

## Validación de datos de radiación solar global de El Colmenar, Tucumán, periodo 2012 - 2013

María L. Molina<sup>1</sup>, Nieves Ortiz de Adler<sup>1</sup>, César, M. Lamelas<sup>2</sup>, Jorge D. Forciniti<sup>2</sup> & Ángel M. Leal<sup>2</sup>

(1) *Laboratorio de Física de la Atmósfera, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.*

[nadler@herrera.unt.edu.ar](mailto:nadler@herrera.unt.edu.ar) - [mlmolina@herrera.unt.edu.ar](mailto:mlmolina@herrera.unt.edu.ar)

Avda. Independencia 1800 (4000) S. M. de Tucumán- (0381) 4361936

(2) *Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Tucumán.*

[agrometeorologia@eeaoc.org.ar](mailto:agrometeorologia@eeaoc.org.ar) - [jorgeforciniti@eeaoc.org.ar](mailto:jorgeforciniti@eeaoc.org.ar) - [amleal@eeaoc.org.ar](mailto:amleal@eeaoc.org.ar)

RESUMEN: Se evalúa la calidad de datos de radiación solar global registrados cada 15 minutos durante el periodo agosto 2012-junio 2013, con un piranómetro de primera clase Kipp&Zonen, calibrado antes de su instalación y con control periódico de deriva durante el periodo mencionado. Está ubicado en la estación meteorológica de El Colmenar de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Tucumán, adyacente al norte de la ciudad capital. Se describen los métodos usados para detectar y filtrar mediciones que pueden ser erróneas o atípicas y se presentan resultados de los cálculos realizados a tal fin para El Colmenar: conversión de la base de datos del sistema temporal de referencia TLM a TSV; estimación de la radiación solar extra atmosférica y filtrado de los datos por índice de transparencia atmosférica. Se obtiene una serie anual de valores cada 15 minutos de datos de radiación solar global en sistema temporal de referencia TSV, depurados de mediciones erróneas o atípicas, que representa el comportamiento de la radiación solar local en ese periodo.

### 1 INTRODUCCION

Las problemáticas actuales relacionadas con la utilización del recurso solar para aprovechamiento energético, la contaminación ambiental y el cambio climático, entre otras, han puesto de manifiesto la relevancia de contar con datos de radiación solar confiables.

Sin embargo es frecuente que los datos de radiación solar de largas series temporales registradas en diferentes estaciones de colección no estén convalidados por carecer de calibraciones periódicas, lo cual limita su valor y las hace poco aptas para análisis de tendencias a mediano o largo plazo. La organización meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, WMO, 1996) señala que la deriva de la sensibilidad del dispositivo medidor es una de las fuentes principales de las estaciones colectoras de datos.

Otras fuentes de error son la incorrecta utilización del sistema temporal de referencia, el inadecuado funcionamiento y mantenimiento del sistema de medida/registro, etc. En este trabajo se realiza un control de calidad de datos de radiación solar global para detectar y filtrar estos errores,

quedando fuera de este objetivo los errores de calibración.

Los datos analizados corresponden al periodo agosto 2012- junio 2013 y fueron registrados con un piranómetro de primera clase Kipp&Zonen CM6B ubicado en la Estación Meteorológica de El Colmenar, Tucumán de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres.

### 2 ASPECTOS EXPERIMENTALES

#### 2.1 Lugar de medición

La Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres ([www.eeaoc.org.ar](http://www.eeaoc.org.ar)), EEAOC, del Gobierno provincial, a través de su Sección Agrometeorológica, operó desde 1970 una red de estaciones meteorológicas distribuidas en la provincia. Allí funcionaron interrumidamente piranógrafos bimetálicos desde enero 1971 a agosto 2001. A partir de 1994 fueron instalándose progresivamente estaciones meteorológicas automáticas (Pascale y Lamelas, 2009), lográndose a fines del año 2005, 20 estaciones meteorológicas automáticas telesupervisadas (marca Davis, Modelo Vantage pro y Vantage pro

II) equipadas con solarímetros fotovoltaicos con sensores de fotodiodo de silicio que comienzan a medir en forma sistemática desde 2006. En una de estas estaciones, la Estación Meteorológica de El Colmenar. ([www.meteaoc.org](http://www.meteaoc.org)), Tucumán (-26°47'; -65°11'; 482 msnm), donde funcionan desde 2005 dos solarímetros fotovoltaicos Davis, está instalado desde mayo de 2012 un piranómetro Kipp&Zonen CM6B del Laboratorio de Física de la Atmósfera (LAFIAT) de la FACET-UNT.

