

## Influencia de la temperatura instrumental en las medidas de irradiancia espectral

### Instrumental temperature effects on the spectral irradiance measurements

José L. Gómez-Amo, Víctor Estellés, M<sup>a</sup> José Marín, José A. Martínez-Lozano,  
M<sup>a</sup> Pilar Utrillas y Roberto Pedrós

Grupo de Radiación Solar, Dpto. Física de la Terra i Termodinàmica, Universitat de València, C/ Dr. Moliner,  
50, 46100 Burjassot. Email: jmartine@uv.es.

#### RESUMEN

Las técnicas radiométricas se han empleado durante muchos años para obtener propiedades ópticas de los aerosoles en la columna atmosférica. Habitualmente los espectrorradiómetros y fotómetros permanecen en el exterior, sobre seguidores automáticos, que permiten la medida de la radiación solar directa a lo largo de todo el día. Estos instrumentos se ven afectados por la temperatura ambiente, por lo que es preciso determinar su efecto para corregir las medidas de irradiancia.

**Palabras clave:** Efecto temperatura, Espectrorradiómetros, Fotómetros.

#### ABSTRACT

For many years the radiometric techniques have been widely applied for retrieving several aerosol optical properties in the atmospheric column. Usually the spectroradiometers are deployed outdoors on automatic sun tracking systems that allow the systematic measurements of solar direct irradiance all day long. However these instruments are frequently affected by ambient temperature depending on the considered spectral range. Therefore we need to experimentally assess the temperature effect so we can correct its effect on the irradiance measurements.

**Key words:** Temperature effect, Spectroradiometers, Sunfotometers

#### REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] P. J. Starks, F. R. Schiebe, J. F. Schalles, "Characterization of the accuracy and precision of spectral measurements by a portable, silicon diode array spectrometer", *Photogram. Eng. Rem. S.* **61** (10), 1239-1246 (1995).
- [2] C. R. Osterwald, K. A. Emery, "Spectroradiometric sun photometry", *J. Atmos. Ocean. Tech.* **17** (9), 1171-1188 (2000).
- [3] L. Ylaintila, J. Scherer, "Temperature effects of PTFE difusers", *Opt. Mater.* **27** (12), 1811-1814 (2005).
- [4] R. McKenzie, J. Badosa, M. Kotkamp, P. Johnston, "Effects of the temperature dependence in PTFE diffusers on observed UV irradiances", *Geophys. Res. Lett.* **32** (6), 1-5 (2005).
- [5] J. L. Gómez-Amo, J. A. Martínez-Lozano, M. P. Utrillas, R. Pedrós, V. Estellés, "Column-integrated aerosol optical properties in Sodankylä (Finland) during the Solar Induced Fluorescence Experiment (SIFLEX-2002)", *J. Geophys. Res.*, en prensa (2006).
- [6] J. L. Gómez-Amo, *Caracterización de aerosoles atmosféricos en zonas climáticas diferentes: Sodankylä, Barrax y Marrakech*. Tesis Doctoral, Universidad de Valencia (2006).
- [7] V. Estellés, J. L. Gómez-Amo, R. Pedrós, M. P. Utrillas, J. A. Martínez-Lozano, J. C. Fortea, F. Molero, M. Pujadas, "Ground based measurements of spectral solar irradiance, spectral sky radiance and columnar atmospheric constituents" SEN2FLEX First Progress Meeting, Valencia, (2006).

- [8] B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanré, J. P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, (...), A. B. Smirnov, "AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization", *Rem. Sens. Environ.* **6**, 1-16 (1998).

## 1. Introducción

El efecto de la temperatura en fotometría adquiere gran importancia, especialmente cuando los instrumentos de medida deben permanecer a la intemperie, donde pueden verse sometidos a un rango de temperaturas muy variable y en algunas ocasiones extremas.

Los efectos de la temperatura sobre los distintos componentes de un espectrorradiómetro han sido ampliamente analizados en la bibliografía (Starks, 1995 [1]; Osterwald & Emery, 2000 [2]; Ylaintila & Schereder, 2004 [3]; McKenzie, 2005 [4]). De estos trabajos se deduce que esta dependencia de las medidas de irradiancia con la temperatura tiene un marcado carácter espectral. En particular, para los sensores basados en fotocélulas de silicio, es importante en la región infrarroja, no afectando de manera relevante las medidas que se realizan en la banda del visible.

