

CARTAS DEL ÍNDICE DE TURBIDEZ DE LINKE PARA LA PAMPA HÚMEDA ARGENTINA

C. Raichijk, F. Taddei

GERSolar, Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES), Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, Ruta 5 y Avda. Constitución, (6700) Luján, Buenos Aires, ARGENTINA, Tel. /Fax: (54-2323) 440241, E-mail: gersolar@yahoo.com.ar

Recibido 16/08/14, Aceptado 17/09/14

RESUMEN: Se generaron cartas con valores medios mensuales del índice de turbidez de Linke para una masa de aire igual a 2, TL2, para la Pampa Húmeda Argentina. Para ello se fusionó una grilla base estimada mediante el modelo de cielo claro ESRA a partir de valores de origen satelital de radiación solar global de cielo claro con valores estimados utilizando datos de radiación global medidos en estaciones de la Red Solarimétrica Regional de la Universidad Nacional de Luján entre los meses de julio de 2010 y febrero de 2014. Al cotejar valores interpolados obtenidos de TL2 con valores estimados en 2 estaciones no utilizadas en la generación de las cartas regionales se observaron desvíos cuadráticos absolutos medios anuales en promedio igual a 0,32 unidades. Estos resultados muestran que, sin introducir errores significativos por interpolación, estas cartas permitirán evaluar a nivel regional la radiación solar incidente de cielo claro y a su vez ser empleadas por métodos de estimación de la radiación solar para todo tipo de cielo a partir de imágenes satelitales.

Palabras clave: índice de turbidez de Linke, interpolación residual, cartas, Pampa Húmeda, Argentina.

INTRODUCCIÓN

Los modelos parametrizados de banda ancha permiten estimar la radiación solar integrada en todo el espectro incidente en superficie en condiciones de cielo claro. Los distintos modelos que pueden encontrarse en la literatura (Gueymard, 2003a; 2003b) se diferencian en el modo de evaluar los principales procesos de atenuación atmosférica de la radiación solar extraterrestre y han sido testeados respecto de mediciones de tierra de máxima calidad (Ineichen, 2006; Gueymard, 2012). El modelo ESRA-European Solar Radiation Atlas (Rigollier et al., 2000) es uno de los modelos de estimación propuestos más simple ya que requiere como datos de entrada sólo el índice de turbidez de Linke para una masa de aire igual a 2, TL2, y la elevación sobre el nivel del mar. Debido a ello ha sido adoptado por el método Heliosat-2 (Rigollier et al., 2004) que permite derivar la radiación solar incidente para todo tipo de cielo a partir de imágenes satelitales.

El índice de turbidez de Linke, TL, se define (Linke, 1922; Kasten, 1980; Louche et al., 1986) como el número de atmósferas limpias y secas equivalentes necesarias para una atenuación atmosférica observada en un determinado momento y lugar. Valores de TL cercanos a 1, correspondiente a una atmósfera ideal de Rayleigh, pueden observarse en cielos despejados a altas latitudes y con muy bajas temperaturas, en cambio valores superiores a 8 corresponden a atmósferas con altos niveles de polución (Eltbaakh et al., 2012). Si bien como plantea Gueymard (1998) TL no describe exactamente la turbidez atmosférica, ya que incluye la atenuación debida a la presencia de vapor de agua y otros gases como NO₂, este índice debe entenderse como dato de entrada clave de los modelos más simples de estimación de cielo claro y puede por lo tanto obtenerse a partir de mediciones integradas de radiación solar directa o global. Distintos autores empleando distintas parametrizaciones del espesor óptico integrado de Rayleigh y distintas bases de datos de radiación solar han estimado en numerosos lugares el índice de turbidez de Linke (Cucumo et al., 2000; Diabaté et al., 2003; Chaâbane et al., 2004; Mavromatakis y Franghiadakis, 2007).

En la actualidad valores medios mensuales de TL2 pueden obtenerse de cartas mundiales suministradas por el proyecto SoDa (www.soda-is.com). Estas cartas fueron generadas utilizando el modelo de cielo claro europeo ESRA incluyendo modificaciones por altura tanto en la definición del espesor óptico integrado de Rayleigh, sugeridas por Geiger et al. (2002), como en la estimación de la irradiancia difusa. Se fusionó en esa oportunidad (Remund et al., 2003), mediante una técnica de interpolación residual, una grilla base de valores de TL2 estimados a partir de valores medios mensuales de origen satelital de radiación global de cielo claro publicados por NASA en el marco del proyecto SRB (Solar Radiation Budget Project en sus primeras versiones) con valores estimados empleando información específica de distintas localidades. Para ello en primer lugar se modificó la resolución espacial inicial de 160', definida por los datos de NASA, a 20' mediante correlaciones con otros valores satelitales de mayor resolución y relacionados con el índice de turbidez como contenido de vapor de agua o alturas topográficas.

