the use of a general atmospheric dispersion model structured with values of water vapour and suspended aerosols. The dependence of the cosine of the brilliance of the surface results is on the area of the surface illuminated by the solid angle of solar radiance with the cosine of the elevation angles of the sun, which are specific only for the zones of lambertian angles (Bindschadler *et al.*, 2008).

### Saturacion Fit

The saturation in the ETM+ sensor varies in each of the bands directly affecting the exactitude of the data, i.e, structuring of what is received (increased or diminished); while the geometry of



**Figure 4.** Graphic semivariogram  
**Figura 4.** Semivariograma gráfico



**Figure 5.** Omnidirectional semivariogram  
**Figura 5.** Semivariograma omnidireccional

técnicas geoestadísticas aunque con problemas de microestructura en el semivariograma no genera conflicto en el procedimiento ni sus resultados.

**Semivariograma**

El mejor ajuste se presentó usando el modelo de semivariograma exponencial (Fig. 4), con 45% de efecto nugget que se permite debido a que la Radiación Solar es un fenómeno con amplia distribución espacial y se redujo la variabilidad de los datos en el rango 0.1 – 0.135, se desestima el efecto. Los valores *psill* y *rango* fueron establecidos en 12788.2 y 38.16182 respectivamente, y se modeló anisotropía a parámetros  $\theta = 45^\circ$ ,  $\phi=0,4$  (Fig. 5)

**Validación Cruzada**

Una vez generado el mapa de predicción usando el método interpolador kriging se procedió a realizar la validación a través de la función cruzada:

Sea  $Z(x)$  una función aleatoria estacionaria con semivariograma  $\gamma(h)$ , su función de covarianza  $C(h)$  (ecuación 6)

$$C(h) = \sigma^2 - \gamma(h) \tag{6}$$

donde,  $\sigma^2$  es la varianza de  $Z(x)$  y  $Z(x)$  son los valores dispersos en  $n$ .

La validación cruzada consiste en suprimir el  $i$ -ésimo valor medido  $Z(x_i)$  y estimarlo a partir del resto de los datos. Este valor estimado  $\hat{Z}(x_i)$  se calcula por el interpolador y su resultado parte del valor final.

the illumination corresponds to elevation values of the sun and slope of the surface (Bindschadler *et al.*, 2008).

**Geostatistical Analysis**

A grill of radiance values was established on an imaginary centroid every 30 metres at the circular point at which effective information would be found. An exploratory analysis of data was carried out using R Cran Project Software and eliminating the atypical inconsistent values that differ 0 times at the interquartile range (0 coefficient). This was caused principally by cloud trails, subpixel deformations, scattering and shadows and they were taken as regions that are unknown or lacking information.

In this way, a range of radiance values superior to 0,135 or inferior to 0,100 and corresponding to clouds and shadows was established. A total of 62.500 values were placed upon a simple grill every 150 metres of equal proportion covering 7,5 km<sup>2</sup> of the study area. According to the samples taken the total data were 51 for 51 positions in  $x$  and  $y$ , obtaining 2,090 solar radiation values after using three filtrations for normalcy analysis.

Hybrid anisotropy (zonal and geometric) was observed through the semivariance function (Fig. 2) lacking directional stationarity in some of the cases (Fig. 3), given the function of correlation in  $x$  (0,16) and  $y$  (-0,34).

The normalisation of the data (equation 3) was

### Retorno de BoxCox a datos reales

Debido a que se realizó una transformación BoxCox de los datos de radiación solar, usando un  $\lambda = -3.5814$  (Máxima Verosimilitud), se efectuó una transformación inversa de los datos predichos sobre el mapa final (Ecuación 7).

$$\zeta = \ell(\ln(\zeta \lambda + 1) / \lambda) \quad (7)$$

donde,  $\zeta$ , es el valor original,  $\zeta$ , es el valor resultante de la transformación BoxCox y,  $\lambda$ , es la potencia sugerido para realizar una transformación los datos a una distribución normal (por el método de máxima verosimilitud).

## RESULTADOS

Para la predicción espacial usando el método de Kriging se verificó la estructura espacial de la malla de muestra (Fig. 6) con un 95% de nivel de confianza.

