

EMISIVIDAD EN EL N.O.A. DEPENDENCIA CON LA ALTURA

Erico Frigerio

Av. Bolivia 5150 - 4400 Salta

Tel. : (0387) 4255423

Email : frigerio@unsa.edu.ar

RESUMEN: Se buscó una relación general para la emisividad que contemplara distintas alturas geográficas para la zona de Salta y Jujuy. Para ello, se han revisado los datos medidos de emisividad en la región y se ha obtenido una expresión de ésta en función de la temperatura de rocío para Salta que significa una mejora respecto a una publicada anteriormente. Con ella como referencia, se buscó ajustar curvas que dieran la variación de emisividad en función de la altura. Ninguna de ellas resultó general, aunque predigan los valores correctos para los lugares medidos. Se dan las expresiones que se obtuvieron y sus posibilidades de uso.

Palabras clave: Radiación, Atmósfera, Emisividad, Correlación.

INTRODUCCIÓN.

El desarrollo de equipos de enfriamiento que funcionen en forma pasiva es de interés para mejorar las condiciones de vida en estas localidades aisladas dado que permitiría la conservación de alimentos en buenas condiciones sanitarias, la conservación de medicamentos y vacunas en puestos de salud y, a través de una adecuada adaptación a la vivienda, el mejoramiento de las condiciones de habitabilidad de las mismas si las condiciones climáticas así lo requirieran.

En este contexto, es de importancia la búsqueda de recursos pasivos para refrescamiento y refrigeración. Una alternativa es la radiación nocturna, entendiéndose por tal a la radiación de cielo que no proviene del sol.

Se requiere de una comprensión cuantitativa de la radiación del cielo para el diseño de sistemas de enfriamiento radiante. Por ejemplo, la posibilidad de predecir la radiación de cielo en forma segura conjuntamente con el conocimiento de las características de transferencia térmica (radiativa, convectiva y conductiva) de las superficies, puede ser usado para ayudar al diseño de edificios que permanezcan frescos sin acondicionadores mecánicos. Además de las aplicaciones en enfriamiento radiativo, un buen modelo de radiación de cielo es deseable para predecir adecuadamente pérdidas radiativas de cubiertas ó superficies expuestas.

Un simple cálculo ilustra el problema. La radiación nocturna durante la primavera en Salta es de alrededor de 300 W/m². Un 5 % de error en la medida o estimación de esta radiación representa 15 W/m². Bajo cielos claros una superficie a temperatura ambiente puede perder radiativamente unos 60 W/m². Entonces un 5 % de error en determinar la radiación atmosférica de onda larga representa el 25 % de error en la potencia neta de enfriamiento, lo que enfatiza la necesidad de buenas medidas y modelos.

Una manera de caracterizar la radiación nocturna es mediante la obtención de una fórmula empírica en base a los datos meteorológicos de superficie. Se debe tener en cuenta, además, la compleja orografía del lugar que contiene zonas bajas como el chaco salteño, zonas intermedias compuestas por valles a diferentes alturas y zonas altas como La Puna.

PROMEDIOS MENSUALES: EXPRESIÓN PARA LA EMISIVIDAD EN SALTA.

Para caracterizar la radiación nocturna se puede utilizar el concepto de temperatura de cielo T_c o el de emisividad ε, estando éstas definidas por:

$$R = \epsilon \sigma T_a^4 = \sigma T_c^4, \quad (1)$$

donde T_a designa la temperatura ambiente en K y R la radiación nocturna. La emisividad es una función principalmente de la temperatura y del contenido de agua de la atmósfera. Por ello es que se buscó relacionarla con la temperatura de rocío medida en superficie.

La campaña de medidas de radiación nocturna a diferentes alturas geográficas (Salta, Cachi, Abra Pampa y Alto de la Sierra) realizada en los años 1989 y 1990 permitieron encontrar una correlación para la emisividad de cielos despejados que fue publicada en ASADES'90 y AFA'91 (Frigerio y Saravia, 1990; Frigerio y Saravia, 1991).