## 2.2 Piranómetro Kipp&Zonen CM6B

La serie en estudio corresponde datos de radiación solar global registrados cada 15 minutos durante el periodo junio 2012- junio 2013 con un piranómetro Kipp&Zonen CM6B (S-994044).

Estos piranómetros están diseñados para realizar mediciones rutinarias de radiación solar global a nivel de suelo sobre una superficie plana. Cumplen con las especificaciones de las Normas ISO 9060-1990 para ser instrumentos de Primera Clase. Los elementos sensores de radiación son 64 termocuplas conectadas en serie, cubiertas de carbón inorgánico de alta estabilidad, de excelente absorción espectral y características de largo plazo de estabilidad. Sus características son: a) respuesta espectral = 1 en el rango  $285 \text{ nm} < \lambda < 2800 \text{ nm}$  (Fig. 1); b) absorción 97-98 % de la energía total que recibe (el espectro solar en la superficie terrestre está en el rango  $280 \text{ nm} < \lambda < 4000 \text{ nm}$ ); c) visión de campo de  $180^\circ$ ; d) irradiancia máxima:  $2000 \text{ Wm}^{-2}$ ; e) rango operativo  $-40^\circ\text{C} - +80^\circ\text{C}$ ; f) sensibilidad:  $5 - 20 \mu\text{V/W/m}^2$ .

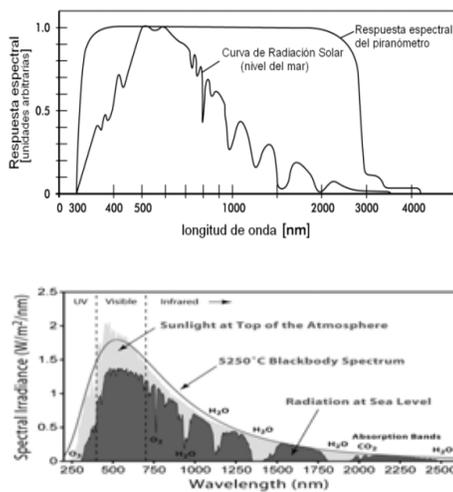


Figura 1. Respuesta espectral del piranómetros Kipp&Zonen CM6B y espectro de radiación solar.

El piranómetro Kipp&Zonen CM6B instalado en El Colmenar (CM6B S-994044) fue recalibrado en 2011 por el grupo Gersolar de la División Física del Departamento de Ciencias Básicas de la Universidad Nacional de Luján. Gersolar, utilizando un Kipp & Zonen 6MP11 que cumple con todos los criterios de especificación de las Normas ISO-9060 para ser un piranómetro Estándar Secundario. Se compararon las salidas de los dos instrumentos durante los meses de abril y mayo de 2011.

## 2.3 Data Logger

Los registros se realizan con un data logger NOVUS LOGBOXAA IP65 (N° S 11084391). Si bien el sensor entrega constantemente una tensión proporcional a la radiación recibida, el data logger lee 10 valores del voltaje en cada intervalo de 15 minutos. Con estos valores puede calcular el máximo, el mínimo o el promedio, pero se lo ha configurado para que almacene el valor promedio de los 10 datos y se lo asigne al extremo superior del intervalo de tiempo. Se adoptó este procedimiento para que fuera el mismo que el que usa el radiómetro Davis instalado en sus cercanías, en vistas a la realización de correlación de datos de ambos equipos.