Como información local se utilizaron datos de tierra de radiación directa normal horaria y radiación global diaria, seleccionando previamente los casos correspondientes a condiciones de cielo claro con un criterio basado en el índice de claridad. A su vez se consideraron valores de columna de agua precipitable y espesores ópticos de aerosoles definidos en distintas longitudes de onda publicados por las estaciones de la red AERONET. El producto final se presenta con una resolución espacial de 5' utilizando la misma técnica de re-mapeado a partir de datos orográficos.

Los fenómenos de turbidez atmosférica relacionados con el tipo y contenido de aerosoles muestran en general una muy fuerte dependencia temporal y espacial debida a las diferentes fuentes y condiciones posibles de emisión como así también a la variabilidad en los factores meteorológicos y climáticos (Power, 2003). La baja precisión que se observa en la base de datos SoDa, entre 0,6 y 1 unidades de TL2, se debe fundamentalmente a la baja densidad y el fuerte sesgo geográfico (con mayoría en el hemisferio norte) de la red global de estaciones con datos locales empleada. Con respecto a nuestro país cabe destacar que sólo se utilizó información de las estaciones Córdoba-CETT y Ceilap-BA pertenecientes a la red AERONET, siendo Florianópolis en Brasil la estación considerada más cercana con datos de tierra de radiación solar.

En este trabajo se generaron cartas con valores medios mensuales de TL2 para una región plana y homogénea climáticamente como es la Pampa Húmeda Argentina. Se empleó el modelo de cielo claro ESRA con las modificaciones posteriores consideradas en Remund et al. (2003) para la generación de las cartas mundiales SoDa. Siguiendo el mismo método se fusionó, por medio de una interpolación residual, valores estimados a partir de datos satelitales medios históricos mensuales de radiación global de cielo claro, generados con una mayor resolución espacial y correspondientes a un mayor periodo de tiempo, con valores estimados empleando datos de radiación global medidos en 8 estaciones ubicadas en la región analizada pertenecientes a la Red Solarimétrica Regional de la Universidad Nacional de Luján. Se reservaron la estación Luján de esta red y la información disponible de la estación Ceilap-BA de la red AERONET para testear los resultados interpolados obtenidos respecto de valores de TL2 estimados con datos de tierra por dos métodos diferentes y en dos estaciones cercanas ubicadas a 50 km de distancia.

DATOS

Los datos de origen satelital empleados pertenecen a la base de datos SSE (Surface meteorology and Solar Energy) Release 6.0 de NASA (www.eosweb.larc.nasa.gov/sse) y corresponden a valores medios históricos mensuales de radiación global de cielo claro, H_{cSSE} , generados con una resolución espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ para el periodo julio 1983 – junio 2005.

Como información local se consideraron registros integrados cada 10 minutos de radiación global sobre plano horizontal, G_{10} , obtenidos en 9 estaciones solarimétricas para un periodo máximo de extensión entre los meses de julio de 2010 y febrero de 2014. En la Tabla 1 se consignan las estaciones consideradas, sus coordenadas y alturas sobre el nivel del mar, los sensores piranométricos utilizados y la cantidad de meses con registros de radiación global disponibles en el periodo analizado. El área de cobertura de la Red Solarimétrica Regional, Figura 1, abarca la Pampa Húmeda y la provincia de Entre Ríos, es una zona plana y homogénea climáticamente con un clima templado húmedo, Cfa según la clasificación de Köppen-Geiger, con temperaturas medias anuales entre 10°C y 15°C sin estación seca.

De la estación Ceilap-BA ($34,54^\circ\text{S}, 58,5^\circ\text{W}$, 22 msnm, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) se consideraron valores medios mensuales de nivel 2.0 de calidad para el periodo 2011-2013 de columna de agua precipitable, w, y de espesores ópticos de aerosoles, AOT_λ , definidos para las longitudes de onda 340, 380, 440, 500, 675, 870 y 1020 nm.

Tabla 1: Características geográficas de las estaciones solarimétricas consideradas, sensores empleados y cantidad de meses

Estación	Latitud S (°)	Longitud W (°)	altura (msnm)	sensor	n° de meses con registros
Anguil	36,54	63,99	165	K&Z CM5	27
Azul	36,77	59,88	132	Eppley B&W	31
Balcarce	37,76	58,30	130	Eppley B&W	28
Concepción del Uruguay	32,48	58,23	15	K&Z CM3	22
General Villegas	34,87	62,78	110	K&Z CM5	25
Luján	34,59	59,06	29	K&Z CMP11	36
Marcos Juárez	32,57	62,08	104	Eppley B&W	27
Paraná	31,85	60,54	110	K&Z CM3	36
Pergamino	33,94	60,57	65	Eppley B&W	26

con registros de irradiación solar global.

