

## **MAPAS DE RADIACIÓN SOLAR PARA EL VALLE DE LERMA (SALTA – ARGENTINA)**

Silvina Belmonte<sup>1</sup>, Virgilio Núñez<sup>2</sup>, Judith Franco<sup>3</sup>, José Viramonte<sup>4</sup>  
CONICET - Universidad Nacional de Salta  
IRNED - INENCO – GEONORTE  
Avda. Bolivia 5150 – B° Castañarez – CP 4400 - Salta  
Tel.: 0387-4255438 –  
E-mail: [silvibel@unsa.edu.ar](mailto:silvibel@unsa.edu.ar)

### **RESUMEN**

La radiación solar constituye una variable fundamental para el análisis de alternativas productivas de usos del suelo y evaluaciones específicas del potencial energético para aplicaciones solares. El desarrollo de los mapas de radiación para el Valle de Lerma está basado en la combinación de diversos métodos: cálculo de radiación, tratamiento estadístico y procesamiento SIG. Mediante un muestreo estratificado con la altitud se definieron 200 puntos de cálculo. Los métodos de cálculo utilizados fueron: método de día claro de Hottel, H. C. -para altitudes inferiores a 2500 m.s.n.m- y de día claro de Page -para altitudes superiores a dicha cota-. Se compararon dos métodos de mapeo: interpolación y análisis de correlaciones y regresiones con variables topográficas y de ubicación. La radiación total para día medio, presenta una alta correlación lineal con la altitud y entre meses, por lo que conviene estimar este parámetro para el mapeo, mediante la aplicación de ecuaciones de regresión.

**PALABRAS CLAVES:** Radiación solar, Geosol, Idrisi Kilimanjaro, Topografía, SIG.

### **INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo se enmarca en un proyecto de Ordenación Territorial (OT) y evaluación multicriterio de energías renovables (ER). La idea central del proyecto es analizar posibilidades de implementación de ER en un modelo territorial, ambiental y económicamente sostenible, para el Valle de Lerma. Para el desarrollo de este modelo es necesario en primera instancia disponer de información básica de las múltiples variables físico-naturales y socio-económicas que definen el sistema territorial en estudio.

En este contexto, la radiación solar constituye una variable climática de suma importancia para el análisis de diversos factores relacionados con el ambiente y las energías renovables: cálculo de evapotranspiración, necesidades de los cultivos, alternativas de uso de energías renovables, diseño de aplicaciones de energía solar, entre otras.

Sin embargo, dentro del área de estudio sólo existen series de mediciones de radiación para la localidad de Salta Capital (Servicio Meteorológico Nacional – Período 1950/51 – 1977/80). Se plantea entonces la necesidad de generar modelos digitales del Valle de Lerma para la definición de este parámetro. La metodología de mapeo propuesta en este estudio está basada principalmente en la estimación de la radiación solar de día claro con el programa computacional GEOSOL y el análisis estadístico de los valores calculados en correspondencia con variables topográficas y de ubicación. Todo el proceso es desarrollado en un entorno SIG (Sistemas de Información Geográfica) que permite integrar la información y elaborar los modelos digitales en formato vectorial y raster<sup>5</sup>. Finalmente se plantea la validación de los métodos ensayados con registros de radiación solar y bibliografía específica del tema.

Se plantea además como objetivo del trabajo, el desarrollo de una metodología de mapeo para la variable radiación solar, que pueda transferirse y aplicarse a situaciones geográficas diversas.

---

<sup>1</sup> Becaria CONICET. Investigador Proyecto 1345 CIUNSa: “Ordenación Territorial del Valle de Lerma.”

<sup>2</sup> Director Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo (IRNED). Director Proyecto 1345 CIUNSa.

<sup>3</sup> Investigador adjunto CONICET.

<sup>4</sup> Investigador principal CONICET. Director Instituto GEONORTE.

<sup>5</sup> Espacio segmentado en celdas, en el que cada una de ellas contiene el valor del atributo que representa la variable en estudio.

## METODOLOGÍA

El desarrollo de los mapas de radiación para el Valle de Lerma está basado en la combinación de métodos diversos de: cálculo de radiación, tratamiento estadístico y procesamiento SIG, según se detalla a continuación.

### *Selección del método de estimación de radiación solar*

Para la selección del método de estimación de irradiación solar se confrontaron las variables de entrada requeridas por cada método con los datos disponibles para el área de estudio. Además se analizaron los niveles de precisión de las estimaciones obtenidas para el caso de la localidad de Salta que cuenta con mediciones reales de radiación solar.

Los métodos comparados fueron: método de día claro de Page, método de día claro de Hottel, H. C. y método de Liu-Jordan para día medio mensual, todos con aplicación disponible en el software Geosol (Hernández, 2003).