Las características de este data logger son: potencia interna: batería de litio de 3.6V; entrada 4-20 mA, 0-50 mVdc, 0-10Vdc; capacidad de lectura: 32k; resolución interna: 4096 cuentas (12-bit); temperatura ambiente:  $-40^\circ\text{C}$  to  $70^\circ\text{C}$ ; dimensiones: 60 x 70 x 35 mm.

## 2.4 Controles del equipamiento

Se realizan controles rutinarios para el seguimiento de la calidad de la información registrada:

- Control de sincronización entre el Kipp&Zonen y otros instrumentos de la estación meteorológica de El Colmenar, especialmente con los solarímetros fotovoltaicos Davis instalados en sus cercanías (aproximadamente 5 metros).
- Correcciones de posibles desviaciones horarias detectadas, del data logger del Kipp&Zonen y de los otros instrumentos (principalmente por decaimiento de las baterías).
- Mantenimiento del piranómetros: limpieza e inspección periódica del domo exterior (polvo, rocío, etc.); verificación periódica del estado de desecante (silica gel).
- Control periódico de la variación de la sensibilidad (deriva) del piranómetro Kipp&Zonen. La primera contrastación fue

realizada poco antes de su instalación y repetida cada 4 meses durante el periodo junio 2012- junio 2013. Se utilizó un dispositivo basado en un proyector con lámpara de halogenuros metálicos el cual, bajo determinadas condiciones, puede proveer radiación constante (Assaf, L, et al, 2012).

- Control del error de nivelación cada vez que el piranómetro es instalado nuevamente después de haber sido trasladado para control de variación de sensibilidad (realizado en el Departamento de Luminotecnica de la FACET-UNT)
- Desplazamiento del cero (tipos A y B) debido a efectos de temperatura. El desplazamiento del cero tipo A se presenta cuando el domo interior tiene una temperatura diferente a la de las juntas frías del sensor. El de tipo B se debe al aumento o disminución de temperatura del cuerpo del instrumento. Para compensar este desplazamiento, el CM6B está provisto de un segundo elemento térmico no iluminado, conectado en forma opuesta al sensor. En ambos elementos se origina el mismo flujo de calor. De manera adicional, la cubierta de plástico blanco reduce las variaciones de temperatura debidas a la radiación solar y a la lluvia. En pruebas de laboratorio, con el instrumento en oscuridad absoluta y estabilizado térmicamente, se obtuvieron valores de radiación comprendidos entre 8 y 10 W/m<sup>2</sup>. Para mediciones realizadas en horario nocturno para diferentes meses, se obtuvieron valores comprendidos entre 10 y 14 W/m<sup>2</sup>.

### 3. TRATAMIENTO DE DATOS PIRANOMETRICOS

El paso inicial en el tratamiento de datos de radiación solar fue el análisis del sistema temporal de referencia y de la asignación de la hora de cada dato. Posteriormente fueron filtrados y aceptados o rechazados en base a diferentes procedimientos. Se utilizaron como filtros los valores de la irradiancia extra atmosférica, y el índice de claridad atmosférica.

#### 3.1. Sistema temporal de referencia

*Hora oficial o Tiempo local medio (TLM).* El tiempo universal coordinado o UTC (*Universal Time* Coordinated) es el principal estándar de tiempo por el cual el mundo regula los relojes y el tiempo. Es uno de los varios sucesores estrechamente relacionados con el tiempo medio de Greenwich (GMT). Para la mayoría de los propósitos comunes, *UTC es sinónimo de GMT*, pero GMT ya no es el estándar definido con más

precisión para la comunidad científica. UTC no cambia con las estaciones, pero la hora local puede cambiar si una jurisdicción contempla el horario de verano.

La Argentina se encuentra íntegramente dentro de dos husos horarios: UTC -4 (52°30'W--67°30'W con centro en los 60°W) y UTC -5 (67°30'W - 82°30'W con centro 75°W). El huso oficial que adopta Argentina está establecido por el Congreso Nacional a través de una ley y regulada por el Presidente de la Nación. A partir de 1920 se utiliza como huso horario oficial UTC-4, incorporando en 1930 el horario de verano UTC-3. En Argentina hubo años en los cuales el UTC podía no ser el mismo en distintas provincias y tener o no horario de verano. Estas situaciones deben ser tenidas en cuenta cuando se trabaja con datos de radiación solar.