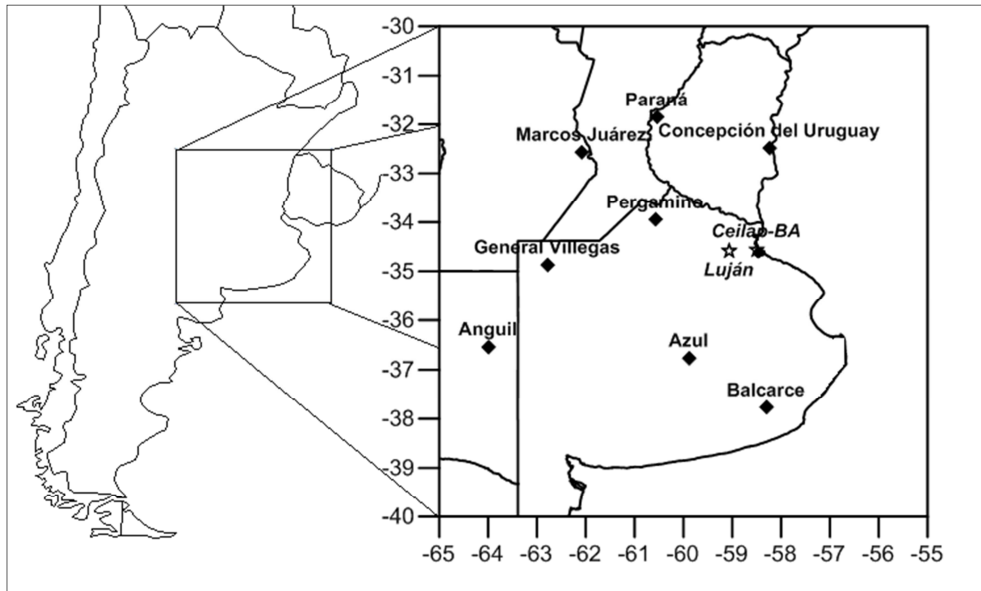


Figura 1: Área de cobertura de la Red Solarimétrica Regional. Las estaciones (☆ Luján y Ceilap-BA, perteneciente a la red AERONET, se reservaron para el estudio de validación.

MÉTODO

El modelo de cielo claro ESRA se describe y analiza detalladamente en Rigollier et al. (2000) donde se presentan a su vez expresiones analíticas que permiten estimar valores integrados en el tiempo de las componentes directa y difusa.

La radiación directa sobre plano horizontal de cielo claro, B_c , integrada para un periodo de tiempo entre los ángulos horarios ω_1 y ω_2 se expresa como:

$$B_c(\omega_1, \omega_2) = I_0 \varepsilon \frac{24}{2\pi} T_{rb}(TL2) [B_0 \omega + B_1 \sin(\omega) + B_2 \sin(2\omega)]_{\omega_1}^{\omega_2} \quad (1)$$

donde I_0 es la constante solar, 1367 W/m^2 y ε el factor de corrección por excentricidad. T_{rb} es una función de transmisión para la radiación directa en el cenit ($\gamma = 90^\circ$, $m=1$) y depende sólo de TL2 y del factor de corrección por altura del lugar, z , $p/p_0 = \exp(-z/8435.2)$:

$$T_{rb}(TL2) = \exp\{-0,8662 TL2 (p/p_0) \delta_R(p/p_0)\} \quad (2)$$

siendo δ_R el espesor óptico integrado de Rayleigh. Los coeficientes adimensionales B_0 , B_1 y B_2 son funciones de la latitud, ϕ , declinación, δ , y TL2.

La componente difusa de cielo claro, D_c , integrada entre los ángulos horarios ω_1 y ω_2 se define de manera similar:

$$D_c(\omega_1, \omega_2) = I_0 \varepsilon \frac{24}{2\pi} T_{rd}(TL2) [D_0 \omega + D_1 \sin(\omega) + D_2 \sin(2\omega)]_{\omega_1}^{\omega_2} \quad (3)$$

donde la función de transmisión para la radiación difusa en el cenit, T_{rd} , se define empíricamente como función de TL2:

$$T_{rd}(TL2) = -1,5843 \cdot 10^{-2} + 3,0543 \cdot 10^{-2} TL2 + 3,797 \cdot 10^{-4} TL2^2 \quad (4)$$

y los coeficientes adimensionales D_0 , D_1 y D_2 están definidos también como funciones de la latitud, ϕ , declinación, δ , y TL2.

