

## MEDIDAS DE EMISIVIDAD IR ATMOSFÉRICA Y SU CORRELACIÓN CON EL TIPO DE NUBOSIDAD DE CIELO

**V. Acosta, I. De Paul y D. Hoyos**

Departamento de Física – Universidad Nacional de Salta  
Avda. Bolivia 5150, A4400FVY Salta, Argentina  
Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387-4255389  
Email: depaul.irene@gmail.com

*Recibido: 11-03-19; Aceptado: 03-06-19.*

**RESUMEN.**- El potencial de enfriamiento pasivo que se emplea en uso racional de energía se determina a partir del balance entre la emisión IR proveniente del cielo y la emitida por la tierra  $\varepsilon$ , para lo cual se emplean correlaciones entre la emisividad del cielo y parámetros que pueden medirse desde tierra, como la temperatura de rocío. Estas correlaciones son válidas para condiciones de cielo claro, por lo que es importante determinar cuáles son las medidas realizadas en esas condiciones y distinguirlas de las obtenidas bajo diferentes condiciones de nubosidad. Dado que para determinar la condición de cielo claro se emplean instrumentos caros como los pirgeómetros, se propuso investigar la posibilidad de hacerlo por medios más económicos, con fotografías normales y procesamiento digital de imágenes. Los resultados obtenidos resultaron exitosos y permitieron determinar la emisividad media de cielo claro en  $0.775 \pm 0.035$  lo que permite filtrar los valores para los que es aplicable la correlación con la temperatura de rocío propuesta, cuya indeterminación es menor al 4%. También se pudo caracterizar la emisividad media esperable bajo distintas condiciones de nubosidad.

**Palabras claves:** Radiación infrarroja, potencial de enfriamiento, emisividad, tipos de nubes, procesamiento de imágenes, modelo RGB.

## MEASUREMENTS OF IR ATMOSPHERIC EMISSIVITY AND ITS CORRELATION WITH THE TYPE OF SKY CLOUDINESS

**ABSTRACT.**- The potential of passive cooling used for rational energy use is determined from the balance between the IR emission from the sky and that emitted by the earth, for which correlations are used between the emissivity of the sky and parameters that can be measured on the ground, such as the dew point temperature. These correlations are valid for clear sky conditions, so it is important to determine the measurements made under these conditions and distinguish them from those obtained under different cloudy conditions. Since expensive instruments such as pyrgeometers are used to determine the clear sky condition, it was proposed to investigate the possibility of doing so by more economical means, with normal photographs and digital image processing. The results obtained were successful and allowed to determine the mean clear sky emissivity at  $0.775 \pm 0.035$  allowing to filter the values for which the correlation proposed with the dew point temperature is applicable, whose indeterminacy is less than 4 per cent. It was also possible to characterize the expected average emissivity under different cloudy conditions.

**Keywords:** infrared radiation, cooling potential, emissivity, types of clouds, image processing, RGB model

### 1. INTRODUCCION

El enfriamiento pasivo por medio de la emisión de radiación infrarroja al cielo (IR) es un recurso importante para actividades humanas que se realizan en condiciones de aislamiento como las que se pueden dar en la Puna, la meseta patagónica o poblaciones alejadas de las fuentes de energía

convencionales. Esto incluye la conservación de remedios en puestos de salud y alimentos en general.

Para determinar el potencial de enfriamiento es necesario determinar la emisividad del cielo  $\varepsilon$  a partir del balance entre la emisión de radiación infrarroja proveniente del cielo y la emitida por la tierra, y correlacionarla con parámetros que puedan ser medidos desde tierra, principalmente la

temperatura de rocío, para poder predecir estadísticamente la emisividad esperada. Las correlaciones disponibles corresponden a condiciones de cielo claro y los valores que surgen de ellas se modifican cuando hay nubes, por lo que interesa determinar con precisión cuándo las medidas hechas en tierra corresponden a cielo claro, así como los rangos de emisividad esperables ante distintas condiciones de nubosidad.

