

Diseño y desarrollo de un fotómetro solar basado en tecnología LED

Design and development of a sunphotometer based on LED technology

S. Papandrea^a, C. Repetto^b, G. Junod^b, O. Vilar^a, J.C. Dworniczak^a, M. Raponi^{a*}

a. Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones, CEILAP, UNIDEF (MINDEF-CONICET), UMI-IFAECI-CNRS 3351, Juan Bautista de La Salle 4397, (B1603ALO) Villa Martelli, Argentina.

b. Facultad Regional Buenos Aires - Universidad Tecnológica Nacional, CABA, Argentina

Recibido: 10/11/2014; aceptado: 15/06/2015

Los sistemas de monitoreo remoto atmosféricos basados en mediciones de radiación solar (directa o dispersada), son de gran utilidad a la hora de estudiar fenómenos naturales (como las emisiones volcánicas) o de origen antropogénico (quema de biomasa, emisiones industriales, etc.) Empleando detectores apropiados, es posible sensar radiación solar en el rango ultravioleta, visible o infrarrojo cercano, y determinar la concentración de ciertos gases y la presencia de material particulado (aerosoles) en la atmósfera. Existen diferentes técnicas e instrumentos de monitoreo, desde equipos complejos como los sistemas LIDAR (basados en la emisión de un haz láser a la atmósfera), hasta instrumentos de menor complejidad y costo, que utilizan filtros espectrales y sensores específicos. En este trabajo se presenta el diseño y desarrollo de un fotómetro solar portable, autónomo y de bajo costo, capaz de determinar el espesor óptico de aerosoles (AOT, Aerosol Optical Thickness) en diferentes canales de medición. El instrumento está compuesto por un sistema de posicionamiento espacial (suntracker), un detector basado en tecnología LED y electrónica asociada. Se caracterizaron diferentes tipos de LEDs con el fin de seleccionar los más apropiados para ser empleados como sensores cuánticos de radiación. Se diseñaron los circuitos electrónicos para el acondicionamiento de las señales y su adquisición con un microcontrolador, y se elaboró una interfaz visual (en Visual C#) para el control de todo el sistema

Palabras clave: fotómetro solar, AOT, aerosoles, LED.

The remote sensing systems based on atmospheric measurements of solar radiation (direct or scattered) are very useful when studying natural (such as volcanic emissions) or anthropogenic (biomass burning, industrial emissions, etc.) phenomena. The concentration of certain gases and the presence of particles (aerosols) in air can be determined by using appropriate sensors. Also, solar radiation can be sensed in the ultraviolet-visible or near-infrared range. There are different techniques and monitoring instruments, from complex equipment such as LIDAR systems (based on the emission of a laser beam into the atmosphere) to instruments of lower cost and complexity, which use spectral filters and specific sensors. In this paper, the design and development of a portable, self-contained, low cost sun photometer, able to determine the measurement of AOT (Aerosol Optical Thickness) in different channels is presented. The instrument is composed of a spatial positioning system (suntracker), a LED-based detector and associated electronic circuits. Different types of LEDs were characterized in order to select the most suitable one for use as radiation sensors quantum. Electronic circuits were designed to set up and acquire signals with a microcontroller. Also, a visual interface (Visual C#) to control the entire system was developed.

Keywords: sun photometer, AOT, aerosols, LED.

I. INTRODUCCIÓN

La atmósfera terrestre contiene gases (como el nitrógeno y el oxígeno) y pequeñas partículas, denominadas aerosoles, que tienen un diámetro medio del orden de 0,01 a 100 μm y se encuentran en suspensión en el aire formando mezclas con otros componentes atmosféricos, tanto en fase líquida como gaseosa. La distribución de tamaños, el índice de refracción y la higroscopía, son unas de las características más importantes de los aerosoles. En general, el tipo de aerosoles y su distribución en el espacio y tiempo depende de la ubicación geográfica, de las condiciones meteorológicas y de la circulación atmosférica en diferentes escalas. La composición química de los aerosoles afecta directamente la forma en que la atmósfera interactúa con la radiación solar, ya que alteran el índice de refracción global de la misma.