La radiación global integrada de cielo claro, G_c , es la suma de las componentes integradas directa y difusa definidas por las ecuaciones (1) y (3):

$$G_c(\omega_1, \omega_2) = B_c(\omega_1, \omega_2) + D_c(\omega_1, \omega_2) \quad (5)$$

Se consideraron, al igual que en Remund et al. (2003), las correcciones por altura en la definición de $\delta_R(p/p_0)$ como en las expresiones tabuladas de los coeficientes D_0 , D_1 y D_2 . A partir de ecuación (5) se podrá estimar entonces la radiación global diaria de cielo claro, H_c , asumiendo ω_1 y ω_2 como los ángulos horarios de salida, ω_{SR} , y puesta del sol, ω_{SS} , respectivamente:

$$H_c = B_c(\omega_{SR}, \omega_{SS}) + D_c(\omega_{SR}, \omega_{SS}) \quad (6)$$

Los valores medios mensuales estimados de TL2 de la grilla base, $TL2_{SSE}$, se obtuvieron a partir de (6) definida para el día medio del mes para cada punto de la grilla de $1^\circ \times 1^\circ$ de valores satelitales medios históricos mensuales de H_{cSSE} considerados. Mediante un proceso iterativo se seleccionaron valores de $TL2_{SSE}$ que en (6) generen en cada punto y mes valores iguales a H_{cSSE} .

De la misma manera de (5), integrada cada 10 minutos, se obtuvieron en cada estación de la Red Solarimétrica Regional valores estimados de $TL2_{10}$. Para ello de la base de datos de radiación global integrados cada 10 minutos, G_{10} , se seleccionaron previamente los valores correspondientes a cielo claro, G_{c10} , empleando como en Remund et al. (2003) un criterio basado en el índice de claridad. Se tomaron como G_{c10} valores de G_{10} para los cuales se cumplen las siguientes condiciones:

$$k'_{t10} \geq 0,7 \quad (7)$$

$$K_t \geq 0,4 \quad (8)$$

$$\gamma \geq 10^\circ \quad (9)$$

donde $K_t = G/G_0$ es el índice de claridad diario, G la radiación global diaria y G_0 la radiación global diaria a tope de atmósfera; k'_{t10} es el llamado índice de claridad corregido por el ángulo solar que se define como (Pedrós et al., 1999):

$$k'_{t10} = k_{t10}/[1,031 \exp(-1,4/(0,9 + 9,4/m)) + 0,1] \quad (10)$$

siendo $k_{t10} = G_{10}/G_{010}$ el índice de claridad para el intervalo de 10 minutos analizado y m la masa de aire para el punto medio del mismo.

Siguiendo las recomendaciones empleadas en Remund et al. (2003) para valores horarios estimados de TL2 con datos de tierra no se tuvieron en cuenta valores de TL_{10} mayores en 0,5 unidades al inmediato anterior y que superaran en 1 unidad a la mediana diaria. Como valores medios mensuales estimados de TL2 en cada estación, $TL2_{local}$, se tomaron las medianas de todos los valores de $TL2_{10}$ correspondientes a cada mes.

Con los valores medios mensuales estimados de la grilla base de $1^\circ \times 1^\circ$ de $TL2_{SSE}$ y los $TL2_{local}$ obtenidos en cada una de las 8 estaciones consideradas (todas menos Luján) se generaron por interpolación residual las cartas regionales de TL2 para cada mes del año. En cada estación se definió primero la diferencia entre el valor de $TL2_{local}$ y de $TL2_{SSE}$ interpolado por kriging en el lugar. Luego estas diferencias se interpolaron, también por kriging, en toda la región analizada para finalmente al sumar ambas grillas obtener las grillas con valores fusionados de TL2. Mediante esta técnica se garantiza que en cada estación el valor fusionado final sea igual al valor de $TL2_{local}$. Se consideró que la distribución espacial de los datos, tanto satelitales como de tierra, en una región plana y homogénea climáticamente como la analizada permiten generar sin introducir errores significativos campos de valores interpolados en la misma.

Para evaluar la incerteza asociada al método de interpolación empleado se estimaron a su vez los $TL2_{local}$ en las estaciones Luján y Ceilap-BA que no fueron utilizadas en la generación de las cartas regionales. En Luján con datos de G_{10} se empleó el mismo método antes mencionado. Mientras que en la estación Ceilap-BA a partir de valores medios mensuales disponibles de columna de agua precipitable, w , y de espesores ópticos de aerosoles, AOT_λ , definidos para las longitudes de onda 340, 380, 440, 500, 675, 870 y 1020 nm se analizaron 3 métodos diferentes presentes en la literatura.