Al intentar caracterizar el espesor óptico de aerosoles en estas bandas se han observado comportamientos anómalos posiblemente debidos a la temperatura [5, 6]. Obviamente una solución consiste en la termostatación completa del instrumento. Pero esto, aparte el coste que conlleva, convierte a estos instrumentos en estáticos, perdiendo con ello una de sus principales ventajas, que es la posibilidad de utilizarlos para medidas de campo. Por este motivo, en este trabajo se determina la dependencia de las medidas de irradiancia espectral con la temperatura, para tres instrumentos: a) un espectrorradiómetro Licor-1800; b) un espectrorradiómetro Optronics OL754; c) un fotómetro solar Cimel CE318.

## 2. Instrumentación

El espectrorradiómetro Licor, modelo 1800, permite medidas espectrales entre 300 nm y 1100 nm, con una precisión de 6 nm. El receptor óptico es un difusor de teflón que posee un campo de visión de  $2\pi$  sr. El monocromador es una red holográfica que dispersa la radiación en sus componentes espectrales. A la entrada del monocromador existe una rueda con siete filtros y un disco opaco. El detector, que está situado en la ventana de salida del monocromador, es un fotodiodo de silicio.

El espectrorradiómetro optronics OL754-O-PMT es un instrumento de alta precisión que permite determinar la irradiancia espectral directa y global, en el rango 250 - 800 nm. Este instrumento consta de un doble monocromador para seleccionar las longitudes de onda y de un fotomultiplicador como elemento sensor. El doble monocromador tiene una resolución de 0.05 nm.

El fotómetro solar Cimel CE318, está diseñado para la medida autónoma y automática de la radiancia solar directa. También permite la medida de la radiancia de cielo, tanto en el plano almucantar como en el plano principal del sol. Posee una rueda de filtros interferenciales centrados en las longitudes de onda 440, 670, 870, 940 y 1020 nm. El canal 940 nm se emplea para la medida del contenido de vapor de agua en la columna vertical atmosférica. En general el instrumento realiza una medida de radiancia directa cada 15 minutos y una medida de radiancia de cielo cada hora.

## 3. Metodología

Evaluar el efecto de la temperatura sobre estos instrumentos supone disponer de una relación entre las irradiancias medidas a una temperatura cualquiera y las que deberían obtenerse a la temperatura de calibrado, 25°C. En el caso del Licor-1800 y el Optronics OL754, se dispusieron los instrumentos para realizar medidas continuas (cada 5 minutos) de sus propias lámparas de calibrado. Esto supone, en el caso del Licor, trabajar con una lámpara de 200 W, montada en el Optical Radiation Calibrator, estabilizada en corriente. En el caso del Optronics se trabaja asimismo con una lámpara de 150 W (la 455-4-1), con una fuente de corriente programable OL65A, conectada a un controlador Mod. 450. Para la medida de la temperatura se colocó un termistor perfectamente calibrado en el interior de cada instrumento, junto al detector. La temperatura de la habitación, monitorizada con otro termistor similar, fue incrementándose mediante un calefactor eléctrico. La experiencia se repitió tres veces en condiciones similares, obteniendo una variación de temperatura entre 25°C y 35°C. En la Figura 1 se muestran las temperaturas del detector del Licor-1800 y del OL-754, además de la temperatura ambiente durante la experiencia. Se observa que la diferencia entre ellas aumenta a medida que va aumentando la temperatura del aire.