Teniendo en cuenta la Figura 2 se observó una alta confiabilidad de predicción usando la función de validación cruzada. En la figura 6 se observa los valores de varianza donde la zonas de alto representación son áreas donde varía el dato predicho en 0,05/1, debido a la ausencia de datos.

### Predicción Espacial de la Radiación Solar en la zona de estudio

La Figura 7 muestra las zonas con valores estimados de radiación solar para la imagen seleccionada. Ésta se encuentra dividida en dos bloques, donde A tiene menor reflexión de onda electromagnética superficial en comparación con la zona B.

En la tabla 1 se presenta el registro de la cobertura del suelo de las observaciones señaladas en la figura 7 (recuadros).

Con lo anterior se tiene que las predicciones usando kriging transgaussiano son aceptables en su mayoría mientras que se presentan imprecisiones en las zonas 8 y 9 que fueron finalmente corregidos luego de una segunda etapa de eliminación de valores extremos.

### Mapa Final de Predicciones

En la Figura 8 se muestra el mapa final de predicción de la variable de radiación solar, se utilizó una paleta de colores con el fin de aumentar las diferencias entre los valores (0,1-0,127). Se observan algunos hotspots vinculados a la emisividad debido a la presencia de modificaciones antropogénicas en el ensamblaje total.

### Análisis geográfico de los datos y sus predicciones

Para generar un modelo espacial de la radiación solar sobre la superficie terrestre se requiere de siste-

applied using the Boxcox transformation function with potency  $\lambda = -3,5814$  through the criterion of maximum verisimilitude. This process gives the name of *kriging* for the interpolating method of variances that are used and the term *transgaussian* represents the transformation on the original data that recreate normalcy.

Even though the normalisation was not what was expected under the tests of Pearson, Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilks, Cramer-von Mises or Lilliefors, the low assymetry coefficient obtained (0,05) allows the application of geostatistical techniques and problems of micro structure in the semivariogram did not generate conflict in the processing nor in the results.

### Semivariograma

The best fit was presented using the exponential semivariogram (Fig. 4), with 45% of the nugget effect which is possible owing to Solar Radiation being a phenomenon with ample spatial distribution. The variability of the data was reduced in the 0.1 – 0.135, range and the effect is not taken into account. The values *psill* and *range* were established at 12788.2 and 38.16182 respectively and the anisotropy was modelled at  $\theta = 45^\circ$ ,  $\varphi=0,4$  parametres (Fig. 5)

### Crossed Validation

Once the prediction map is generated using the interpolator kriging method, the validation was carried out using the crossed function:

$Z(x)$  being a random stationary function with semivariogram and  $h$ ), and its covariance function  $C(h)$  (equation 6)

$$C(h) = \sigma^2 - \gamma(h) \quad (6)$$

where,  $\sigma^2$  is the variance of  $Z(x)$  and  $Z(x)$  are the dispersed values in  $n$ .

The crossed validation consists in suppressing the  $i$ -th measured value  $Z(x_i)$  and estimating it based on the rest of the data. This estimated value  $\hat{Z}(x_i)$  is calculated by the interpolator and the result is a part of the final value.

### Return of Boxcox to real data

Owing to the Boxcox transformation of the solar radiation data, using a  $\lambda = -3.5814$  (Maximum Verisimilitude), an inverse transformation of the predicted data was made on the final map (Equation 7).