Por un lado se consideró la expresión derivada del modelo Spectral2 utilizada en Remund et al. (2003) en la generación de la base de datos SoDa:

$$TL2 = 1,8494 + 0,2425 w - 0,0203 w^2 + (15,427 + 0,3153 w - 0,0254 w^2) \beta \quad (11)$$

siendo β el índice de turbidez de Ångström presente en la expresión propuesta por Ångström (1929) para el espesor óptico de aerosoles monocromático, AOT_λ :

$$AOT_\lambda = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (12)$$

donde longitud de onda, λ , se expresa en μm . El índice de turbidez β se obtuvo del ajuste lineal de $\ln AOT_\lambda$ vs. $\ln \lambda$ utilizando los distintos valores de AOT_λ para todas las longitudes de onda disponibles.

De acuerdo a Ineichen (2006), basándose en la fórmula pirheliométrica de Kasten (1996), TL2 puede expresarse como:

$$TL2 = (9,4 + 0,9 m) (\delta_{cda} + \delta_w + \delta_a) \quad (13)$$

donde $m = 2$ y de Molineaux et al. (1998):

$$\delta_{cda} = -0,101 + 0,235 m^{-0,16} \quad (14)$$

es el espesor óptico integrado para una atmósfera limpia y seca,

$$\delta_w = 0,112 m^{-0,55} w^{0,34} \quad (15)$$

el espesor óptico integrado debido al contenido de agua precipitable y

$$\delta_a = AOT_{700} \quad (16)$$

el espesor óptico integrado de aerosoles.

Posteriormente el mismo autor (Ineichen, 2008) a partir del modelo Solis propuso una nueva función de conversión entre TL2 y w y contenido de aerosoles donde se introduce la corrección por altura p/p_0 :

$$TL2 = 3,91 \exp(0,689 p/p_0) AOT_{550} + 0,376 \ln(w) + (2 + 0,54 p/p_0 - 0,5 p/p_0^2 + 0,16 p/p_0^3) \quad (17)$$

Los valores de AOT_{550} y AOT_{700} se obtuvieron luego de ajustar para cada mes de la base de datos de la estación Ceilap-BA la función AOT_λ vs. λ considerando todos los AOT_λ disponibles.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se consignan los valores medios mensuales de $TL2_{local}$ estimados en cada una de las 8 estaciones utilizadas en la generación de las cartas regionales. No se estimó en los casos de no contar con por lo menos 2 meses con registros de radiación global para el periodo analizado.

En las Figura 2 y Figura 3 se muestran a modo ejemplo las cartas regionales con valores medios mensuales de TL2 generadas en este estudio para los meses de enero y julio conjuntamente con las cartas con valores de la base de datos SoDa.

Estación	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Anguil	3,1	...	2,9	2,9	...	2,3	2,4	2,5	2,8	2,8	3,1	3,1
Azul	3,4	3,2	2,8	2,9	2,5	2,6	2,4	2,6	3,2	3,2	...	3,6
Balcarce	3,7	3,7	3,5	3,4	2,8	...	2,8	2,8	3,5	3,6	3,7	3,9
C. del Uruguay	3,3	3,3	2,9	3,0	3,0	2,7	2,6	3,0	3,3	3,5
Gral. Villegas	3,1	3,0	3,1	3,0	2,8	2,8	2,8	2,5	3,0	3,0	3,0	3,1
Marcos Juárez	3,1	2,7	2,8	2,6	2,5	2,7	2,6	2,5	3,3	3,4	3,1	3,3
Paraná	3,2	3,1	3,0	...	2,6	2,6	2,7	2,9	3,3	3,0	3,1	3,4
Pergamino	3,0	3,6	...	3,4	3,3	3,2	3,7	3,5	3,2	3,7

Tabla 2: Valores medios mensuales de $TL2_{local}$ estimados en las estaciones utilizadas en la generación de las cartas regionales.