Los promedios nocturnos mensuales con las medidas efectuadas para Salta y la correlación (Corr.1) hallada en esa oportunidad se muestran en la figura 1. En ella se puede apreciar que los valores promedio obtenidos para los distintos meses son persistentemente más elevados que los que predice la correlación dada por Martin y Berdahl (Martin y Berdahl, 1984), la cuál se tomó de referencia por tener una corrección con la altura. La expresión encontrada para la correlación 1 era:

$$\varepsilon = 0,767 + 0,55(t_r/100) - 0,26 (t_r/100)^2 \tag{2}$$

La correlación ajusta bastante bien todos los puntos (dentro del 2 % del valor medido), salvo para temperaturas de rocío bajas donde se observa un apartamiento de un 6 % entre lo medido y lo predicho. Revisando los datos medidos se obtuvo otra correlación que significa una mejora en bajas temperaturas de rocío sobre la anterior:

$$\varepsilon = 0,772 + 0,41.(t_r/100) + 0,51.(t_r/100)^2; \tag{3}$$

con $r^2 = 0,74$, en la que se puede apreciar el cambio de signo del término cuadrático respecto a la correlación anterior, la cuál está dibujada como Corr. 2 en la figura 1. El ajuste con esta nueva expresión a los datos también permanece dentro del 2 % para las temperaturas de rocío mayores a 2 °C y es del 4 % para el único valor menor dibujado. Una comparación entre ambos ajustes se da en la figura 2.

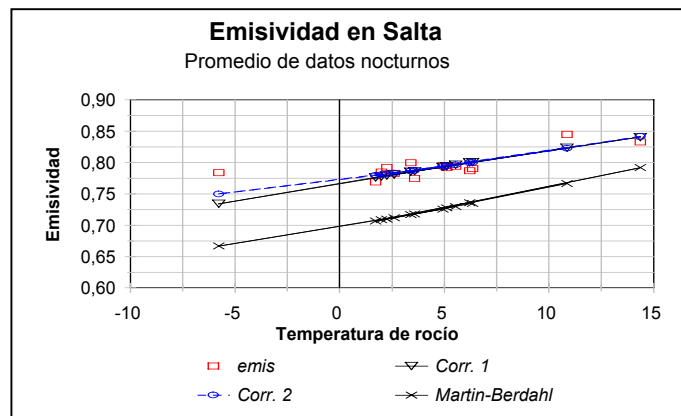


Figura 1. Mediciones de emisividad en Salta, correlaciones obtenidas y correlación de Martin y Berdahl.

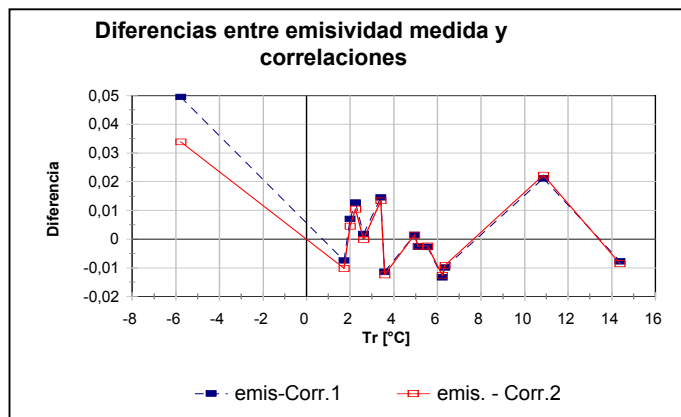


Figura 2: Diferencias entre las correlaciones encontradas y la emisividad medida.

DEPENDENCIA CON LA ALTURA.

Para los puntos obtenidos en otras localidades se observa la misma tendencia con respecto a la correlación de Martin y Berdahl, salvo para Abra Pampa en que las medidas dan valores inferiores (figura 3). Es evidente, entonces, la necesidad de obtener una expresión que tenga en cuenta la variación de la emisividad en función de la altura.