*Tiempo solar verdadero (TSV).* Para aplicaciones solares se utiliza habitualmente como sistema de referencia temporal al tiempo solar verdadero, tiempo determinado por el movimiento diario del Sol en el firmamento. Se basa en el día solar verdadero, intervalo entre dos retornos sucesivos del Sol a un meridiano local. El TSV puede ser medido con un reloj de Sol. La duración de un día solar varía a lo largo del año. Esto se debe a varias razones. Una de ellas es que la órbita de la Tierra es una elipse y no un círculo, por lo que se mueve más rápido cuando está más cercana al Sol (Perihelio) y más lento cuando está más alejada del Sol (Afelio) (leyes de Kepler). Otras son la inclinación axial de la Tierra (*oblicuidad de la eclíptica*), el movimiento anual del Sol es a lo largo de un gran círculo (eclíptica) que se inclina al ecuador celeste de la Tierra; y el movimiento de precesión y nutación del eje de rotación terrestre.

El mediodía solar es, para cualquier punto sobre la superficie terrestre, el instante en que el Sol intercepta el plano meridiano del lugar, momento en el que alcanza su máxima elevación sobre el horizonte. El amanecer y ocaso se distribuyen simétricamente respecto del mediodía solar.

Los relojes de uso habitual están sincronizados con la hora oficial (TLM), no con el tiempo solar verdadero (TSV). Para convertir la hora oficial en hora solar local se utiliza la ecuación (en hora decimal):

$$TSV = TLM + \frac{\Delta_{\text{oficial}} - \Delta_{\text{local}}}{15} + C_h + \frac{ET}{60} \quad (1)$$

Donde  $(\Delta_{\text{oficial}} - \Delta_{\text{local}})/15$ , considera la diferencia en longitud geográfica entre el meridiano de referencia respecto del cual se define la hora oficial y el meridiano del observador. Para

Argentina, este término puede variar entre  $[-60^\circ - (-53^\circ 38')]/15 = -0,42$  h y  $[-60^\circ - (-73^\circ 34')]/15 = -0,90$  h.

$C_h$ , contempla los posibles cambios horarios que se introducen atendiendo a consideraciones de ahorro energético. Para Argentina este coeficiente es igual a -1 para el periodo 2012-2013

ET es la “Ecuación del Tiempo” que tiene en cuenta los efectos producidos por la excentricidad de la órbita terrestre, la variación en la velocidad de traslación y los movimientos de precesión y nutación del eje de rotación terrestre.

La ecuación del tiempo da la diferencia entre el tiempo solar medio (medido generalmente por un reloj) y el tiempo solar verdadero TLV (tiempo medido por un reloj de sol). Esta diferencia varía a lo largo del año: cerca del 3 de noviembre el tiempo solar medio está 16 minutos 33 segundos por detrás del tiempo solar aparente; y a mediados de febrero va más de 14 minutos por delante del aparente. Ambos coinciden en cuatro instantes del año: el 15 de abril, 14 de junio, 1 de septiembre y el 25 de diciembre (equinoccios y solsticios aproximadamente). Para calcular ET se utiliza la expresión empírica de Wolf (1968) cuya precisión es de aproximadamente 30 segundos durante las horas del día:

$$ET = 0,26 \cos x - 7,42 \sin x - 3,65 \cos 2x - 9,28 \sin 2x \quad (2)$$

ET (minutos). Donde  $x$  es el ángulo horario:  
 $x = 2\pi (n_d - 1) / 365,25$  y  $n_d$  es el día del año.

La Fig.2 muestra los resultados del cálculo realizado para El Colmenar de la hora en TLM correspondiente al mediodía solar para cada día del año. Las estimaciones son para el periodo 2012-2013 en el cual  $C_h = -1$  y  $\Delta_{\text{oficial}} = 60^\circ$ . Los valores del TLM correspondiente a las 12 TSV fluctúan a lo largo del año entre 13:06 hs (febrero) y 13:37 hs (noviembre).