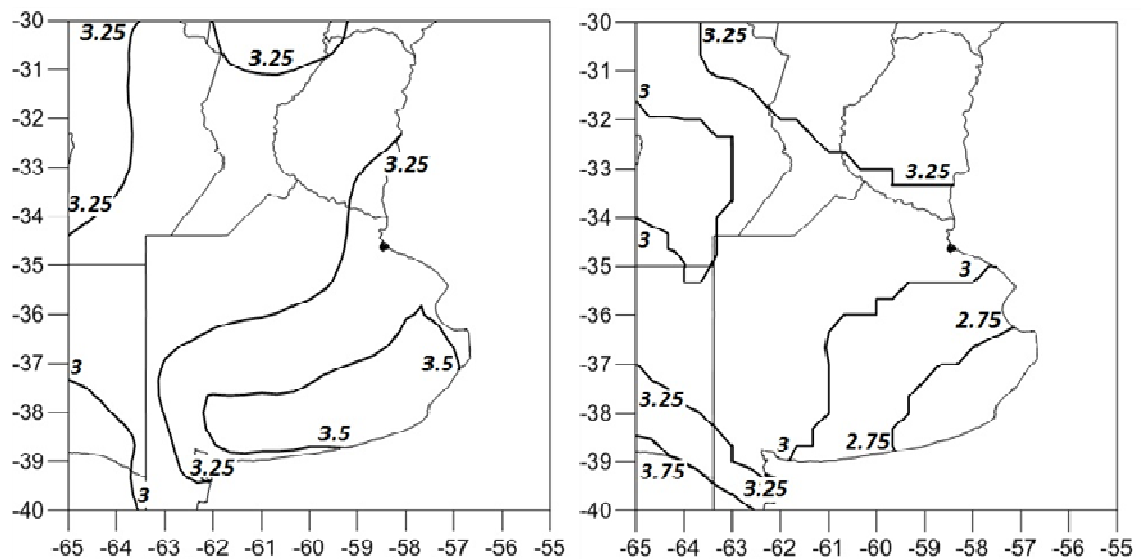


Figura 2: Cartas con valores medios mensuales de TL2 para el mes de enero generadas en este trabajo (izquierda) y con datos SoDa (derecha).

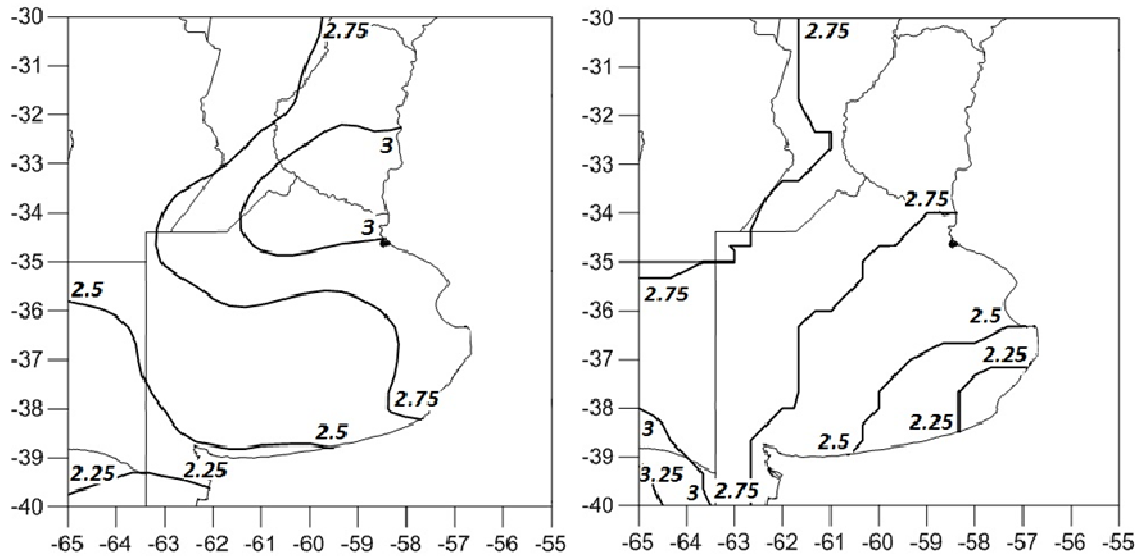


Figura 3: Cartas con valores medios mensuales de TL2 para el mes de julio generadas en este trabajo (izquierda) y con datos SoDa (derecha).

En la estación Ceilap-BA se estimaron valores medios mensuales de $TL2_{local}$ por 3 métodos distintos mediante las ecuaciones (11), (13) y (17). Al comparar valores obtenidos por (11) con (13) se observó un desvío cuadrático absoluto medio anual, RMSE, de 0,07 unidades con un sesgo absoluto medio anual, MBE, igual a -0,04. Cuando se comparó (11) con (17) las diferencias encontradas fueron levemente superiores con un RMSE de 0,13 y un MBE de -0,09. Para el estudio de la incerteza asociada al proceso de interpolación utilizado se consideró como $TL2_{local}$ de la estación Ceilap-BA los valores estimados por (11) a fin de poder compararlos con valores obtenidos de la base de datos SoDa. En la Tabla 3 se consignan los valores medios mensuales de $TL2_{local}$ obtenidos en Luján y Ceilap-BA.