Con las medidas realizadas en distintas localidades ubicadas a diversas alturas, se hicieron varios intentos en los cuáles se obtuvo expresiones válidas para un par de alturas pero no para las demás. En particular, el ajuste lineal en función de la presión barométrica propuesto por Martin y Berdahl no concuerda con las medidas obtenidas como lo muestra la figura 3.

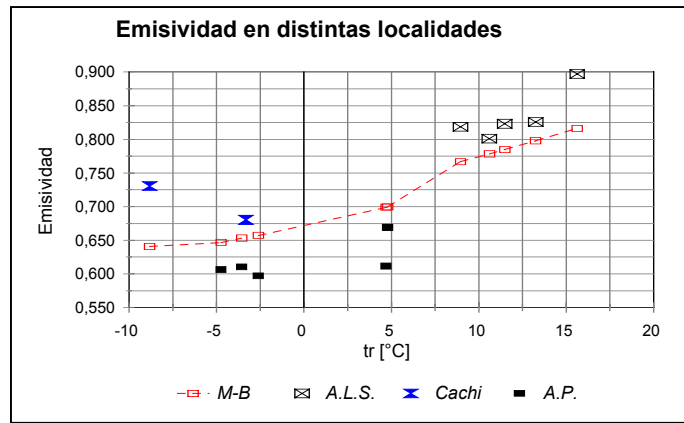


Figura 3. Comparación de las medidas en distintas localidades y la correlación de Martin y Berdahl.

Los promedios de emisividad medidas para las distintas localidades se muestran en la tabla 1, cuya gráfica correspondiente es la figura 4. Se tomó sólo el periodo julio-septiembre del cuál se disponen más medidas en las distintas alturas por lo que se consideran más representativas. Por otro lado, es el periodo de mayor ocurrencia de cielos claros.

Lugar	Altura s.n.m. [m]	Presión barométrica [Hpa]	Temperatura de rocío [°C]	Emisividad medida	Correlación 2ª. (Corr2)
Alto de la Sierra	ca. 200	1000	12,00	0,833	0,829
Salta	1220	880	3,76	0,792	0,789
Cachi	2280	778	-7,09	0,679	0,746
Abra Pampa	3484	670	1,11	0,633	0,777

Tabla 1: Valores promedio para las distintas localidades. Periodo JULIO-SEPTIEMBRE .

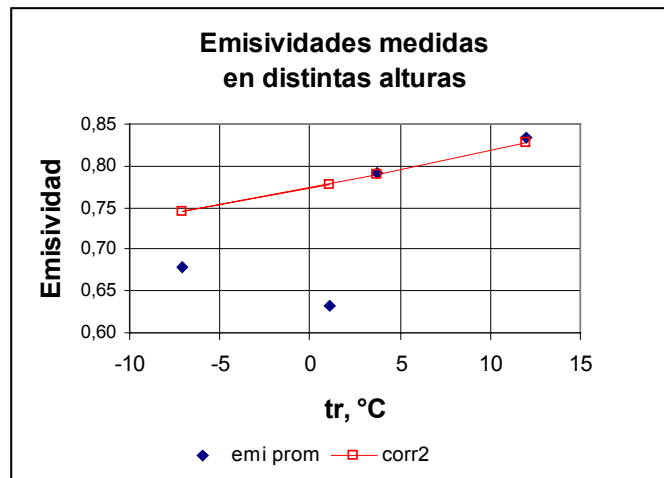


Figura 4: Emisividades de la tabla 1.

Los promedios de emisividades se corresponden en las distintas localidades con promedios de temperatura de rocío diferentes. Además se observa de la tabla que el promedio obtenido para Cachi es menor que el obtenido para Abra Pampa, estando esta última a más altura. Esto se debe a que en los momentos de las campañas de medida respectivas, el tiempo estuvo más frío en la primera localidad que en la segunda.