Se planteó investigar si es posible determinar el tipo de nubes presentes a partir del tratamiento digital de imágenes tomadas con una cámara fotográfica, y si es posible establecer alguna correlación entre la emisividad medida con pirgeómetros y alguno de los parámetros que surgen del procesamiento de imágenes. Los rangos de frecuencia que miden ambos instrumentos son diferentes: los pirgeómetros detectan el rango de radiación infrarroja lejana o térmica que viene del cielo con una termopila ubicada debajo de una cubierta de silicio que permite el paso del rango térmico de la radiación, mientras que las cámaras fotográficas detectan el rango visible; sin embargo, la fuente de emisión es la misma, el cielo, por lo que era plausible encarar esta investigación

Dado que los pirgeómetros son instrumentos costosos, hace años se intentó correlacionar la emisividad al cielo con parámetros que puedan ser medidos en tierra con instrumentación más accesible, principalmente la temperatura de rocío. Los trabajos más importantes fueron los de Berdahl y Fromberg (1982) y Berdahl y Martin (1984), y Martin y Berdahl (1984), aplicables a condiciones de cielo claro, de baja emisividad. Una importante revisión de la bibliografía disponible se encuentra en Mendoza et al. (2017) donde, empleando el código de cálculo espectral E-Trans con la base de datos HITRAN (high-resolution transmission), se puede calcular  $\epsilon$  a partir de la contribución de diferentes gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera.

En nuestro país Frigerio comenzó un programa de medidas de emisividad cuyos resultados se volcaron en Frigerio (2001), Frigerio y Ávila Blas (2002), Frigerio (2004), Frigerio y Busano (2007), Frigerio (2012), estableciendo la siguiente correlación con la temperatura de rocío  $t_r$ , para condiciones de cielo claro, con una precisión menor o del orden del 4%, Frigerio (2001):

$$\epsilon = 0.772 + 0.41(t_r/100) + 0.51(t_r/100)^2 \quad (1)$$

A continuación, se procuró predecir estadísticamente la emisividad esperada y determinar así el potencial de enfriamiento disponible, Frigerio y Ávila Blas (2002). Para mejorar las correlaciones obtenidas es necesario poder precisar cuándo se presentan realmente condiciones de cielo claro y, eventualmente, determinar qué rangos de emisividad se puede esperar ante distintos tipos de nubosidad.

Según las normas de la Organización Meteorológica Mundial la nubosidad se determina por el observador meteorológico dividiendo la bóveda celeste en octantes y evaluando el número de partes que están cubiertas por nubes, OMM (1987). Otra forma actual y menos subjetiva es a partir de medidas satelitales de radiación infrarroja que, si bien es más precisa, mide la radiación hacia arriba de las nubes y se plantea el problema de discriminar la presencia de varias capas de nubes (Multi Layers): puede no detectar la presencia de nubes bajas, delgadas, Jensen, (1996), Ghasemian y

Akhoondzadeh (2018), Li et al. (2019). Ambos métodos tienen sus alcances y limitaciones.

Con el presente trabajo se procuró establecer algún método de medida más económico para determinar el potencial de enfriamiento en distintas condiciones, en particular bajo condiciones de cielo claro. Así es que se propuso investigar si es posible determinar el tipo de nubes presentes a partir del tratamiento digital de imágenes tomadas con una cámara fotográfica común, para lo cual se generó una tipología propia para clasificar las clases de nubes, consistente en cinco tipos que tiene en cuenta una nubosidad creciente, a partir de un cielo claro. Se tomaron fotos cenitales del cielo colocando la cámara junto al pirgeómetro apuntando al cielo, a determinadas horas; se realizó el procesamiento de imágenes empleando un programa propio con el que se generaron los histogramas correspondientes al modelo de color RGB y se calcularon los coeficientes de correlación de los resultados de este cálculo con los valores de emisividad medidos a las mismas horas.

Los primeros resultados, parciales, fueron anticipados en De Paul y Hoyos (2013), con resultados alentadores, pero la muestra estadística no era suficiente grande como para tener certeza de los valores obtenidos. En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos con 333 fotos procesadas, tomadas a lo largo de dos años, con diferentes condiciones atmosféricas, y con una indeterminación compatible con las correlaciones de cielo claro propuestas en Frigerio (2001).