El método de cálculo seleccionado fue el de Hottel, H. C. (1976) (en Hernández, 2003), el cual incluye en su formulación tres coeficientes que dependen de la altitud y ubicación del lugar (valores disponibles en cartografía digital de la zona).

Las principales limitaciones del método son la escasa flexibilidad a la hora de ajuste de los datos (sólo permite seleccionar ecuaciones entre verano e invierno de latitud media para nuestra zona) y su validez de aplicación únicamente hasta los 2500 m.s.n.m. con una visibilidad de 23 Km. Sin embargo, de acuerdo a validaciones de los datos estimados por los diferentes métodos con el programa Geosol, en relación a mediciones directas de la radiación solar para la Universidad Nacional de Salta, el ajuste resultó significativo para realizar predicciones de irradiación solar total (directa + difusa) por lo menos en días claros. (Hernández, 2003).

De acuerdo a pruebas ensayadas con el programa Geosol para diversos puntos en el área de estudio, el método de Hottel, H. C. dio valores levemente más bajos de radiación -resulta más conservador- que el de Page, lo cual es conveniente para estudios de factibilidad de aprovechamientos solares. Sin embargo, su aplicación para el Valle de Lerma (considerado hasta la divisoria de aguas, con alturas de hasta 4500 m.s.n.m. aproximadamente) requiere de ajustes por altitud para los sitios ubicados a más de 2500 m.s.n.m. e idealmente por nubosidad y orientación -el método considera días claros y posición geográfica general-, de manera de obtener valores de radiación más precisos.

### *Muestreo estratificado y procesamiento de datos*

Los datos requeridos para la aplicación del método de Hottel, H. C. son: altitud y ubicación geográfica (latitud, longitud). Utilizando herramientas de SIG del programa Idrisi Kilimanjaro se realizaron muestreos al azar, sistemático y estratificado al azar de 150 y 200 puntos, sobre un Modelo Digital de Elevación del Terreno (MDE) del Valle de Lerma. El MDE fue generado a partir de datos de la NASA, resolución 90m (Núñez, V. et.al., 2006). Dado que el valor de radiación depende directamente de la altitud, se descartaron los muestreos al azar y sistemático por enmascarar a esta variable. Mediante un histograma de frecuencias de altitud se corroboró como más representativo del área de estudio para el cálculo de la radiación solar, el muestreo estratificado al azar con 200 puntos.

Mediante el módulo "extract" de Idrisi Kilimanjaro, se obtuvieron los valores de altitud y posición geográfica (latitud y longitud) del MDE para los 200 puntos de muestreo. Los mismos fueron exportados con el formato "xyz" (.txt), para su manejo en bases de datos y planillas de cálculo.

El cálculo de la radiación solar diaria media mensual para los 200 puntos de muestreo se realizó con el software Geosol, aplicando el método de Hottel, H. C. de día claro, según lo explicitado anteriormente. El programa Geosol V.2.0 permite el cálculo y expresión gráfica de los parámetros: horas de salida y puesta del sol sobre el horizonte; duración del día; declinación solar; Irradiación solar directa, difusa y total en MJ/m<sup>2</sup>, entre otros (Hernández, 2003), siendo esta última variable la de mayor interés para el presente estudio.

El valor de radiación fue calculado en cada punto, para los días promedios de cada mes (días julianos). En todos los casos se consideró el cálculo de la radiación sobre plano horizontal (pendiente cero), huso horario GTM -3 hs. y albedo 0.3. En la aplicación del método de Hottel, H. C., se utilizó la opción "Verano de latitud media" para los meses de octubre a marzo e "Invierno de latitud media" de abril a setiembre.

### *Ajustes por altitud (para zona >2500 msnm)*

Dadas las limitaciones del método de Hottel, H. C. para la estimación de la radiación en los sitios ubicados sobre los 2500 m.s.n.m., se recurrió alternativamente a la aplicación del método de Page para el cálculo de la radiación en estos puntos.

El método de Page, requiere como datos de entrada, valores de temperatura y de humedad relativa del aire, con los que el programa Geosol estima la presión parcial de vapor. La turbidez atmosférica, parámetro también considerado por este método, es calculado por Geosol mediante una correlación que depende solamente de la altitud del lugar (Hernández, 2003). Los valores de temperatura media fueron extraídos de modelos digitales mensuales de temperatura media desarrollados para el Valle de Lerma en el mismo contexto del Proyecto de Ordenación Territorial (Belmonte, Núñez y Viramonte, 2004).