Debido a que la presión en función de la altura es de tipo exponencial, se tomó la presión como variable para caracterizar la altura y se ensayó un ajuste con un parámetro z definido por

$$z = (P-1000)/1000, \quad (4)$$

donde P es la presión representativa del lugar, quedando definida así una diferencia de presiones adimensional que será representativa de la altura de un lugar respecto del nivel del mar. La variación del logaritmo de la emisividad con este z se muestra en la figura 5, cuya curva de ajuste da la siguiente expresión para la emisividad:

$$\varepsilon = 0,840.\exp[-0,67.z^2 + 0,67.z], \quad (5)$$

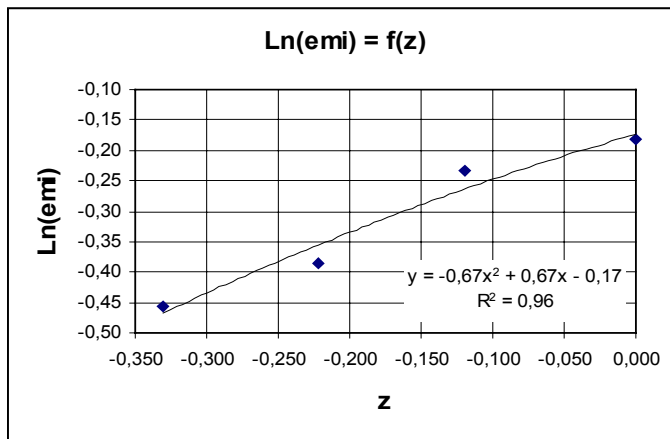


Figura 5. Logaritmo de la emisividad en función de la diferencia de presión z.

El resultado de su aplicación se vuelca en la tabla 2.

Lugar	z	$\epsilon = emi$	Regresión	diferencia	diferencia %
ALS	0	0,833	0,804	0,029	3,5
Salta	-0,12	0,792	0,735	0,057	7,2
Cachi	-0,222	0,679	0,670	0,009	1,3
Abra Pampa	-0,33	0,633	0,599	0,034	5,4

Tabla 2: Resultados del ajuste dado por la ecuación 5.

Se puede observar que este ajuste no es muy bueno, sobreestimando la emisividad en Salta en un 7 %. Además, este ajuste adolece del defecto de que no se tiene en cuenta las variaciones estacionales de la emisividad, es decir, no aparecen como una corrección a una correlación general como la hallada para Salta.

CORRECCIÓN CON LA ALTURA.

Para resolver el problema planteado, se tomó como buena la correlación 2 obtenida para Salta y se contrastó los valores medidos promedio con lo que predice esta correlación. (delta emi, Tabla 3). Se continuó trabajando con la diferencia de presión adimensional z, redefiniéndola positiva.

Lugar	P	delta emi	delta P	z	delta emi(als)
ALS	1000	4,45E-03	120	0,000	0,00E+00
Salta	880	2,87E-03	0	0,120	-1,58E-03
Cachi	778	-6,66E-02	-102	0,222	-7,11E-02
Abra Pampa	670	-1,44E-01	-210	0,330	-1,49E-01

Tabla 3: diferencia de la emisividad promedio con la correlación 2.

Para referirlo todo al punto más bajo que se dispone, se restó la diferencia de la correlación con la medida en Alto de la Sierra a la columna delta emi (columna delta emi(als), tabla 3). Una gráfica de esta nueva variable en función de la presión se da en la figura 6. También se dibujó allí la corrección por altura que publicaron Martin y Berdahl.

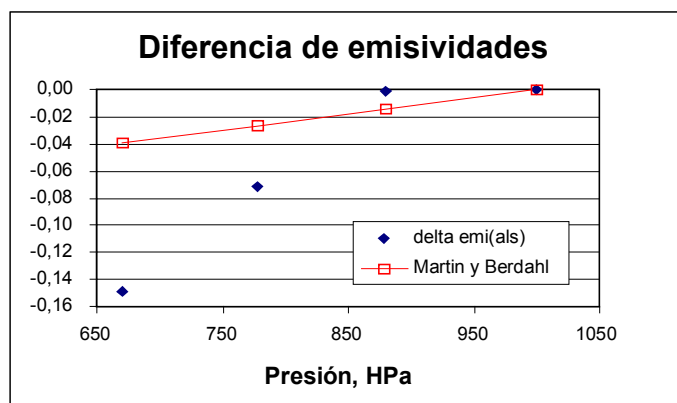


Figura 6. Diferencia de emisividad referida a la medida en Alto de la Sierra en función de la presión.