## 2 INSTRUMENTACIÓN Y MÉTODO DE TRABAJO

Los instrumentos empleados, un pirgeómetro y una cámara fotográfica se colocaron en la azotea del edificio del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Salta, ubicada a 1187 m de altitud, a -24.7833 latitud S y -65.4167 de longitud O.

Para realizar las medidas de radiación IR se empleó un pirgeómetro CGR3 de Kipp y Zonen, con sensibilidad de 10,29 mV/W/m<sup>2</sup> cuyo rango espectral se encuentra entre los 4 y 40  $\mu$ m, aproximadamente. El instrumento provee un voltaje proporcional al intercambio de radiación R entre el cielo en su campo de visión y el instrumento que se encuentra a temperatura T medida por un detector, con lo que se puede calcular la radiación IR medida y la emisividad infrarroja al cielo:  $\epsilon = R/\sigma T^4$ . La frecuencia de medidas es de 0,017 Hz y para la comparación con las fotos analizadas se promediaron los valores medidos en una hora alrededor de la hora en que fue tomada la imagen.

Las fotos fueron tomadas con una cámara digital SONY DSC-P73 de 4.1 Mpixels en modo automático. La cámara mide el rango visible entre 400 y 700 nm aproximadamente, capturando las imágenes en color con el modelo de color RGB que filtra la luz que recibe en cada pixel en tres colores: rojo (R), verde (G) y azul (B). Para tomar fotos cenitales del cielo se colocó la cámara en el mismo soporte que sostiene el pirgeómetro apuntando al cielo; las fotos se tomaron a las 8hs y a las 18hs en que el sol está bajo sobre el horizonte.

Las imágenes fotográficas se clasificaron según su tipo y fueron procesadas empleando un programa propio SCIPRO, De Paul y Hoyos (2013), que provee los histogramas correspondientes al modelo de color RGB, esto es, calcula el número de pixels en la imagen correspondiente a cada color, cuyo índice está normalizado en el rango 0-255 bytes. La

información que suministra el programa para cada una de las variables R, G y B en una imagen es 1) el promedio del número de píxeles en cada color sobre toda la imagen (Promedio) y su desviación estándar (STD prom), 2) el máximo número de píxeles en la imagen (Máximo) y su desviación estándar (STD max) 3) el índice de color correspondiente al máximo (Índice) y su desviación estándar (STD ind). Los valores de los parámetros que surgen del procesamiento se pusieron en correlación con los valores promedio horario de la emisividad medida a esas horas con el pirgeómetro. Bajo particulares condiciones meteorológicas, por ejemplo, cielos muy cubiertos, se tomaron fotografías a otras horas y la correlación se establece con medidas de emisividad a esas horas. Para establecer la tipología de nubes se recurrió en principio al Atlas Internacional de Nubes de la OMM (1987) que tiene cuatro categorías de nubes: nubes altas, medias, bajas y de desarrollo vertical. Como el interés del trabajo es determinar las condiciones de cielo claro y tener

en cuenta también las condiciones en que el cielo está parcialmente nublado se optó por generar una tipología propia consistente en cinco tipos, que eventualmente podría ser modificado a posteriori en función de los resultados que se obtuvieran. Los tipos de nubes propuestos son los siguientes:

- Tipo 1: cielo despejado
- Tipo 2: nubes altas, tipo cirrus.
- Tipo 3: nubes bajas delgadas, tipo stratus y cielos parcialmente nublados
- Tipo 4: nubes espesas bajas o medias, tipo estratocúmulos.
- Tipo 5: nubes cúmulus, espesas y de alto desarrollo vertical.

En las figuras 1 a 5 se muestra una foto característica de cada tipo de nube y los histogramas correspondientes al análisis de esa foto.