Las estaciones Luján y Ceilap-BA, distantes a 50 km, se encuentran ambas en la Región Metropolitana de la ciudad de Buenos Aires (AMBA), Ceilap-BA en un área urbana y Luján en una zona semi-rural. Si se comparan los valores medios mensuales de $TL2_{local}$ de Luján estimados a partir de una base de datos de G_{10} con los valores de Ceilap-BA obtenidos de información directamente relacionada con la turbidez atmosférica, considerando los 3 métodos analizados, se observan un RMSE medio anual en promedio de 0,2 unidades con un MBE de -0,09. Estas diferencias son menores a las observadas en estudios similares por otros autores. Diabaté et al. (2003) con el objeto de testear valores estimados de TL2 de series temporales de radiación global diaria los compararon con valores estimados según la ecuación (11) en estaciones de la red AERONET ubicadas dentro de un arco de 1° con diferencias de altura de menos de 200 m obteniendo un RMSE medio de 0,9. Por su parte Tiba (2006) en 4 estaciones de la red AERONET de la Región Amazónica del Brasil con datos simultáneos de radiación global diaria empleando la ecuación (13) obtuvo RMSE medios anuales que varían entre 1,1 y 1,5, observando para el periodo de quema de biomasa (agosto-diciembre) valores entre 1 y 2,4 unidades.

La Tabla 4 muestra los valores de RMSE y MBE medios anuales obtenidos al comparar en Luján y Ceilap-BA valores estimados de $TL2_{local}$ con valores interpolados en el lugar en cartas generadas en este trabajo y con datos SoDa.

Estación	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Luján	3,2	3,1	3,1	2,9	2,7	2,7	2,6	2,7	3,1	3,0	3,2	3,1
Ceilap-BA	3,0	3,0	2,9	2,8	2,9	3,0	3,1	2,8	3,2	2,9	3,4	3,2

Tabla 3: Valores medios mensuales de $TL2_{local}$ estimados en las estaciones no utilizadas en la generación de las cartas regionales.

Estación	en este trabajo		SoDa	
	RMSE	MBE	RMSE	MBE
Luján	0,31	-0,25	0,28	-0,22
Ceilap-BA	0,33	-0,20	0,29	-0,14

Tabla 4: RMSE y MBE medios anuales al comparar valores medios mensuales estimados de $TL2_{local}$ con valores interpolados en Luján y Ceilap-BA en cartas generadas en este trabajo y con datos SoDa.

Luego de ajustar valores de H_c estimados mediante el modelo ESRA como función de TL2 en los solsticios de verano e invierno para una latitud media regional de 35°S, al propagar errores para un $\Delta TL2 = 0,32$ con un TL2 medio regional de 3,4 unidades en diciembre se obtuvo un $\Delta H_c = 0,23 \text{ KWh/m}^2$ lo que representa un error relativo de 2,5% y en junio con un TL2 medio regional de 2,8 unidades un $\Delta H_c = 0,08 \text{ KWh/m}^2$ equivalente a un error relativo de 2,7%.

Si bien los desvíos observados en Luján y Ceilap-BA son muy similares cuando se coteja sus $TL2_{local}$ con datos SoDa en otras estaciones como Balcarce y Anguil las diferencias respecto de datos SoDa son mayores: con un RMSE medio anual de 0,80 unidades y un MBE de 0,74 en la primera y un RMSE medio anual de 0,47 unidades con un MBE de -0,39 en la segunda. Los altos sesgos medios encontrados, positivo en Balcarce, negativo en Anguil, determinan que las cartas generadas en este trabajo en comparación con las cartas SoDA, como se observa en las Figura 2 y Figura 3, muestren valores mayores en el SE de la provincia de Buenos Aires y significativamente menores al SO de la misma. Por otro lado las diferencias encontradas en todas las estaciones entre valores estimados con datos de tierra y valores SoDa se encuentran dentro del rango de desvíos mensuales medios globales observados en las cartas SoDA que varían entre 0,63 y 0,89 unidades. Recientemente Hove y Manyumbu (2013) al comparar en 2 estaciones de Zimbabwe valores de $TL2_{local}$ estimados mediante el modelo ESRA a partir de datos diarios de radiación global con datos publicados por SoDa encuentran RMSE medios anuales de 0,63 y 0,77 unidades, también dentro del rango global antes mencionado.

CONCLUSIONES

Se generaron cartas con valores medios mensuales de TL2 para la Pampa Húmeda Argentina. Al cotejar valores interpolados obtenidos con valores estimados con datos de tierra por dos métodos diferentes, en 2 estaciones cercanas no utilizadas previamente, se observaron desvíos absolutos en promedio igual a 0,32 unidades. Este valor implica errores en la estimación de la radiación global diaria de cielo claro, asociados al método de interpolación empleado, del orden de 2,6%, menores a la incerteza instrumental total para una medición en tierra de la misma (Gueymard, 2012). Puede por lo tanto afirmarse que las cartas generadas permitirán evaluar a nivel regional la máxima radiación solar disponible y ser también utilizadas por métodos, como Heliosat-2, de estimación con alta resolución espacial de la radiación solar para todo tipo de cielo por medio de imágenes satelitales.