Para el caso del Cimel, el estudio de la influencia de la temperatura se realizó en cinco sesiones diferentes, a lo largo de los años 2003 – 2005, de forma simultánea a la calibración en radiancia en laboratorio. La metodología experimental es equivalente a la aplicada en el caso anterior: en un cuarto oscuro se dispone el cabezal óptico del instrumento enfrenteado al puerto de salida de una esfera integradora iluminada por una lámpara halógena. La radiancia de salida de esta esfera es conocida, y permite realizar la calibración del instrumento en su medida de radiancia. Independientemente de la incertidumbre de esta calibración, la dependencia de la medida del instrumento con la temperatura puede ser adecuadamente caracterizada. Para ello se hace variar la temperatura ambiente del cuarto oscuro mediante un sistema calefactor. En el caso del fotómetro Cimel, la temperatura se hizo variar entre los 22 y los 33°C. El sensor de temperatura viene instalado de fábrica dentro del cabezal óptico del instrumento. En las medidas de campo, el valor de la temperatura se registra automáticamente junto a cada adquisición de radiancia, por lo que la corrección puede aplicarse consistentemente. El instrumento realiza un barrido de la rueda de filtros para obtener un espectro completo en unos 10 s. Manualmente se ejecutan dichos barridos durante la rampa de calentamiento del cuarto oscuro, posibilitando relacionar la intensidad de la señal con la temperatura ambiente, procurando que la velocidad de calentamiento no sea tal que no permita la estabilización térmica del sistema sensor.

Las fuentes de calibración utilizadas fueron una Optronic OL455 y una Bentham SRS8. La fuente OL455 consiste en una lámpara halógena de 150 W reflectorizada con una fuente de alimentación estabilizada y con rampa de encendido. El diámetro de la esfera integradora y del puerto de salida es de 152 y 25 mm respectivamente. La luminancia en el puerto de salida es de 15 – 40 kfL. La fuente Bentham SRS8 posee una lámpara halógena de 50 W con una fuente de alimentación estabilizada y rampa de voltaje.

En este caso el diámetro de la esfera integradora es de 200 mm y el del puerto de salida es 50 mm. La potencia de la lámpara y el diámetro del puerto de salida de la esfera son dos parámetros importantes a la hora de definir el nivel de radiancia de salida, que permiten trabajar con las diferentes ganancias y canales del fotómetro. El diámetro del puerto de salida es de interés también para definir la distancia óptica entre la esfera y el cabezal óptico, minimizando la contribución de la luz que se refleja en el interior del colimador.

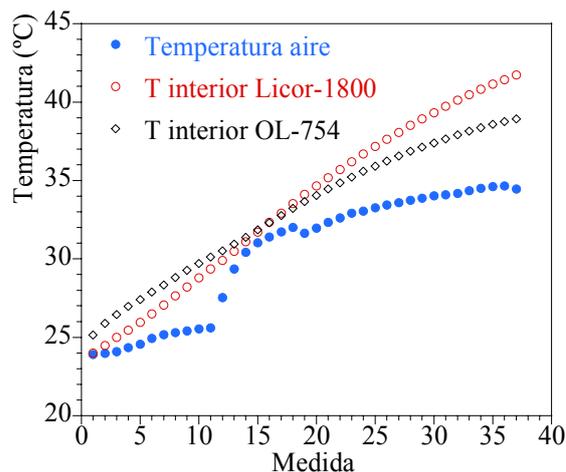


Fig. 1. Evolución de la temperatura ambiente y la registrada en el interior del Licor 1800 y del OL-754.

La irradiancia medida en estas condiciones por cada instrumento vendrá dada, para cada longitud de onda, por la expresión:

$$I_{\lambda T} = I_{\lambda 25^{\circ}\text{C}} \left( 1 + \frac{c_{\lambda}}{100} (T - 25) \right) \quad (1)$$

donde  $I_{\lambda T}$  representa la irradiancia, procedente de la fuente de calibrado, medida a la temperatura T a la que se encuentra el sensor, mientras que  $I_{\lambda 25^{\circ}\text{C}}$  es la irradiancia que debería obtenerse a 25°C. El coeficiente de temperatura  $c_{\lambda}$  es la pendiente de la recta de ajuste entre la irradiancia  $I_{\lambda T}$  y la diferencia de temperaturas, de forma que representa la diferencia entre irradiancias por cada grado de diferencia de temperaturas entre T y 25°C (%/°C). Ajustando los puntos experimentales obtenidos a esta expresión es posible determinar el coeficiente de temperatura espectral para cada instrumento.

Este coeficiente puede aplicarse a las medidas de campo, corrigiendo el efecto de la temperatura sobre el instrumento, sin más que despejar  $I_{\lambda 25^{\circ}\text{C}}$  en la ecuación (1).