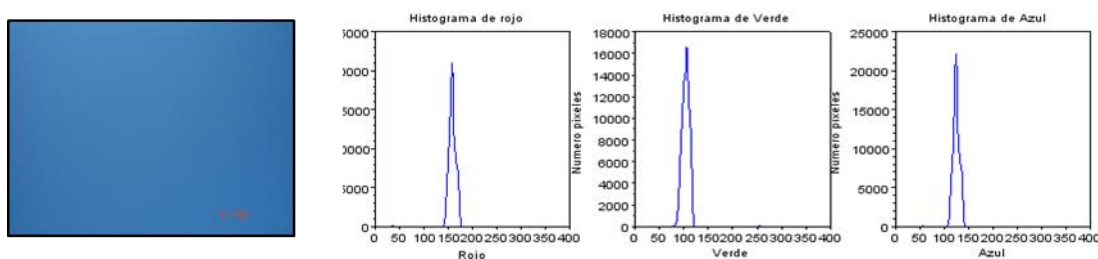


Fig. 1: Tipo 1: cielo despejado

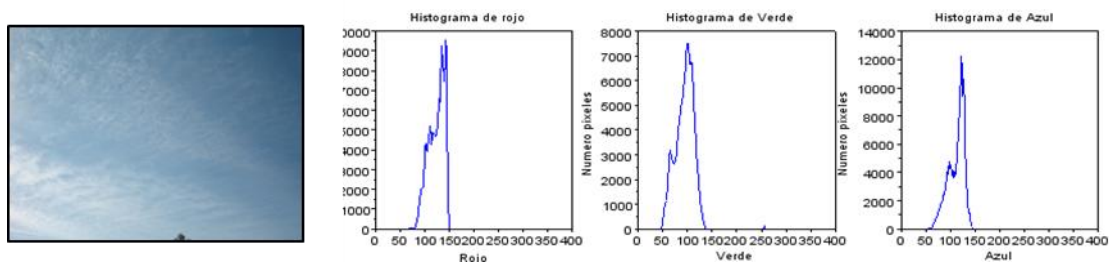


Fig. 2: Tipo 2: nubes altas, tipo cirrus.

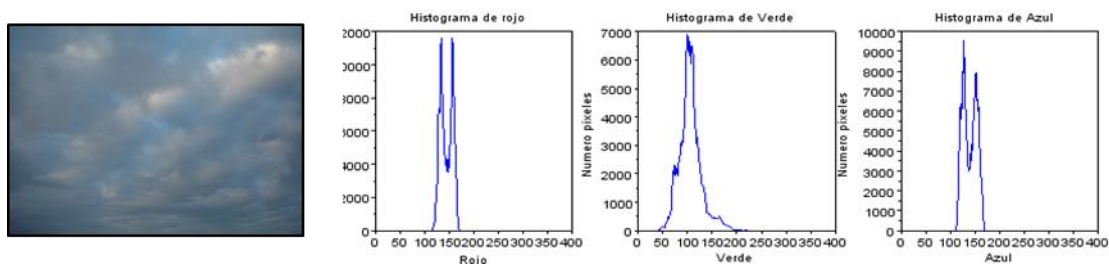


Fig. 3: Tipo 3: nubes bajas delgadas, tipo stratus y cielos parcialmente nublados.