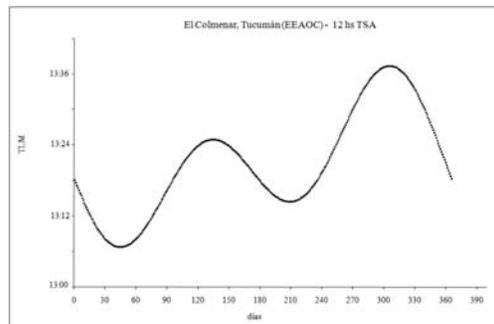
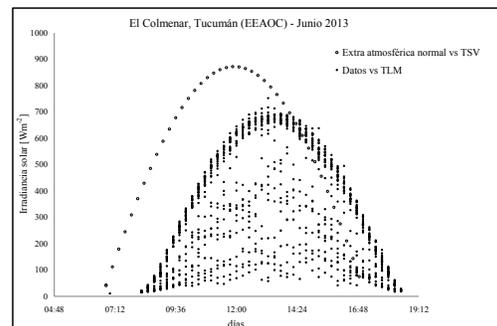


Figura 2. TLM correspondiente al mediodía solar, en función de los días del año para El Colmenar, Tucumán  $\Delta_{\text{local}} = 65^\circ 11' 31''$ . Periodo 2012-2013, para el cual  $C_h = -1$  y  $\Delta_{\text{oficial}} = 60^\circ$ .

Normalmente los sistemas de adquisición de datos utilizan el sistema TLM. Pero para el tratamiento de datos de radiación solar es necesario utilizar TSV. La magnitud de la diferencia horaria entre ambos sistemas cambia a lo largo del año, en mayor o menor grado dependiendo del valor de los términos de la ecuación 1.

Particularmente, para El Colmenar esta diferencia puede variar a lo largo del año entre 1:07 hs y 1:37 hs (Fig.2). Si se usara el sistema temporal de referencia TLM para los datos, se observaría en todos los meses del año que la hora de máxima radiación solar ocurriría entre las 13:07 y las 13:37 hs TLM. Como ejemplo, la Fig. 3a muestra los valores de radiación extra atmosférica calculados para El Colmenar (ver 4.2) para el mes de junio (curva de círculos versus TSV y los datos (trazos) versus TLM). Se logra mayor coincidencia entre las curvas (Fig.3b) cuando estimaciones y datos (cuya hora de registro fue corregida individualmente de TLM a TSV) se grafican versus TSV.

Una inspección más cuidadosa de la Fig. 3b muestra un desplazamiento del orden del intervalo de registro del data logger utilizado, lo que llevó a analizar el criterio de asignación de la hora para cada dato. El data logger está configurado para hacer 10 lecturas de tensión (proporcional a la intensidad de la radiación solar) cada 1,5 minutos y registrar el promedio. Teniendo en cuenta que hay simetría de la radiación respecto de las 12 horas solar; y que los intervalos de 15 minutos de registro se inician en horas enteras en el sistema temporal de referencia TLM, llevaron a la asignación del valor promedio de la radiación solar al centro del intervalo de registro en el sistema temporal de referencia TSV. En la figura 3c se ha tenido en cuenta este desplazamiento.



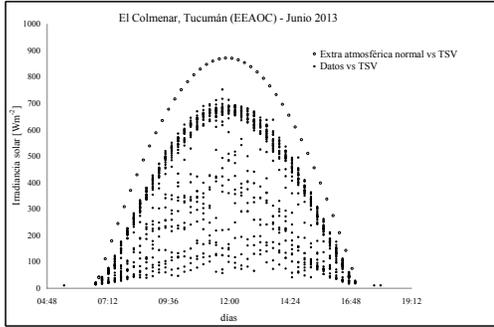
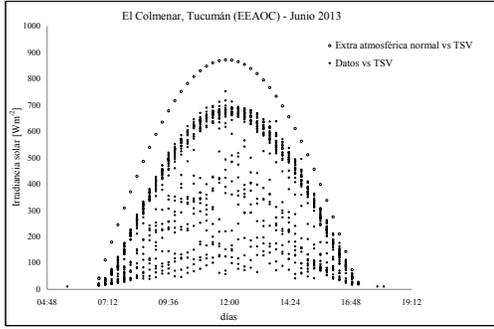