## 4. Resultados

### 4.a. Espectrorradiómetros

En el caso del Licor, se ha obtenido el coeficiente de temperatura para cada una de las tres medidas realizadas. Los resultados son similares y las diferencias entre ellos no exceden los 0.1 %/°C, siendo más importantes en la región ultravioleta B (300-320 nm). Posteriormente se ha calculado el valor promedio para obtener un único valor espectral del coeficiente de temperatura, que viene representado en la Figura 2.

Tal y como se esperaba el coeficiente de temperatura es mucho más importante en la región ultravioleta (300-400 nm) e infrarroja (a partir de 1000 nm) que en el visible, donde la desviación debida a la temperatura es solamente de 0.05%/°C. Se observan variaciones bruscas en las longitudes de onda que coinciden con las posiciones de los cambios de filtro del instrumento. Si se comparan los resultados obtenidos se observa que están dentro del rango proporcionado por el fabricante (Tabla I). Aunque éste no proporciona ninguna información acerca del efecto sobre los filtros, los resultados obtenidos muestran que el efecto de la temperatura es especialmente importante en los cambios de 558-559 nm y 938-939 nm.

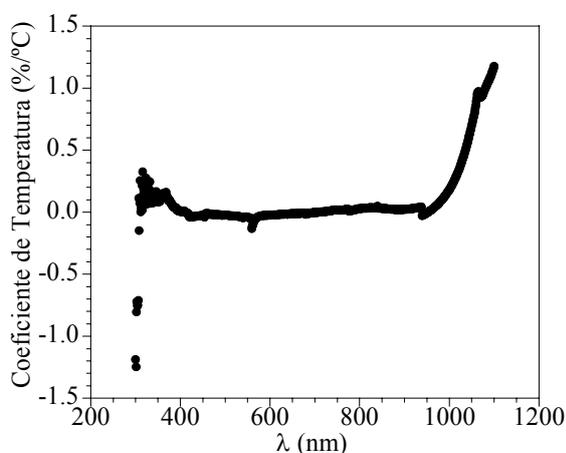


Fig. 2. Evolución del coeficiente de temperatura del Licor con la longitud de onda.

En el caso del Optronic, en la Figura 3 se ha representado el coeficiente de temperatura en función de la longitud de onda. Se observa que en este caso la variabilidad es mayor, aumentando desde -1 %/°C para 300 nm hasta 0 %/°C a 800 nm.

En ambos casos el coeficiente de correlación obtenido en el ajuste tiene un marcado carácter espectral (Figura 4). Cuanto más cercano a la unidad sea su valor absoluto mayor importancia tendrá la temperatura sobre las medidas realizadas, y por tanto será necesario realizar la corrección correspondiente. Una vez obtenido el coeficiente de temperatura se ha aplicado la ecuación (1) para corregir algunas medidas de irradiancia solar obtenidas en diversas campañas de medida. Estas campañas suelen realizarse en verano, y en ellas los instrumentos se hayan expuestos a una gran cantidad de energía en forma de radiación solar. Aunque se mantienen a la sombra entre medida y medida, fácilmente los valores de la temperatura del detector puede alcanzar los 40°C e incluso superarlos. En estos casos se ha supuesto que por encima de 35°C se mantiene la relación lineal obtenida.

TABLA I. Coeficientes de temperatura proporcionados por fabricante para el Licor-1800 comparados con los obtenidos en este trabajo.

Región espectral (nm)	Coeficiente de Temperatura (%/°C)	
	Fabricante	Obtenidos
350	-0.1	0.15±0.04
400-950	0.05	0.050±0.004
1000	0.5	0.20±0.03
1000-1100	1-2	0.20-1.30±0.05
Cambios de filtro (nm)		
558-559		-0.15±0.04
938-939		-0.10±0.03

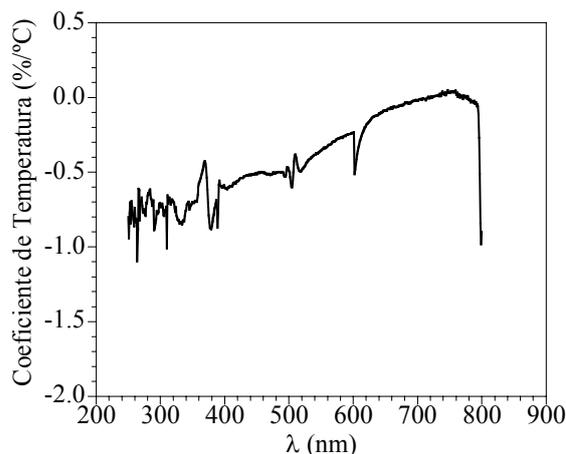


Fig. 3. Evolución del coeficiente de temperatura del Optronic con la longitud de onda.