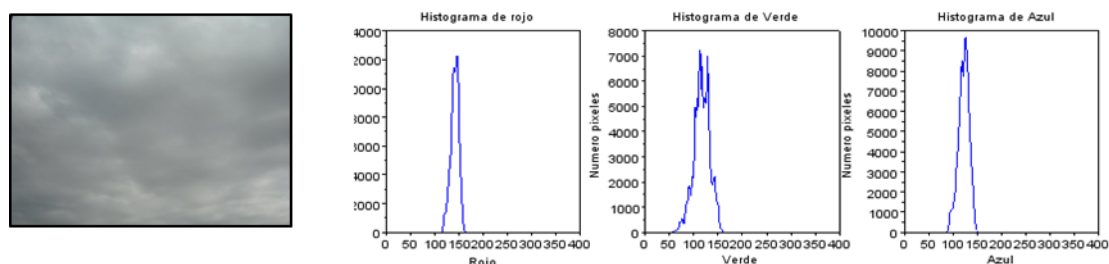


Fig. 4: Tipo 4: nubes espesas bajas o medias, tipo estratocúmulos

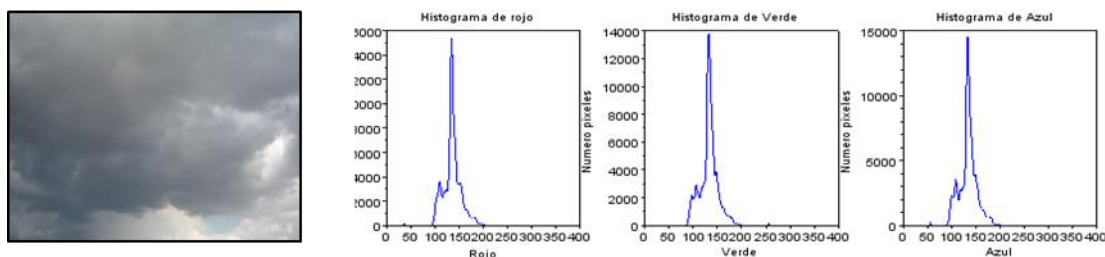


Fig. 5: Tipo 5: nubes cúmulus, espesas y de alto desarrollo vertical.

Son notables las diferencias entre los histogramas correspondientes a los distintos tipos de nubes: la clara monocromaticidad en el tipo 1 (cielo claro) mientras que en los restantes tipos se observa un espectro de frecuencias presentes en la imagen, más o menos amplio y más complejo a medida que aumenta el tipo de nubosidad. Es notable también la presencia de picos dobles, en particular en los tipos 2 y 3, lo que sugiere la contribución de distintas capas de nubes (ML), eventualmente nubes altas de hielo.

### 3. PROMEDIOS

Con la metodología descrita se calculó la emisividad promedio para cada tipo de nube, su desviación estándar y el valor porcentual. Los valores se muestran en la Tabla I y la figura 6. Se observa una emisividad creciente con el tipo de nube, como era de esperar.

Tabla I. Caracterización de la emisividad media por tipo de nube y su desviación estándar

tipo	$\epsilon$ promedio	STD	STD %
1	0,775	0,035	4,6
2	0,786	0,042	5,3
3	0,872	0,059	6,8
4	0,910	0,055	6,0
5	0,944	0,037	3,9

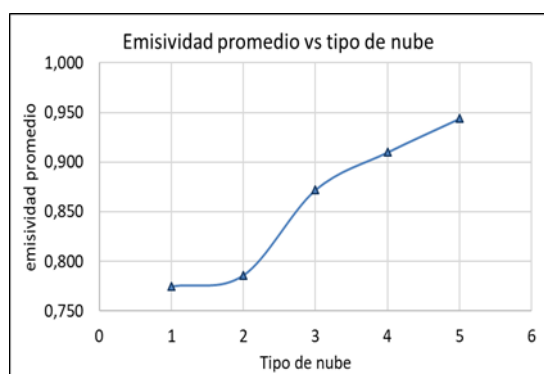


Fig. 6: Emisividad media vs tipo de nube, todas las medidas.

La emisividad media del tipo 2 es próxima a la de cielo claro; esto se puede explicar porque éstas son nubes altas, a veces de cristales de hielo, que contribuyen poco a la emisión IR. Para cada tipo de nube se calcularon los promedios de todos los datos obtenidos en el procesamiento. Del total de fotos procesadas, 333, corresponden 116 al tipo 1, 57 al tipo 2, 40 al tipo 3, 56 al tipo 4 y 60 al tipo 5. Los gráficos de los

promedios en función del tipo de nube muestran que para el Promedio rojo, verde y azul se obtienen curvas desacopladas para todos los tipos de nubes, salvo las correspondientes a los colores verde y azul en los tipos 4 y 5 (figura 7a); para Máximo las curvas de rojo y verde están desacopladas pero la azul se superpone (figura 8a); para el Índice rojo, verde y azul están desacopladas salvo en el tipo 4 que coinciden rojo y azul (figura 9a).

El análisis de la desviación estándar porcentual muestra que para Promedio el valor mayor se obtiene para el color rojo en el tipo 2 con un 27% mientras que para verde y azul los valores se ubican entre 6% y 19% (figura 7b). La STD% del Máximo presenta una gran variabilidad en el azul mientras que el rojo y el verde están acotados entre 26% y 30% (figura 8b). Para el Índice la mayor variabilidad se presenta en el verde tipo 2 y en el azul tipo 3, del orden del 14%, mientras que el rojo es el que presenta menor variabilidad entre el 5% y el 7% (figura 9b). Esta información puede proveer parámetros que permitan discriminar el tipo de nube a partir del análisis fotográfico.