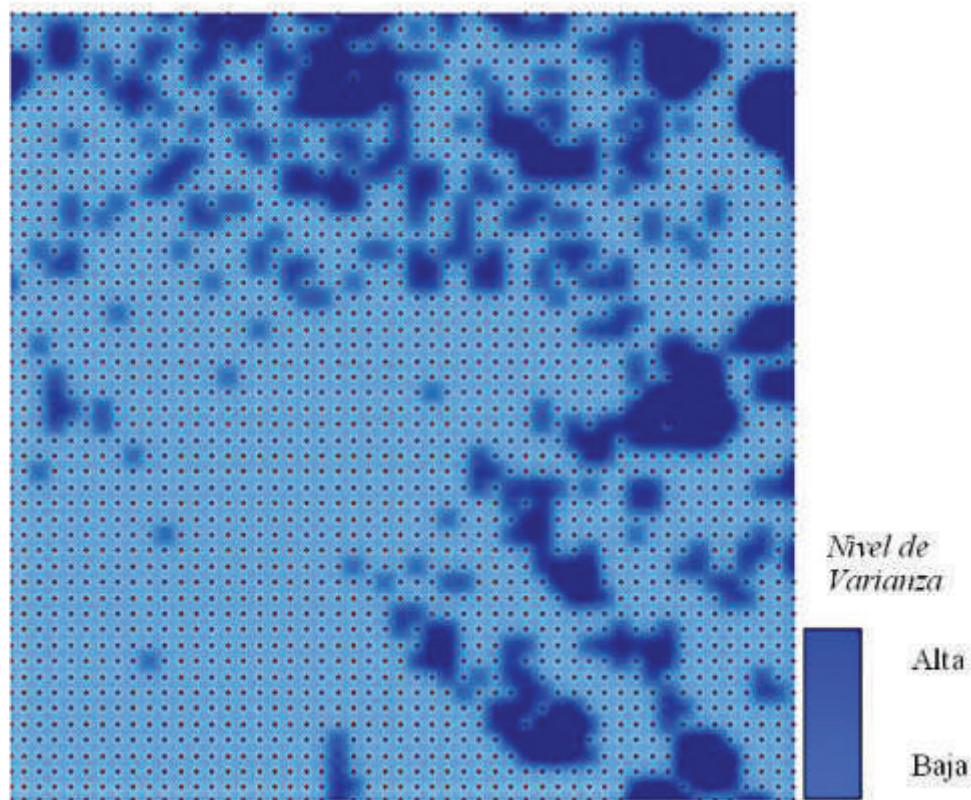


Figura 6. Mapa de varianzas

mas robustos de captura como los sensores remotos satelitales, condición que se cumple ante la iterancia de series temporales y cobertura espacial. En este estudio se realizó la predicción de valores de radiación solar (por emisividad capturada del sensor) en zonas bloqueadas por nubes y sus sombras, que implicaban la imposibilidad de estimar directamente, por lo tanto, el uso del método geoestadístico para poder predecir valores resultó un valioso y exitoso recurso tecnológico para el objetivo del estudio.

El resultado georreferenciado permite encontrar las zonas de mayor exposición en el día (condicionado a posición y elevación del sol) del brillo solar, temperatura y dispersión sobre la superficie de estudio.

### CONCLUSIONES

Continuamente el uso de las herramientas geomáticas en el campo de los sensores remotos, permiten obtener información sobre la superficie de la Tierra. Sin embargo, las falencias propias de los sensores pasivos no contemplan aplicaciones totalmente estructuradas en el espacio, siendo necesario el completado de datos a través de funciones predictoras geoestadísticas como el kriging ordinario y para el caso su derivación transgaussiana.

$$\zeta = \ell(\ln(\zeta \lambda + 1) / \lambda) \quad (7)$$

where,  $\zeta$ , is the original value,  $\zeta$ , is the resulting value of the Boxcox transformation and,  $\lambda$ , is the potency suggested to carry out the transformation of the data with a normal distribution (for the method of maximum verisimilitude).

### RESULTS

For spatial prediction using the Kriging method the spatial structure of the sample mesh was verified (Fig. 6) with a 95% confidence level.

Taking into consideration Figure 2, high confidence in the prediction was observed using the crossed validation function. Figure 6 shows the variance values where the zones of high representation are areas where the predicted data point in 0,05/1 varies due to the absence of data.