REFERENCIAS

- Ångström A. (1929) On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. *Geografiska Annaler* 11, 156–166.
- Chaâbane M., Masmoudi M., Medhioub K. (2004) Determination of Linke turbidity factor from solar radiation measurement in northern Tunisia. *Renewable Energy* 29, 2065–2076.
- Cucumo M., Kaliakatos D., Marinelli V. (2000) A calculation method for the estimation of the Linke turbidity factor. *Renewable Energy* 19, 249–258.
- Diabaté L., Remund J., Wald L. (2003) Linke turbidity for several sites in Africa. *Solar Energy* 75, 111–119.
- Eltbaakh Y., Ruslan M., Alghoul M., Othman M., Sopian K. (2012) Issues concerning atmospheric turbidity indices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 6285–6294.
- Geiger M., Diabaté L., Menard L., Wald L. (2002) A web service for controlling the quality of measurements of global solar irradiation. *Solar Energy* 73, 475–480.
- Gueymard C. (1998) Turbidity determination from broad-band irradiance measurements: a detailed multicoefficient approach. *Journal of Applied Meteorology* 37, 414–35.
- Gueymard C. (2003a) Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy* 74, 355–379.
- Gueymard C. (2003b) Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part II: validation with high quality measurements. *Solar Energy* 74, 381–395.
- Gueymard C. (2012) Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: Improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models. *Solar Energy* 86, 2145–2169.
- Hove T. y Manyumbu E. (2013) Estimates of the Linke turbidity factor over Zimbabwe using ground-measured clear-sky global solar radiation and sunshine records based on a modified ESRA clear-sky model approach. *Renewable Energy* 52, 190–196.
- Ineichen P. (2006) Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks. *Solar Energy* 80, 468–478.
- Ineichen P. (2008) Conversion function between the Linke turbidity and the atmospheric water vapor and aerosol content. *Solar Energy* 82, 1095–1097.
- Kasten F. (1996) The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness. *Solar Energy* 3, 239–244.
- Kasten F. (1980) A simple parameterization of the pyrheliometric formula for determining the Linke turbidity factor. *Meteorologische Rundschau* 33, 124–127.
- Linke F. (1922) Transmissions-Koeffizient und Trübungs faktor. *Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre* 10, 91–103.
- Louche A., Peri G., Iqbal M. (1986) An analysis of linke turbidity factor. *Solar Energy* 37, 393–396.
- Mavromatakis F. y Franghiadakis Y. (2007) Direct and indirect determination of the Linke turbidity coefficient. *Solar Energy* 81, 896–903.
- Molineaux B., Ineichen P., O’Neil N. (1998) Equivalence of Pyrheliometric and Monochromatic Aerosol Optical Depths at a Single Key Wavelength. *Applied Optics* 37, 7008–7018.

- Pedrós R., Utrillas P., Martínez Lozano J., Tena F. (1999) Values of broad band turbidity coefficients in a mediterranean coastal site. *Solar Energy* 66, 11-20.
- Power H. (2003) The geography and climatology of aerosols. *Progress in Physical Geography* 27, 502–547.
- Remund J., Wald L., Lefèvre M., Ranchin T., Page J. (2003) Worldwide Linke turbidity information. En: Proceedings of ISEES Solar World Congress, Goteborg, Sweden. Disponible en: <http://www.helioclim.net/publication/ises2003>.
- Rigollier C., Bauer O., Wald L. (2000) On the clear sky model of the ESRA – European solar radiation Atlas – with respect to the Heliosat method. *Solar Energy* 68, 33–48.
- Rigollier C., Lefèvre M., Wald L. (2004) The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy* 77, 159–169.
- Tiba C. (2006) Estimating atmospheric Linke turbidity from climatic data for Amazonian tropical sites. En: Proceedings of the World Renewable Energy, Congress IX, Florence, Italy.

LINKE TURBIDITY FACTOR CHARTS FOR HUMID PAMPAS, ARGENTINA

ABSTRACT: Maps of monthly average values of the Linke turbidity factor for air mass 2, TL2, were generated for the Humid Pampas, Argentina. A base grid of TL2 values estimated from clear-sky global irradiation satellite data by using the ESRA clear-sky model was fused with values estimated from global horizontal irradiation measurements at monitoring stations of the Regional Solarimetric Network of the Universidad Nacional de Luján between July of 2010 and February of 2014. In two stations not used in the generation of the regional maps, TL2 values derived from ground measurements were compared with the interpolated values obtained from the charts. The resulting annual root mean square deviation was, in average, 0.32 units. These results show that, since significant interpolation errors are not added, these maps will allow evaluating at regional level the incident clear-sky solar irradiation and could be used in solar irradiation estimations from satellite images as well.

Keywords: Linke turbidity factor; residual interpolation; maps; Humid Pampas; Argentina.