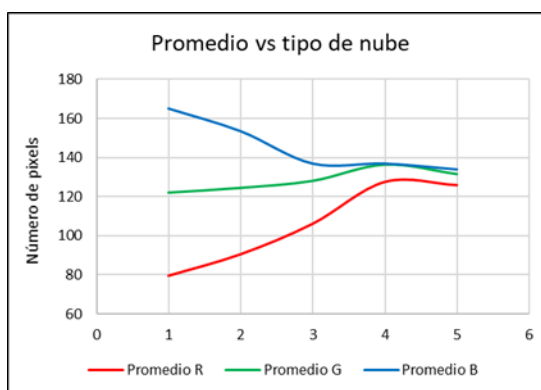


Fig. 7 a: Relación Promedio vs tipo de nube

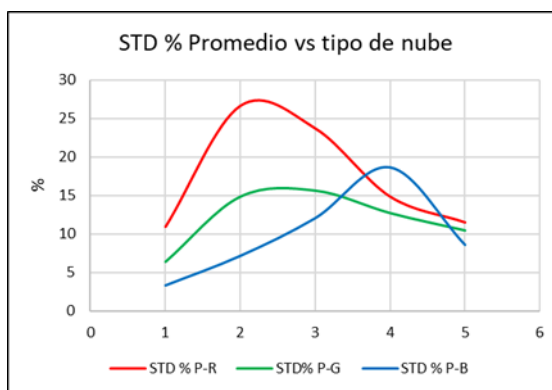


Fig. 7 b: Relación STD% Promedio vs tipo de nube.

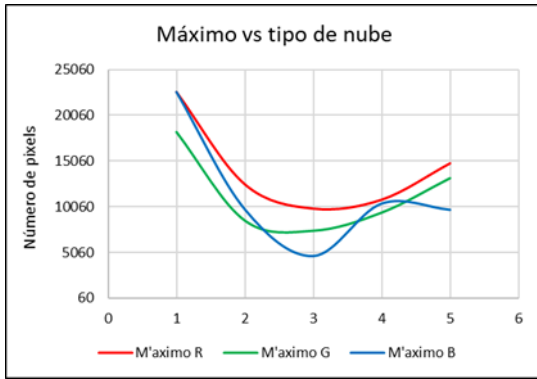


Fig. 8 a: Relación Máximo vs tipo de nube.

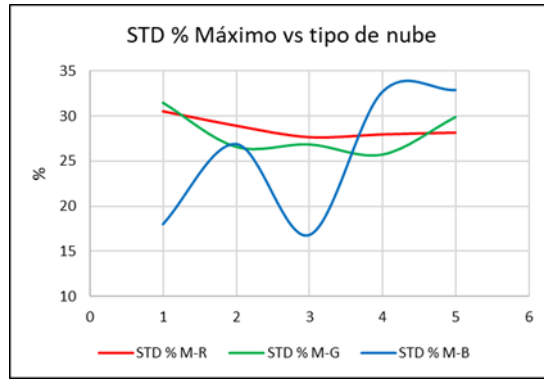


Fig. 8 b: Relación STD% Máximo vs tipo de nube

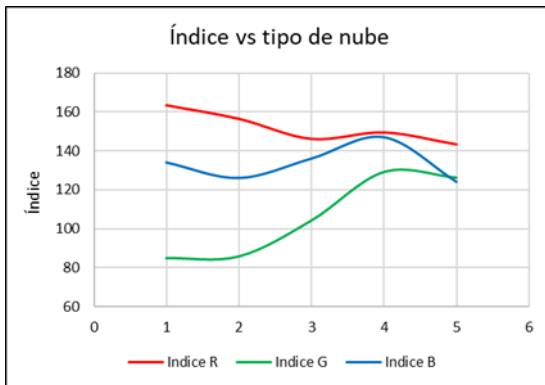


Fig.: 9 a: Relación Índice vs tipo de nube.