Spatial Prediction of Solar Radiation in the study zone

Figure 7 shows the zones with values estimating



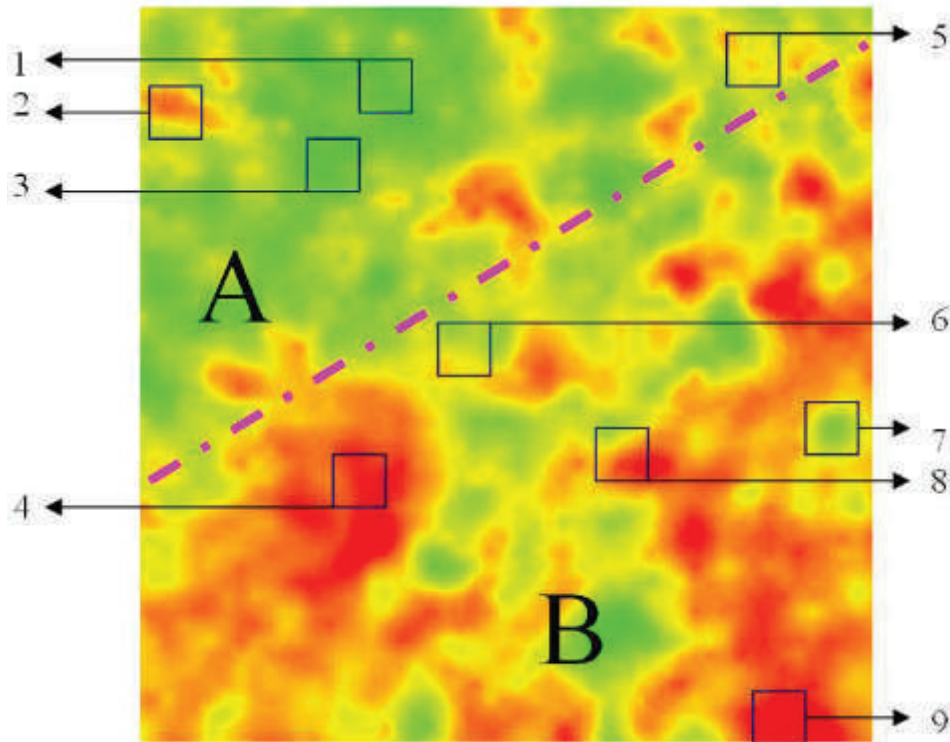


Figura 7. Mapa de predicciones de valores de radiación solar para la zona de estudio.

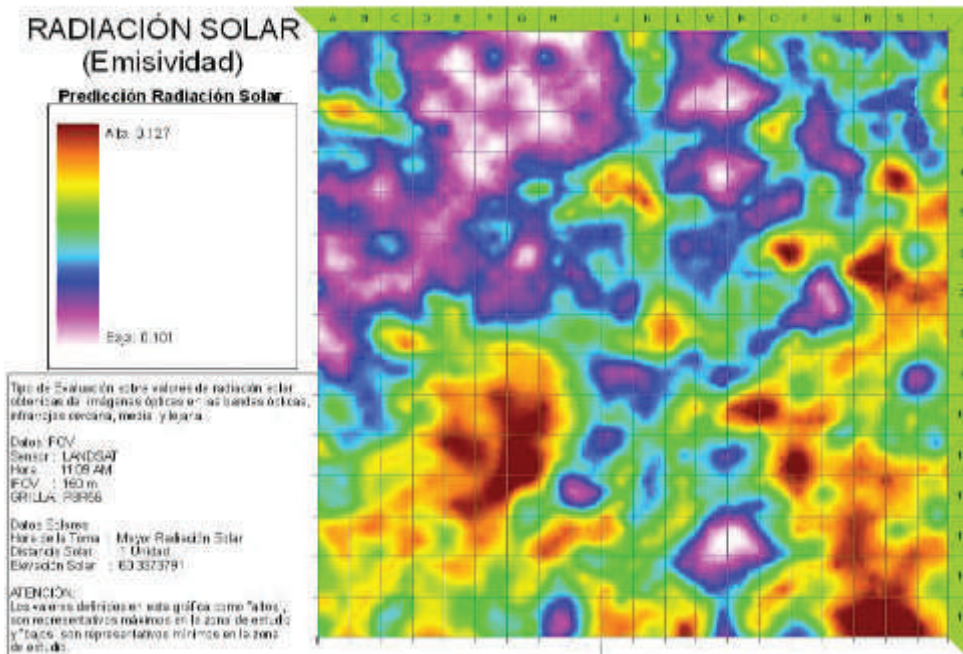


Figura 8. Mapa final de radiación solar usando kriging transgaussiano de la zona de estudio.