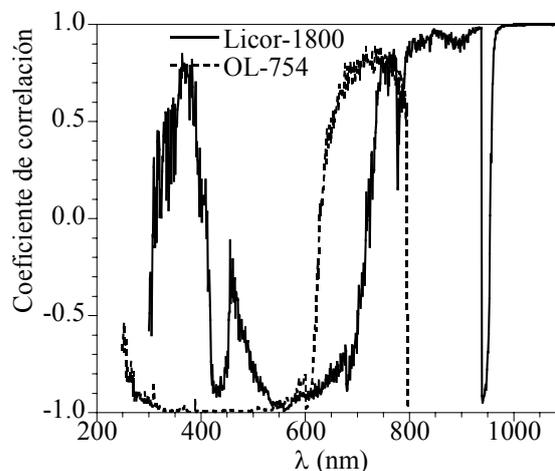


Fig. 4. Coeficiente de correlación espectral de los ajustes obtenidos para ambos instrumentos.

Para medir la temperatura se instaló un termistor en el interior del instrumento, cerca del detector, tal y como se hizo previamente en el laboratorio. Se efectuaron medidas de irradiancia solar y de temperaturas (interna y ambiente) cada cinco minutos durante unas 5 horas al día, de forma que se dispone muestras de más de 50 medidas al día, y por tanto de datos suficientes como para estudiar en que casos es necesario realizar la corrección por

temperatura. Se tomaron tres días de medidas de la campaña SEN2FLEX (Estellés et al., 2006 [7]) que tuvo lugar en La Mancha en verano de 2005.

Para evaluar el efecto de la temperatura se calculó la desviación típica (2) a lo largo del día entre los valores de irradiancia medidos directamente ( $I_T$ ) y corregidos ( $I_{25^\circ\text{C}}$ ) por la ecuación (1).

$$\sigma_\lambda = 100 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \left( \frac{I_{iT} - I_{i25^\circ\text{C}}}{\frac{I_{iT} + I_{i25^\circ\text{C}}}{2}} \right)^2} \quad (2)$$

El subíndice  $\lambda$  señala el carácter espectral de la desviación típica. En la figura 5 se muestra el cociente entre la irradiancia antes y después de aplicar la corrección por temperatura al Licor-1800. A simple vista se observan diferencias significativas entre ellos, sobre todo en el ultravioleta y el infrarrojo. Como se suponía a priori, el efecto de la temperatura alcanza su importancia en la zona (300-330 nm) superando el 3% de desviación media y alcanzando valores realmente elevados (hasta 30%) para  $\lambda < 310$  nm. Donde parece que la temperatura tiene una influencia realmente significativa es en la región infrarroja, puesto que para  $\lambda < 950$  nm la desviación típica toma un carácter ascendente alcanzando el 5% a 1000 nm y llegando hasta el 35% en 1100 nm (Figura 6). El tramo espectral realmente importante para el posterior uso en este trabajo se sitúa entre 1000 y 1025 nm ya que el valor del espesor óptico de aerosoles a 1020 nm suele emplearse en los algoritmos de inversión para obtener su distribución de tamaños. En él la desviación típica no supera el 7%. Además se observa que en el cambio de filtro de 558-559 nm la desviación debida a la corrección por temperatura es relativamente importante y alcanza el 3.5%.

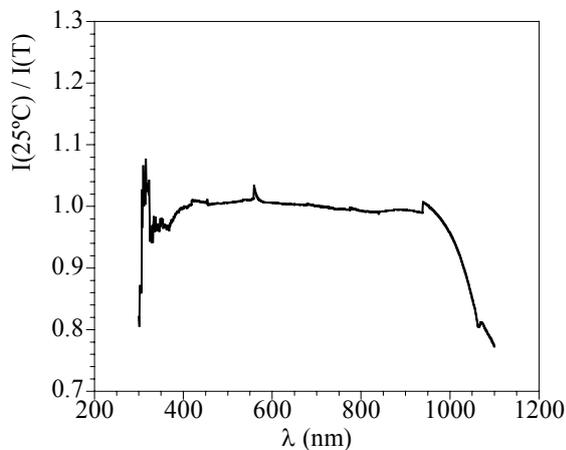


Fig.5. Cociente entre la de irradiancia antes y después de aplicar la corrección por temperatura al Licor.