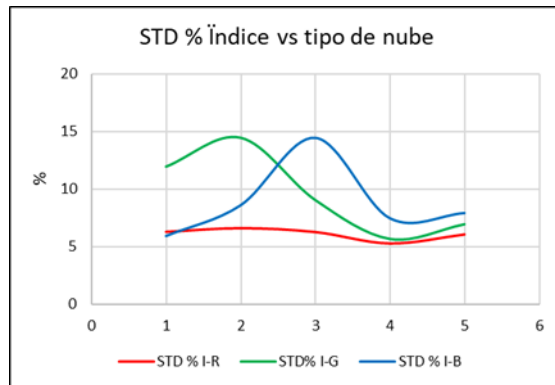


Fig.: 9 b: Relación STD% Índice vs tipo de nube

#### 4. CORRELACIONES

A los efectos de averiguar una posible relación causal entre variables se establecieron correlaciones numéricas entre los promedios de los distintos parámetros que surgen del análisis computacional y sus desviaciones estándar, con la emisividad medida y el tipo de nube presente.

El coeficiente de correlación general entre emisividad y tipo de nube es 0,977 lo que sustenta el objetivo del trabajo encarado.

La Tabla II muestra los coeficientes de correlación obtenidos entre los tipos de nubes propuestos y la emisividad medida con las variables Promedio, Máximo e Índice y sus correspondientes desviaciones estándar, que surgieron del procesamiento. Se observan algunos valores significativos, superiores a 0,9, que sugieren que se podrían establecer las correlaciones buscadas con dichos parámetros a partir del análisis digital de imágenes.

La correlación con el tipo de nube es directa, mayor que 0,9 con Promedio rojo, y con Índice verde, e inversa con Promedio azul e Índice rojo, mientras que tiene valores significativos mayores que 0,8 directo con Promedio verde e inversa con STD índice rojo.

La correlación con la emisividad es directa, mayor que 0,9 con Promedio rojo, y con Índice verde, e inversa con Promedio azul, Índice rojo y STD Índice rojo, mientras que tiene valores significativos mayores que 0,8 directo con Promedio verde.

Tabla II. Coeficientes de correlación de los valores procesados con tipo de nube y emisividad medida.

**Coeficientes de correlación entre el tipo de nube y la emisividad: 0,977**

##### Correlación con tipo de nube

	rojo	verde	azul
<b>Promedio</b>	0,967	0,859	-0,925
<b>Máximo</b>	-0,536	-0,331	-0,597
<b>Índice</b>	-0,915	0,939	0,017
<b>STD Prom</b>	0,148	0,350	0,557
<b>STD Max</b>	-0,573	-0,347	-0,122
<b>STD Ind</b>	-0,845	-0,658	0,136

##### Correlación con emisividad

	rojo	verde	azul
<b>Promedio</b>	0,969	0,877	-0,932
<b>Máximo</b>	-0,497	-0,277	-0,552
<b>Índice</b>	-0,914	0,965	0,154
<b>STD Prom</b>	0,086	0,296	0,596
<b>STD Max</b>	-0,533	-0,291	-0,146
<b>STD Ind</b>	-0,902	-0,782	0,210

#### 5. EMISIVIDAD PROMEDIO vs TIPO DE NUBE

En base al análisis realizado se puede caracterizar la emisividad media esperable en cada tipo de nubosidad, su desviación estándar y la indeterminación porcentual en función de los datos procesados con los valores de la (Tabla I).

La emisividad media de cielo claro se puede establecer en  $0,775 \pm 0,035$ , y los parámetros que la caracterizan se muestran en la Tabla III. Esta información puede proveer valores de referencia para filtrar la emisividad de cielo claro en las medidas que se realicen.

Con esta información, y a partir de la correlación (1) de emisividad de cielo claro con la temperatura de rocío, se

pueden discriminar los valores de emisividad obtenidos correspondientes a cielo claro y, eventualmente, asignar la emisividad esperable correspondiente a distintos tipos de nubosidad, y así establecer en base a un análisis estadístico, una estimación del recurso de enfriamiento pasivo esperable en cada localidad.

Tabla III. Caracterización del cielo claro que surge del procesamiento de imágenes.