De la observación de esta figura es evidente que una correlación que tenga en cuenta la altura geográfica no puede ser lineal tal como lo presentarían Martín y Berdahl. Se buscó, entonces, una corrección (aditiva) que tuviera la forma:

$$\delta\epsilon = A \cdot [1 - \exp(f(z))], \quad (6)$$

donde la constante A y la función f(z) tienen que hallarse. Se buscó que esta función sea de la forma $B \cdot z^2 + C \cdot z$, por lo anteriormente obtenido, a pesar de los pocos puntos que se tiene.

Los valores hallados para las tres constantes fueron:

$$A = 3,7363 \cdot 10^{-7}, \quad B = -145,3 \quad \text{y} \quad C = 87. \quad (7)$$

Entonces, teniendo en cuenta la correlación 2, la fórmula resultante para la emisividad es la siguiente:

$$\epsilon(\text{tr}, z) = 0,776 + 0,41 \cdot (\text{tr}/100) + 0,51 \cdot (\text{tr}/100)^2 + 3,74 \cdot 10^{-7} \cdot (1 - \exp(-145,3 \cdot z^2 + 87 \cdot z)). \quad (8)$$

En la siguiente tabla (tabla 4) se da el resultado de esta expresión y su comparación con los valores originales.

Lugar	P	Tr prom	emi prom	Ajuste	Diferencia	Dif %
ALS	1000	12,00	0,833	0,833	0,0007	0,09
Salta	880	3,76	0,792	0,791	0,0011	0,14
Cachi	778	-7,09	0,679	0,679	0,0007	0,11
Abra Pampa	670	1,11	0,633	0,633	0,0004	0,06

Tabla 4: resultado de la expresión 8.

Con esta expresión de ajuste, los valores promedio de la emisividad para $\text{tr} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ teniendo en cuenta la altura son los siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Salta:} \quad & \epsilon(\text{tr}=0) = 0,772 \\ \text{Cachi:} \quad & \epsilon(\text{tr}=0) = 0,757 \\ \text{Abra Pampa:} \quad & \epsilon(\text{tr}=0) = 0,676 \end{aligned} \quad (9)$$

Como este ajuste se realizó con muy pocos puntos, se hizo un dibujo de la curva para presiones intermedias (figura 7) en la cual se puede observar que, si bien pasa por los puntos medidos, no predice correctamente en los intermedios. Subestima entre Cachi y Abra Pampa y, probablemente, sobreestima entre Salta y Cachi. En el primer caso, el comportamiento del ajuste es particularmente malo. Además es incapaz de predecir para alturas superiores.

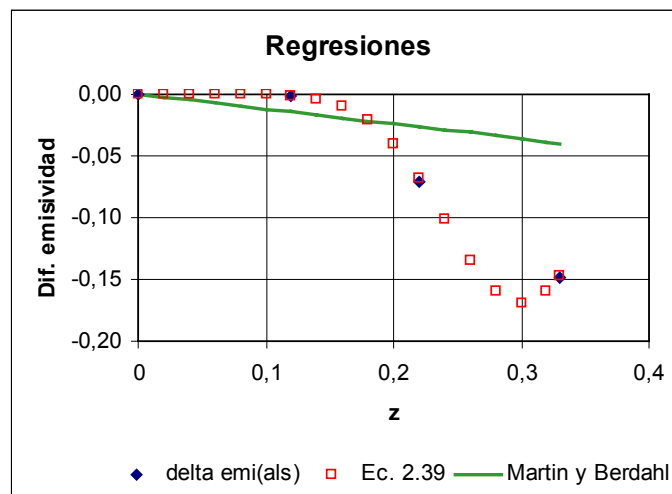


Figura 7. Predicciones para alturas intermedias.