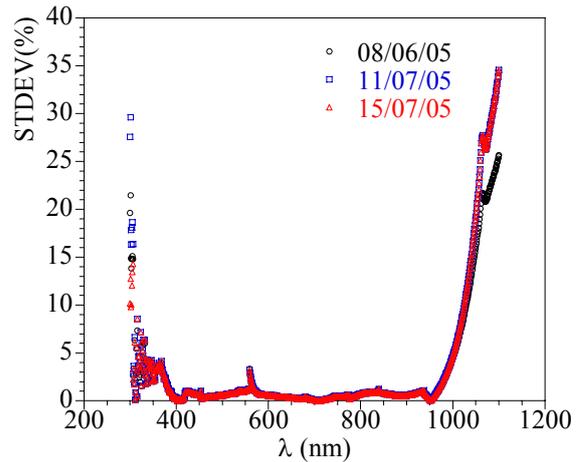


Fig. 6. Desviación estándar entre las medidas de irradiancia antes y después de aplicar la corrección por temperatura en el Licor 1800.

En el caso del Optronic, el cociente entre la irradiancia antes y después de aplicar la corrección por temperatura muestra que ésta afecta a todo el espectro visible (Figura 7). Aunque los valores máximos observados en la desviación estándar (20%, Figura 8) no superan los de los extremos del Licor 1800, y varían entre el 15 % y el 10 % en el intervalo visible (400 – 700 nm) mientras que alcanzan el 20 % en el intervalo UV. Esto hace imprescindible la corrección por temperatura de todas las medidas de irradiancia que se tomen con este instrumento.

Los experimentos que han llevado a conocer la dependencia con la temperatura de los instrumentos empleados en este trabajo se llevaron a cabo en el año 2005. Por tanto es imposible realizar la corrección de las medidas realizadas anteriormente ya que no se tomaron medidas de la temperatura interna del detector. No obstante, y puesto que previamente a la realización de dichos experimentos ya se suponía que en algunos casos la temperatura sería fundamental se ha evitado emplear valores en longitudes de onda afectadas por el efecto térmico en el caso del Licor. En cuanto al Optronic se ha procurado emplear barreras físicas manteniéndolo a la sombra entre medidas consecutivas cubriéndolo con un material reflectante en el momento de medir.

#### 4.b. Fotómetro

En el caso del Cimel, el efecto de la temperatura se hace evidente únicamente para los canales 670, 870 y 1020 nm, siendo en la práctica despreciable para el filtro de 670 nm. En la Figura 9 se muestra la medida realizada en el laboratorio (círculos vacíos) que muestra la linealidad de la dependencia.

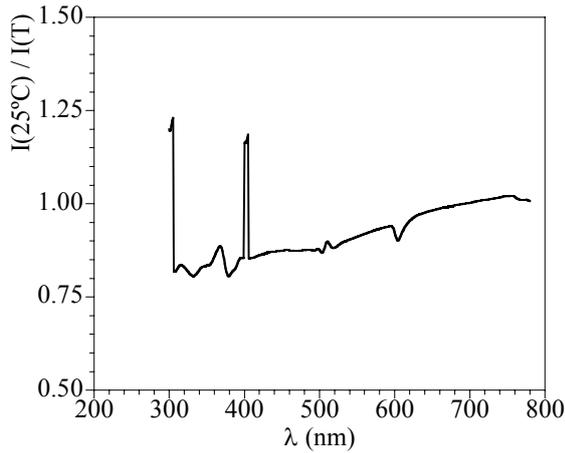


Fig. 7. Cociente entre la irradiancia antes y después de aplicar la corrección por temperatura al Optronic.