Dada la escasez de datos puntuales de humedad relativa del aire (HR) para la zona, con sólo cuatro estaciones históricas de registro en el área de estudio: Salta, Las Costas, El Carril y Coronel Moldes (Arias y Bianchi, 1996), se recurrió al Atlas

climático desarrollado para la región del Noroeste argentino por el Laboratorio Climatológico Sudamericano (Minetti, 2005). Los mapas de humedad relativa media se encuentran disponibles para los meses de enero, abril, julio y octubre. Las isolíneas fueron digitalizadas en un programa CAD, para luego generar por interpolación en el programa Idrisi, el modelo raster. Finalmente, se realizó un “extract” de los valores de HR para los puntos del muestreo estratificado ubicados sobre los 2500 msnm (50 puntos).

Los datos de temperatura y HR extraídos de los modelos digitales, fueron incorporados en el software Geosol para el cálculo de la radiación de día claro con el método de Page. La radiación total de día promedio fue calculada sólo para los cuatro meses con disponibilidad de datos de HR, valores que fueron incorporados en la base de datos, reemplazando las estimaciones de Hottel, H. C., para completar la serie de radiación en las zonas altas.

#### *Mapas de radiación solar*

Finalmente para generar los modelos mensuales de radiación se probaron diferentes métodos de mapeo, que pueden agruparse básicamente en dos grupos:

- Interpolaciones directas con herramientas SIG, a partir de los datos de radiación estimados para cada mes.
- Análisis de correlaciones y regresiones simples y múltiples entre radiación estimada y variables climáticas y topográficas (altitud, latitud, longitud) para cada mes, y comparaciones entre meses.

## **RESULTADOS**

Los puntos de muestreo utilizados para la estimación de la radiación pueden observarse en la figura 2.

#### *Mapeo por interpolación*

Se probaron dos métodos de interpolación de los datos de radiación para los diversos meses con el programa Idrisi Kilimanjaro:

- ✓ Interpolación lineal por vecino más cercano, usando radio de búsqueda de 6 puntos. (Módulo INTERPOL)
- ✓ Interpolación con módulo TIN, basada en la generación de una red de triángulos Irregulares.

Los modelos obtenidos mediante el módulo INTERPOL, resultaron más generalizados que con el módulo TIN, donde el efecto de los triángulos se hace demasiado evidente por la cantidad discreta de puntos (200). Sin embargo, para la interpolación lineal por vecino más cercano, el número de puntos y la distribución de los mismos (estratificados por altitud) resulta adecuada como se evidencia en el modelo de interpolación generado, donde la influencia de la altitud en las variaciones de radiación se evidencia claramente (Figura 5). Por otra parte, es posible aplicar diferentes filtros de suavización a estos modelos, si se decidiera utilizar los mismos como mapas finales de radiación, tratamiento que no fue realizado para poder contrastar mejor los resultados con los métodos de correlación y regresión.

#### *Mapeo mediante correlaciones y aplicación de ecuaciones de regresión*

##### Correlaciones y regresiones entre variables

El análisis de correlaciones realizado entre las estimaciones de radiación para los puntos de muestreo (tanto para la serie hasta 2500 msnm – método de Hottel, H. C.-, como para la serie completa con datos para puntos >2500 msnm – métodos Hottel, H. C. y Page) evidenciaron una correlación muy alta de la radiación con la altitud ( $r > 0.9$ ). Las correlaciones con latitud no resultaron significativas, lo que se explica por la escasa variación de este parámetro en la extensión del área de estudio (aproximadamente 1 grado). Si bien con la longitud el ajuste por correlación fue algo superior, esta variable no puede ser considerada independiente de la altitud para el caso del Valle de Lerma, donde las variaciones en altura están fuertemente asociadas a la distribución E-O (Valle estrecho). En la tabla 1 se presentan los coeficientes de correlación encontrados entre estos parámetros para la serie completa.

En la figura 3 se presentan las ecuaciones de regresión con mejor ajuste con la altitud, para los cuatro meses para los que logró estimarse la radiación también en altura. En todos los casos son ecuaciones polinomiales de segundo orden con  $r^2 > 0.92$ . Modelos logarítmicos y potenciales también presentaron  $r^2$  elevados, aunque con subestimaciones de la radiación solar en las zonas altas. El valor de  $r^2$  estadísticamente indica que el tanto % (por ejemplo 92% para abril) de la variabilidad de la radiación (variable dependiente) está explicada por la variabilidad en la altitud (variable independiente).

El resto de la variabilidad en los valores de radiación estaría asociado a otros factores (por ejemplo orientación, aspecto que no fue abordado en este trabajo). La leve diferencia en el ajuste con altitud entre los meses de invierno ( $r^2 > 0.92$ ) y verano ( $r^2 > 0.99$ ) podría explicarse por efectos de la inclinación del sol asociados a la topografía. En el gráfico de dispersión de los meses de otoño-invierno, la mayor variabilidad en los valores de radiación se da en altitudes medias, lo que podría atribuirse precisamente al efecto topográfico (efecto de sombra), aunque este aspecto deberá estudiarse con mayor profundidad en trabajos posteriores.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> Sin embargo, la variabilidad simplemente puede deberse a un problema de estimación de la radiación intrínseco a los métodos de cálculo utilizados (Hottel y Page) y/o al programa Geosol, ya que el día medio considerado varió en +1 para algunos puntos en los meses de invierno, para superar un error de “división por cero” indicado por el programa.