NUEVA PROPUESTA.

Se probó con otros ajustes sin mejorar el resultado. Sin embargo, si se observa la gráfica de los puntos correspondientes a Salta, Cachi y Abra Pampa, éstos parecieran alineados. Renunciando a las alturas por debajo de Salta (ubicada a 1220 m s.n.m.), se obtuvo una expresión cuadrática, cuya expresión y resultados se muestra en la tabla 5.

Ajuste entre Salta y Abra Pampa: $\delta\epsilon = 0,169.z'^2 - 0,6642.z'$; $z' = (880 - P)/1000$ (10)						
Lugar	Presión	z'	Tr prom	emi prom	Regresión	Dif%
Salta	880	0	3,76	0,792	0,791	-1,1E-01
Cachi	778	0,102	-7,09	0,679	0,679	-1,8E-03
Abra Pampa	670	0,210	1,11	0,633	0,633	-5,1E-02

Tabla 5: resultado del ajuste entre Salta y Abra Pampa.

CONCLUSIONES.

Como resultado de las medidas realizadas se pueden formular las siguientes conclusiones:

- Se ha verificado que no se puede usar una expresión simple, como la dada por Martin y Berdahl, para tener en cuenta el efecto de la altura sobre la emisividad atmosférica.
- Se han probado una variedad de ajustes de la emisividad con la altura, ninguna de ellas resultó general.
- Para las localidades donde se han realizado medidas se puede utilizar la siguiente ecuación en función de la temperatura de rocío, usando las expresiones 8 y 9,:

$$\epsilon(\text{tr}, z) = \epsilon(0, z) + 0,41 \cdot (\text{tr}/100) + 0,51 \cdot (\text{tr}/100)^2; \quad (11)$$

con los siguiente valores para $\epsilon(0, z)$:

Alto de la Sierra (chaco, ca. 300 m s.n.m.):	$\epsilon(0; 0) = 0,776$
Salta (valle, 1220 m s.n.m.):	$\epsilon(0; 0,12) = 0,772$
Cachi (valle, 2280 m s.n.m.):	$\epsilon(0; 0,22) = 0,757$
Abra Pampa (Puna, 3484 m s.n.m.):	$\epsilon(0; 0,33) = 0,676.$

(12)

- Para alturas intermedias entre Salta y Abra Pampa, hasta tanto no se obtengan medidas, se sugiere usar la curva de interpolación (corrección con la altura referida a Salta):

$$\epsilon(\text{tr}, z') = 0,772 + 0,41 \cdot (\text{tr}/100) + 0,51 \cdot (\text{tr}/100)^2 + \delta\epsilon; \quad (13)$$

donde, (ecuaciones 10),

$$\delta\epsilon = 0,169.z'^2 - 0,6642.z' \quad \text{y} \quad z' = (880 - P)/1000.$$

REFERENCIAS.

- Berdahl, P., Martin, M. (1984). Summary of results from the spectral and angular sky radiation measurement program. *Solar Energy*, **33**, 241 - 252.
- Berdahl, P., Martin, M. (1984). Characteristic of infrared sky radiation in the United States. *Solar Energy*, vol. **33**, 321 - 326.
- Frigerio, E. y Saravia, L., 1991. Emisividad infrarroja de la atmósfera. Medidas en el Noroeste Argentino. *Anales AFA*, **3**, 432 - 438.
- Frigerio E. y Saravia L.(1990).Emisividad de la atmósfera:resultados de la campaña de medidas del año 1989. *Actas ASADES 90*, 1 - 8.

ABSTRACT.

A general relationship for the emisivity in function of geographyc altitude was intended for Salta and Jujuy. The measured data of emisivity in the region was reviewed and a new expression in function of dew point temperature was obtained for Salta which was better than an obtained earlier. With this expression as reference, a correction due to altitude was attemped. Anyone of them proved to be general, though it gives the correct values in the places where was measured. The expresions obtained and the possibilities of its use are given.