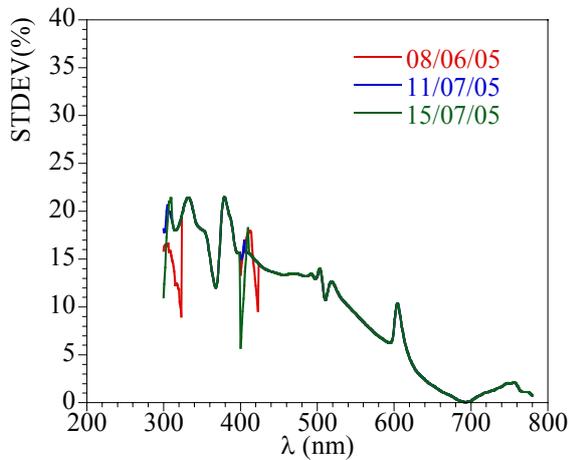


Fig. 8. Desviación estándar entre las medidas de irradiancia antes y después de aplicar la corrección por temperatura en el Optronic.

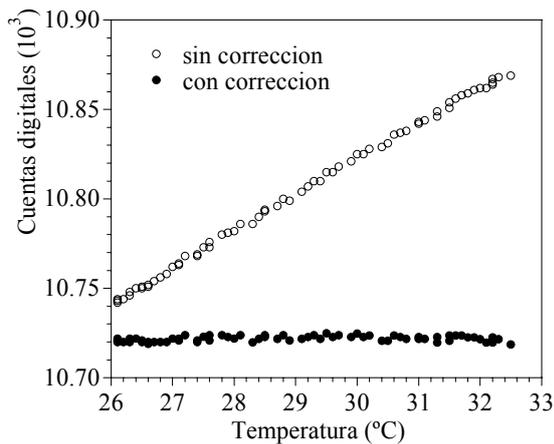


Fig. 9. Efecto de la temperatura sobre la radiancia medida en laboratorio y radiancia corregida por los coeficientes obtenidos.

Tomando el valor medio y la desviación estándar de los coeficientes térmicos obtenidos en las diversas sesiones, se han obtenido los valores de  $-0.076 \pm 0.005$  y  $0.24 \pm 0.02$   $\%/^{\circ}\text{C}$  para los canales

870 y 1020 nm respectivamente. Para ello hemos supuesto que no existe una variación temporal de esta dependencia. Según Holben et al. (1998) [8] el coeficiente térmico del canal 1020 es de  $0.25\%/^{\circ}\text{C}$ , de acuerdo con nuestras estimaciones. Sin embargo, no existen referencias acerca del coeficiente térmico del canal 870. Dado que el efecto neto de la temperatura sobre el sensor es producto de la combinación de los efectos sobre el sensor y el filtro interferencial, la información ofrecida por el fabricante no es suficiente para caracterizar la respuesta instrumental. Según nuestros resultados, para una temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$  en el interior del cabezal óptico, la variación de señal de radiancia será de un 3.6% a 1020 nm y de un 1.1% a 870 nm. A 670 nm la variación sería únicamente de un 0.2%, despreciable como hemos avanzado antes. En la Figura 9 también se ha representado mediante círculos sólidos la radiancia medida de la lámpara después de aplicar la ecuación (2) con los coeficientes obtenidos aquí observándose cómo desaparece la dependencia con la temperatura.

## 5. Conclusiones

Se ha evaluado el efecto de la temperatura en dos espectrorradiómetros, Licor 1800 y OL-754, y en un fotómetro Cimel CE318. Para ello, se parte de los valores básicos obtenidos para una temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ , y se evalúan los efectos debidos al calentamiento del aparato, estableciendo una función de correlación entre ambos. En el caso del espectrorradiómetro Licor-1800 se obtienen desviaciones mayores en la zona del ultravioleta y el infrarrojo además de en los cambios de filtro, posiblemente debidos a su deterioro. En la región visible la desviación producida es de  $0.05\%/^{\circ}\text{C}$  y los valores obtenidos coinciden con las especificaciones del fabricante.

En el caso del Optronic OL-754 se ha observado una dependencia mayor con la temperatura prácticamente en todo su rango de trabajo, pero especialmente en el intervalo 300 - 600 nm. En el caso del fotómetro Cimel, se producen variaciones sobre todo en los canales 870 y 1020 que varían la radiancia entre un 1.1% y un 3.6%.

Para todos los instrumentos se recomienda la medida de la temperatura del sensor para corregir posteriormente las medidas, especialmente si se pretende emplear las regiones espectrales más afectadas.