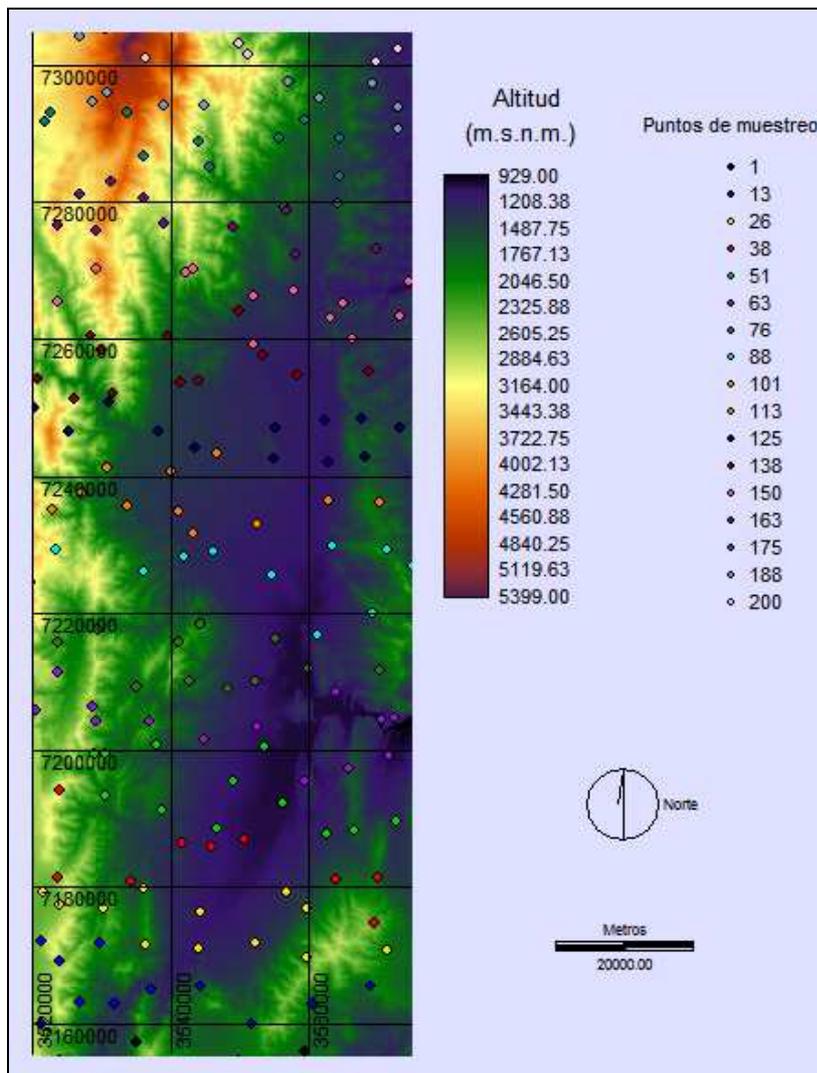


Figura 2: Puntos de muestreo estratificado por altitud utilizados para la estimación de la radiación total media mensual por los métodos de Hottel, H. C. y Page ( $> 2500\text{msnm}$ )

	Latitud	Longitud	Altitud
<i>Latitud</i>	1		
<i>Longitud</i>	0.05718062	1	
<i>Altitud</i>	-0.60472626	0.32138923	1
<i>Enero</i>	-0.63326264	0.25932527	0.98896668
<i>Abril</i>	-0.54214492	0.4696526	0.95366053
<i>Julio</i>	-0.53978365	0.50412837	0.96297477
<i>Octubre</i>	-0.61157918	0.34512315	0.99190882

Tabla 1: Coeficientes de correlación entre variables climáticas y topográficas para serie completa