Figura 3. Irradiancia solar extra atmosférica y datos de radiación solar global en superficie. Junio 2013, El Colmenar. 3a) Irradiancia solar extra atmosférica en función de TSV (círculos) e irradiación solar global en superficie en función de TLM (trazos); 3b) Irradiancia solar extra atmosférica e irradiación solar global en superficie en función de TSV; 3c) Irradiancia solar extra atmosférica e irradiación solar global en superficie con asignación del valor de radiación promedio al centro del intervalo de 15 minutos, en función de TSV.

### 3.2 Irradiancia extra atmosférica

El primer filtro de calidad de datos de radiación solar son los valores de irradiación solar extra atmosférica o mayores valores físicamente posibles, que constituyen una cota superior que permite identificar como erróneo todo dato que la supere. La estimación de la irradiación extra atmosférica sobre una superficie horizontal,  $I_{0n}$  (ecuación 3) es sencilla y precisa puesto que se requiere solamente la excentricidad de la órbita terrestre,  $\varepsilon$ , (ecuación 4), el valor de la constante solar  $I_{CS}$ , el ángulo cenital  $\theta_z$  para el día  $n_d$  contado desde el 1° de enero.

$$I_{0n} = I_{CS} \varepsilon \cos \theta_z \quad (3)$$

$$\varepsilon = 1 + 0,033 \cos \frac{2\pi n_d}{365.25} \quad (4)$$

Se calculó  $I_{0n}$  para El Colmenar cada 15 minutos durante todas las horas de luz de todos los días del periodo agosto 2012-junio 2013. De los 20400 datos registrados en este periodo, solamente 960 (5%) superaron los valores de  $I_{0n}$ . La cantidad de datos eliminados fue variable en cada mes. Por ejemplo, para una cantidad de datos mensual de aproximadamente 1700, se eliminaron 1, 154 y 30 datos para enero, marzo y junio, respectivamente.

### 3.3 Índice de transparencia atmosférica

El índice de claridad  $K_{Ta}$  es un parámetro óptico, definido con carácter mensual,  $\bar{K}_t$ , diario  $K_t$  u horario  $K_t$ , dado por la relación entre la irradiación solar global sobre una superficie horizontal situada en Tierra y la irradiación sobre una superficie horizontal situada fuera de la atmósfera :

$$K_{Ta} = \frac{I_{datos}}{I_{0n}} \quad (5)$$

El estudio de este parámetro está ligado al interés mundial en el uso de energías renovables, indica de forma general el estado atmosférico local, las condiciones y características climáticas y su cambio en el transcurso del tiempo. Una forma de clasificar los días como claros, parcialmente nublados o nublados, es hacerlo en función del valor de  $K_{Ta}$ .

Este índice permite además identificar visualmente comportamientos irregulares de los datos, ya que sólo serían aceptables aquellos valores cuyos índice de transparencia atmosférica están concentrados por debajo de un determinado valor y uniformemente distribuido. En este trabajo se estimó el índice de transparencia atmosférica para la identificación de datos dudosos en la serie en análisis. Se tomaron todos los datos cada 15 minutos que superaron el primer filtro (3.2) y se los dividió por el valor de  $I_{0n}$  correspondiente, los resultados fueron analizados mes a mes. La Fig. 4 muestra el índice de transparencia atmosférica para los meses de enero, marzo y junio (representativos de solsticios de verano e invierno y de equinoccio) en función del número de adquisición (que se inicia con el dato del primer intervalo de 15 minutos del primer día de cada mes). Los valores de los índices de transparencia están concentrados por debajo de 0,85. Este valor constituye una cota para cada mes, que hace dudosos aquellos datos que la superan. La cantidad de datos eliminados por superar el valor de  $k_t = 0,85$  fue variable en cada mes. Como ejemplo se muestra en la figura 4 los índices  $k_t$  para los meses de enero, marzo y junio, Se eliminaron 25, 444 y 7 datos, en enero, marzo

y junio, respectivamente De los aproximadamente 19400 datos inferiores a  $I_{0n}$  del periodo agosto 2012- junio 2013, quedaron eliminados ~ 9 %.