### Caracterización del cielo claro

Tipo	Emisividad	Color	Promedio	STD %	Máximo	STD %	Índice	STD %
1	0,775	R	79	11	22624	30	163	6
		G	122	6	18197	32	85	12
		B	165	3	22565	18	134	6

La correlación con el tipo de nube es directa, mayor que 0,9 con Promedio rojo, y con Índice verde, e inversa con Promedio azul e Índice rojo, mientras que tiene valores significativos mayores que 0,8 directo con Promedio verde e inversa con STD índice rojo.

La correlación con la emisividad es directa, mayor que 0,9 con Promedio rojo, y con Índice verde, e inversa con Promedio azul, Índice rojo y STD Índice rojo, mientras que tiene valores significativos mayores que 0,8 directo con Promedio verde.

### 6. CONCLUSIONES

El análisis de los histogramas de fotografías cenitales del cielo correspondientes a los modelos de color RGB en función de la tipología de nubes propuesta y su correlación con la emisividad IR medida simultáneamente permitió:

- Confirmar que se puede establecer una correlación entre la emisividad IR medida y la tipología de nubes propuesta, por medio de imágenes tomadas con una cámara fotográfica común y procesadas con SCIPRO.
- Establecer el valor de emisividad media de cielo claro, tipo 1, en  $0,775 \pm 0,035$  que permite filtrar los valores para los que es aplicable la correlación con la temperatura de rocío propuesta en (1), dentro del margen de incerteza de la correlación.
- Caracterizar la emisividad esperable en cada tipo de nubosidad y su indeterminación porcentual.
- Proveer un valor de referencia para filtrar la emisividad de cielo claro en las medidas que se realicen.

### REFERENCIAS

Berdahl, P., Fromberg, R. (1982) The thermal radiance of clear skies, *Solar Energy*, **29**, 4, 299-314.  
 Berdahl, P., Martin, M., (1984) Emissivity of clear skies, *Solar Energy*, **32**, 5, 663-664.  
 De Paul, I. Hoyos, D. (2013) Emisividad infrarroja atmosférica y tipo de nubosidad. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **17**, 11.77 – 11.82.

Frigerio E. (2001). La radiación nocturna como fuente fría: su caracterización y uso. *Tesis de Doctorado*. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta.  
 Frigerio E. (2004) Radiación nocturna: campañas en Cachi. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **8**, 2, 11.25-11-28.  
 Frigerio E. (2012) Nuevas medidas de radiación atmosférica en Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **16**, 11.31-11.38.  
 Frigerio E., Busano J. P. (2007) Depresión nocturna en Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **11**, 11.89-11.93.  
 Frigerio E., O. Ávila Blas. (2002) Predicción de la emisividad de la atmósfera a partir de modelos estadísticos. Actas del XI Congreso Ibérico e VI Congreso Iberoamericano de Energía Solar, trabajo 46, Portugal.  
 Ghasemian N., Akhoondzadeh M. (2018) Introducing two Random Forest based methods for cloud detection in remote sensing images, *Advances in Space Research* **62** 288–303.  
 Jensen, J.R. (1996) Introductory digital image processing – A remote sensing perspective 2nd Ed. Prentice Hall Series in Geographic Information Science.  
 Li Z., Shen H., Cheng Q., Liu Y., You S., He Z., (2019) Deep learning based cloud detection for medium and high resolution remote sensing images of different sensors, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 150 197–212.  
 Martin, M., Berdahl, P., (1984) Characteristics of infrared sky radiation in the United States. *Solar Energy*, **33**, 34, 321-336.  
 Mendoza V.M., Villanueva E.E., Garduño R., Sánchez-Meneses O., (2017) Atmospheric emissivity with clear sky computed by E-Trans/HITRAN, *Atmospheric Environment* 155 174e188.  
 Organización Meteorológica Mundial/World Meteorological Organization (1987) Atlas Internacional de Nubes /International Cloud Atlas/, Ginebra, Suiza. Publicación n° 407, Vol I, Vol II, 6ISBN 92-63-12407-8.  
 Wang J., Liu Ch., Yao B., Min M., Letu H., Yin Y., Yung Y.L., (2019) A multilayer cloud detection algorithm for the Suomi-NPP Visible Infrared Imager Radiometer Suite (VIIRS) Remote Sensing of Environment 227 1–11.