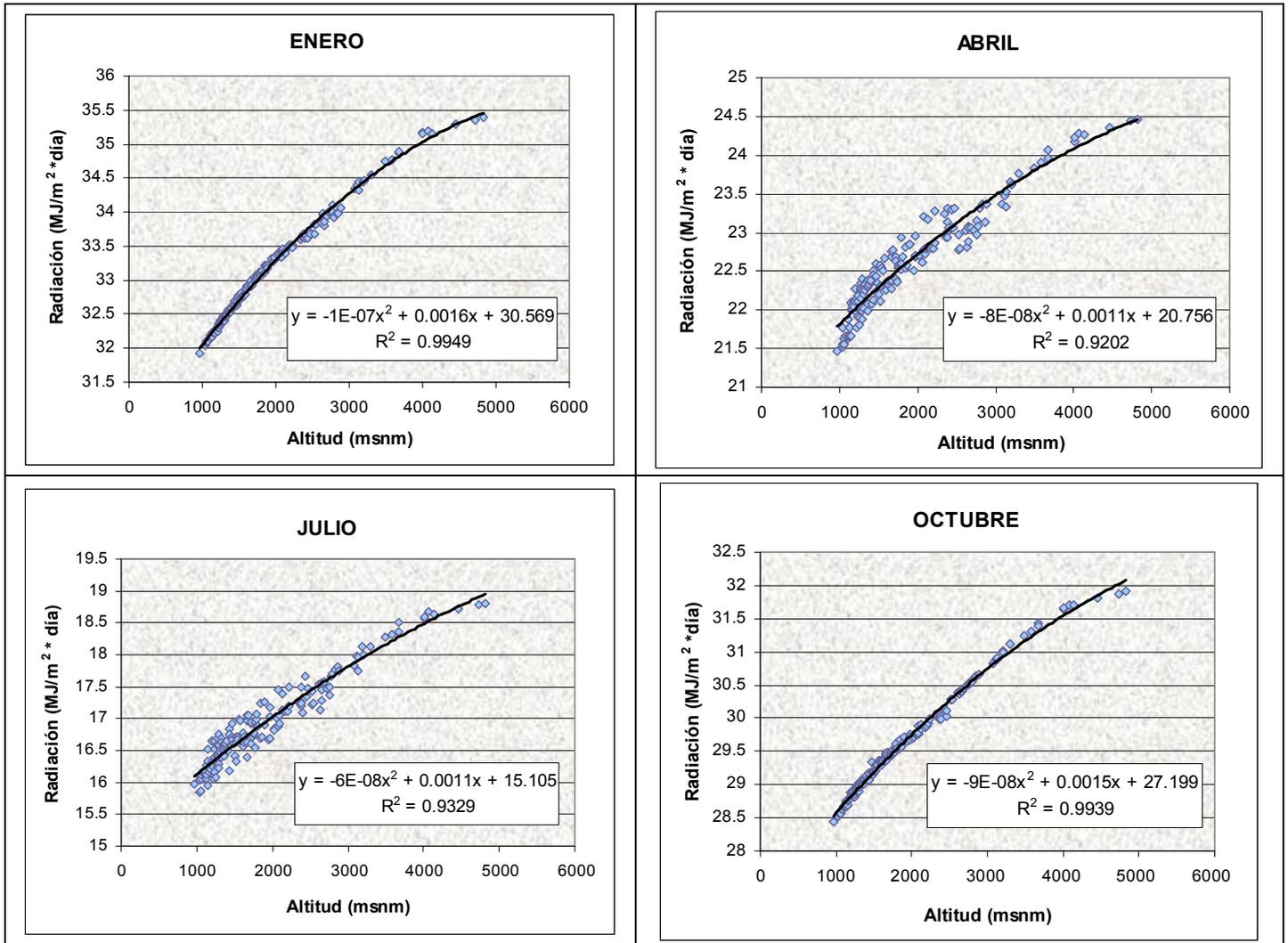


Figura 3: Gráficos de dispersión, líneas de tendencia y ecuaciones para regresiones polinomiales radiación-altitud.

También se estudiaron las correlaciones entre los valores de radiación obtenidos para los diversos meses, observándose una fuerte relación lineal entre ellos ( $r > 0.9$ ). Para el mapeo de radiación de los meses para los que no se dispone de serie completa (corregida por arriba de los 2500), se planteó la estimación de la radiación a partir de una regresión lineal con los otros meses (Figura 4).

Finalmente, las ecuaciones de regresión fueron aplicadas en el programa Idrisi Kilimanjaro (módulo Image Calculador) para la generación de los modelos de radiación total de día claro promedio para los 12 meses del año. Para el mapeo de Enero, Abril, Julio y Octubre se aplicaron las ecuaciones polinomiales simples con la altitud y, para el resto de los meses, las correspondientes ecuaciones lineales que utilizan el mapa de radiación ya generado del mes de referencia. El método de correlaciones y regresiones estadísticas con la altitud resultó más preciso para el mapeo que el de interpolación, según se puede observar en la figura 5, por lo que se optó por este método para la generación de los mapas finales a incorporar en el SIG.

Los valores de radiación obtenidos para los meses de verano varían entre 29 y 35 MJ/m<sup>2</sup>, mientras que para los meses de invierno oscilan entre 14 y 22 MJ/m<sup>2</sup>. Los valores mínimos corresponden a las zonas bajas del valle; incrementándose la radiación con la altura según lo definido en los modelos estadísticos de regresión.