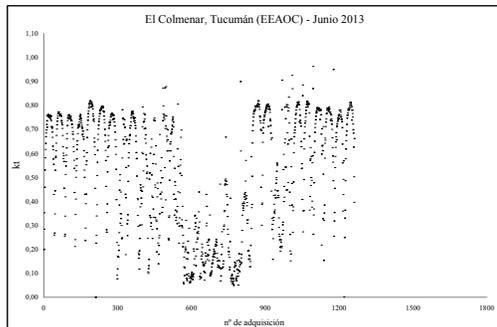
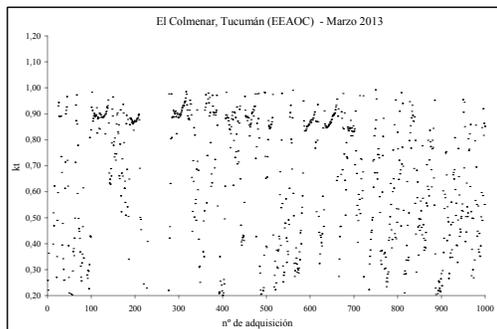
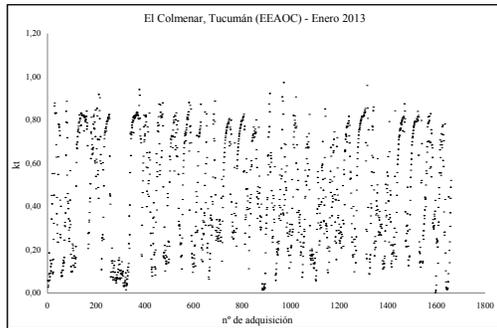


Figura 4. El Colmenar, Tucumán. Índice de transparencia versus número de adquisición, para enero, marzo y junio de 2013.

#### 4. CONCLUSIONES

La transformación de la serie de datos de radiación solar global del sistema de referencia TLM a TSV, y su posterior filtrado con la irradiancia solar extra atmosférica y el índice de transparencia de la atmósfera, deja una serie anual de valores cada 15 minutos depurada, que describe el comportamiento de la radiación en El Colmenar, Tucumán, durante el periodo agosto 2012-junio 2013.

La representatividad de esta serie como típica de un año de radiación solar global para El

Colmenar, requiere la verificación de si el periodo 2012-2013 correspondió a un año meteorológico típico, lo que implica el análisis de otros datos meteorológicos.

Se señala la conveniencia del seguimiento de la calidad de datos de radiación solar de otras series, utilizando el control realizado en este trabajo. En lo que se refiere a los sistemas temporales de referencia se trata de cálculos precisos y sencillos de realizar; y en lo relativo a los límites de radiación determinados por los valores de  $I_{0n}$  y de los índices de transparencia, son cotas basadas en razones físicas, y fueron determinados sin considerar modelos de radiación o tratamientos estadísticos.

#### 5. REFERENCIAS

- Assaf, L, M. L. Molina, N. Ortiz de Adler y M. De Nobrega. Desarrollo de un dispositivo de contrastación de radiómetros basado en lámparas eléctricas. Publicación en Edición Especial de la Revista Científica AVERMA, Vol 16, ISSN: 0329-5184, 2012.
- Pascale A.J. y Lamelas C.M. 25 años de labor agrometeorológica en la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres – Tucumán – Argentina. Rev. Facultad de Agronomía UBA, 29(2):81-136, 2009.
- World Meteorological Organization, WMO. Guide to meteorological instrument and methods of observation. 6 th. edition. WMO N°08, Swiss, 1996.