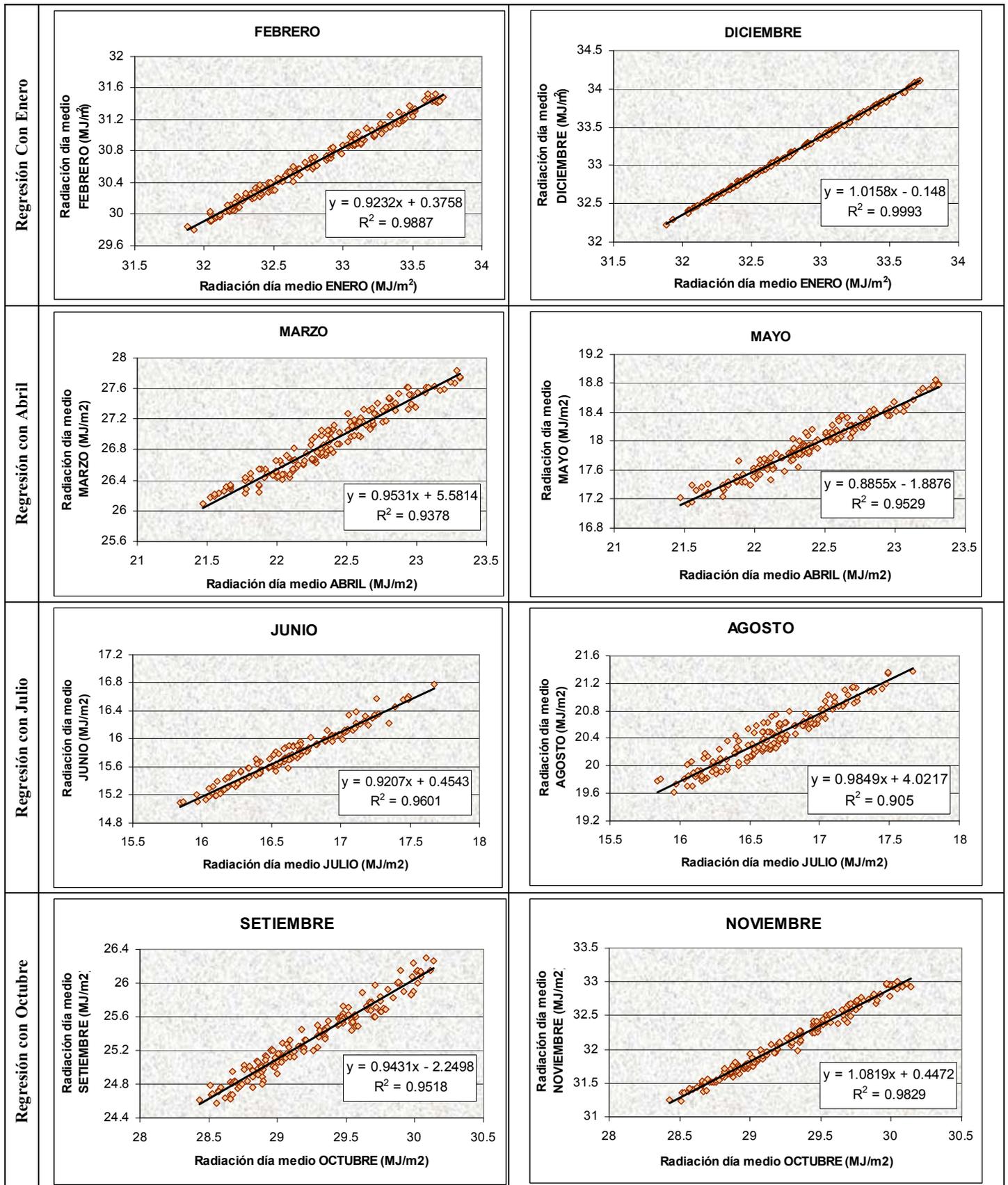


Figura 4: Gráficos de dispersión, líneas de tendencia y ecuaciones para regresiones lineales de valores de radiación, entre meses.

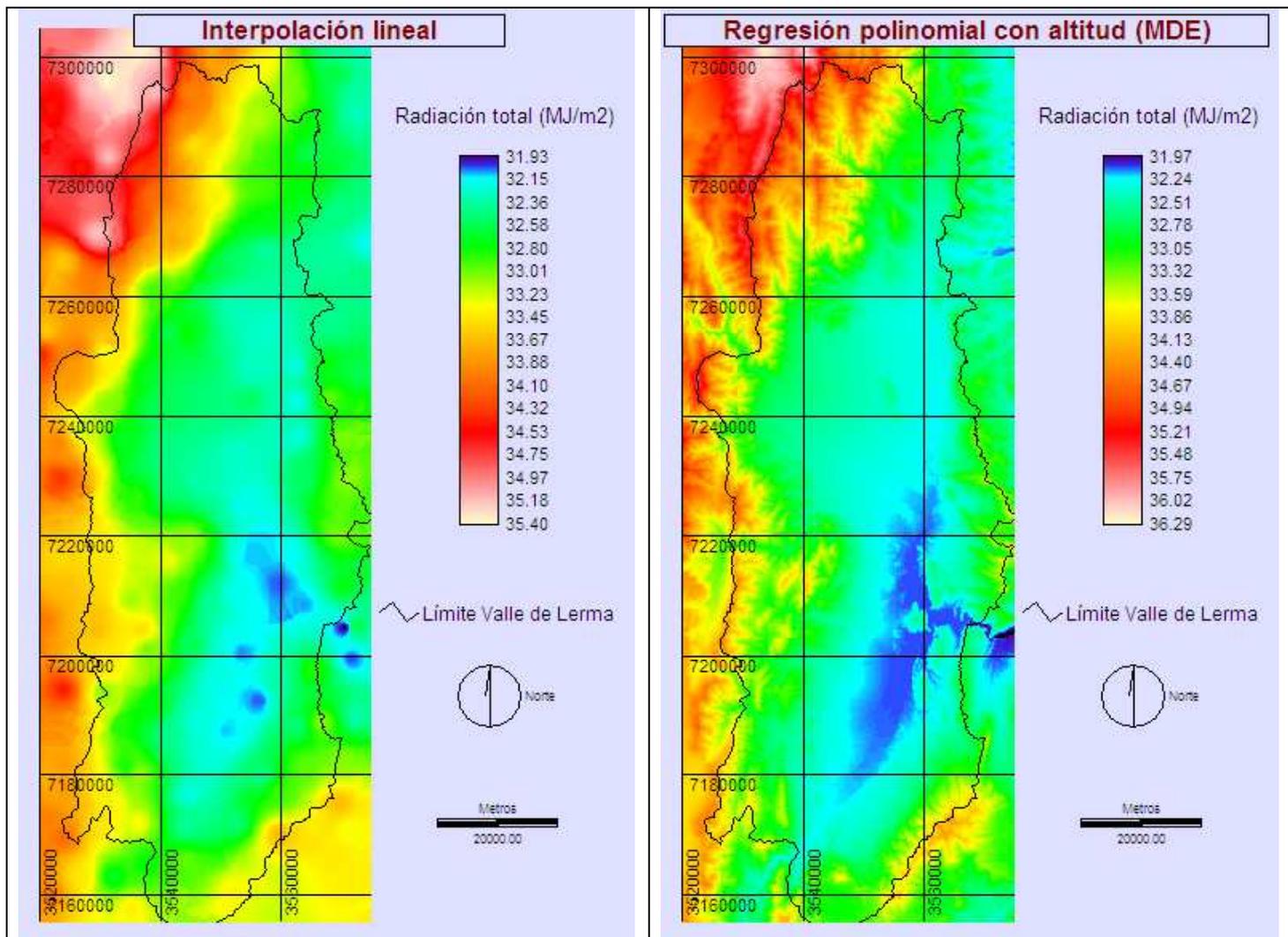


Figura 5: Comparación de mapas de radiación total diaria de día claro, para el mes de Enero, obtenidos por interpolación y regresión con altitud.

#### Ajustes por nubosidad y orientación

Los mapas que se obtuvieron siguiendo la metodología explicitada, son de radiación de día claro. Si bien en las zonas altas, donde la nubosidad es muy baja durante todo el año, las estimaciones de radiación de día claro resultan adecuadas para la planificación de aplicaciones energéticas solares, lo ideal sería poder ajustar las estimaciones de radiación realizadas con el Geosol y el mapeo raster, a condiciones más reales.

Una opción para este ajuste sería comparar los datos estimados con registros de radiación existentes para la zona (mediciones puntuales y datos de satélites meteorológicos, si existieran). Otra posibilidad es el análisis de variables tales como nubosidad y heliofanía y su posible correlación con datos de radiación medidos, que puedan extenderse y aplicarse mediante ecuaciones de regresión a la generación de los mapas raster de radiación total. Una tercera opción en análisis es el trabajo con imágenes satelitales. Mediante un Análisis de Componentes Principales (ACP) es posible aislar algún tipo de cobertura determinado (por ejemplo: suelo desnudo y lechos de ríos) y calcularle la Radiancia. Este valor si bien no indica directamente la radiación solar que llega, si es un excelente indicativo de la radiación reflejada y por lo tanto diferentes valores de reflexión para una misma cobertura reflejante, estaría indicando variaciones en la radiación incidente.

Lamentablemente, la inexistencia de registros históricos de las variables climáticas (radiación, heliofanía, nubosidad), principalmente para las zonas altas, dificulta los análisis de correlaciones entre las mismas y los ajustes para los mapas de radiación de día claro a radiación global media diaria considerando interferencias por nubosidad. Cartas generales de heliofanía y registros climáticos satelitales (Grossi Gallegos y Righini, 2002 - Grossi Gallegos y Righini, 2003) podrán ser utilizados como una alternativa para estos ajustes.

La topografía es otra variable de importancia en nuestra zona que debe considerarse en un modelo de ajuste para el mapeo de la radiación global. En la metodología aplicada, se contempló la variabilidad altitudinal pero con estimaciones sobre plano horizontal, sin considerarse las variaciones de pendiente y orientación, variables estas últimas también determinantes de los

valores de la radiación solar incidente y que podrían alternativamente ser incorporados en modelos que requieran mayor detalle y precisión.

## CONCLUSIONES

Ante la inexistencia de registros de radiación solar para el área del Valle de Lerma, las herramientas informáticas SIG asociadas a programas específicos de estimación de radiación solar (Geosol) constituyen una alternativa válida para el mapeo de esta variable.

La radiación solar presenta en el área de estudio, una determinante relación con la altitud, por lo que los mapas generados mediante regresiones con este parámetro resultan más adecuados que los clásicamente generados por interpolación (con mejores aplicaciones en zonas llanas).

Las variaciones de radiación total para día medio, presenta una alta correlación lineal entre meses, lo que permite estimar radiaciones mensuales a partir de datos calculados o medidos de otro mes. Además de las aplicaciones para el mapeo, esta interrelación mensual podría ser interesante para extensiones de series o extrapolaciones en las que se disponga de mediciones a campo de sólo algunos meses.

Para la generación de modelos espaciales de radiación que consideren interferencias en la radiación incidente, los mapas de radiación total de día claro obtenidos en este trabajo deberán ser ajustados con variables como la orientación, la nubosidad y/o la heliofanía.

## REFERENCIAS

- Arias, M y A. R. Bianchi – 1996 – *Estadísticas climatológicas de la Provincia de Salta*. INTA. Salta. Argentina.
- Belmonte, S.; Núñez, V y J. Viramonte – 2004 – *Modelos Digitales Climáticos para el Valle de Lerma – Salta – Argentina*. I Reunión de Imágenes Satelitarias y SIG aplicada a la Gestión de los Recursos Naturales, Culturales y Medio Ambiente. Dpto. de Ingeniería de Minas. Universidad Nacional de San Juan. Argentina.
- Grossi Gallegos, H. y R. Righini – 2002 – *Acerca de la distribución de la Heliofanía en Argentina*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 6, N°2. ASADES. Argentina.
- Hernández, A. - 2003 – *GEOSOL: Una herramienta computacional para el cálculo de coordenadas solares y la estimación de irradiación solar horaria*. ASADES 2003. Argentina.
- Hernández, A. – 2005 - Apuntes de clase: *Radiación solar - El recurso solar y el programa Geosol*. Curso de postgrado: Aplicaciones computacionales de la Energía solar. Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta.
- Minetti, J.L. - 2005 – *El Clima del Noroeste Argentino*. Laboratorio Climatológico Sudamericano. Ed. Magna. S. M. de Tucumán. Argentina.
- Núñez, V. et al. -2006 – *Ordenación Territorial del Valle de Lerma. Partes I y II* – Proyectos N° 1001 y 1345 - Cartografía digital – IRNED - CIUNSa. Salta. Argentina.
- Righini, R. y H. Grossi Gallegos – 2003 – *Aproximación a un trazado de nuevas cartas de irradiación solar para Argentina*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 7, N°2. ASADES. Argentina.

**AGRADECIMIENTOS:** Se agradece el apoyo y guía del Dr. Luis Saravia y Dr. Alejandro Hernández.

**ABSTRACT:** The solar radiation constitutes a fundamental variable for the analysis of productive alternatives of uses of the ground and specific evaluations of the power potential for solar applications. The development of the maps of radiation for the Valley of Lerma is based on the combination of diverse methods: calculation of radiation, statistical treatment and processing SIG. By means of a sampling stratified with the altitude 200 points of calculation were defined. The used methods of calculation were: method by day clear of Hottel, H. C. - for inferior altitudes to 2500 meters above sea level (m. a. s. l.)- and by day clear of Page - for altitudes superior to this level. Two methods of map were compared: interpolation and analysis of correlations and regressions with topographic variables and of location. The total radiation for average day, presents a high linear correlation with the altitude and between months, reason why it agrees to consider this parameter for the map, by means of the application of regression equations.