Algunos aerosoles son liberados directamente a la atmósfera (emisiones primarias) y otros son emitidos como gases que al reaccionar forman partículas (emisiones secundarias). Según la fuente que los genera podemos hablar de aerosoles naturales (cenizas volcánicas, tormentas de polvo, incendios forestales, etc.) y de aerosoles antropogénicos, es decir, generados por la actividad humana (quema de biomasa, combustión de procesos industriales, combustión de motores de medios de transporte, etc.)

El espesor óptico de aerosoles (Aerosol Optical Thickness, AOT) indica hasta qué punto estas pequeñas partículas afectan la transmisión de la radiación solar a través de la atmósfera. Cuanto mayor es el espesor óptico (para una determinada longitud de onda λ), menor es la irradiancia espectral solar que arriba a la superficie terrestre para dicha λ . Valores típicos de AOT en la región visible del espectro electromagnético,

*mraponi@citedef.gob.ar

cuando el cielo se encuentra limpio y despejado, son del orden de 0,05 a 0,1. Cuando aumenta la turbidez de la atmósfera es común encontrar valores de AOT del orden de 0,3 o mayores. Para entender el concepto de espesor óptico vamos a expresarlo en términos de transmitancia porcentual (ver ec.1):

$$\tau(\lambda) = 100 \cdot e^{-\alpha(\lambda)} \quad (1)$$

En la ecuación 1, α es el espesor óptico a una determinada λ y τ es la transmitancia porcentual. Este cálculo proporciona el porcentaje de irradiancia espectral solar, a una determinada longitud de onda, que puede ser transmitida a través de la atmósfera si el Sol está directamente en el cenit (nótese que en latitudes como Buenos Aires, el Sol nunca alcanza la vertical del lugar). Para un espesor óptico de 0,1 el porcentaje de transmisión es del 90% aproximadamente. En la Tabla 1 se pueden observar los valores de transmitancia para diferentes valores de espesor óptico.

TABLA 1: VALORES DE TRANSMITANCIA ATMOSFÉRICA EN FUNCIÓN DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOLES.

AOT	τ [%]	AOT	τ [%]
0,10	90,5	1,25	28,7
0,20	81,9	1,50	22,3
0,30	74,1	2,00	13,5
0,40	67,0	2,50	8,2
0,50	60,7	3,00	5,0
0,60	54,9	3,50	3,0
0,75	47,2	4,00	1,8
1,00	36,8	5,00	0,7

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Un fotómetro solar convencional es un instrumento que sensa radiación electromagnética proveniente del Sol, en el rango UV-VIS-NIR, a través de diferentes canales. El principal tipo de medición que realiza un fotómetro es de radiación directa (apuntando al Sol), la cual ingresa por un tubo colimador que posee el cabezal del dispositivo, atraviesa los filtros de cada canal y llega al elemento sensor (uno o varios, generalmente fotodiodos). El tubo colimador impide que radiación dispersada proveniente de otras partes del cielo llegue al detector, limitando así su campo de visión (FOV, Field Of View) a un ángulo sólido de 2°, generalmente.

El fotómetro solar presentado en este trabajo fue construido con tecnología LED (funcionando en modo inverso, es decir, al incidir un haz de luz sobre el sensor, se produce una pequeña corriente eléctrica proporcional a los fotones recibidos). El resto de los componentes

electrónicos amplifican dicha corriente y la convierten a tensión.

Generalmente, los LEDs son empleados como emisor de luz y consisten en una juntura P-N polarizada en modo directo, con una gran tasa de recombinación radiativa derivada de inyectar portadores minoritarios⁽¹⁾. Para cada tipo de LED, la banda de emisión espectral depende de la composición del material utilizado^{(2),(3)}. La densidad espectral de la luz emitida por un LED alcanza un valor máximo a una frecuencia determinada por⁽⁴⁾:

$$h\nu_p = E_g + kT / 2 \quad (2)$$

y el ancho correspondiente a la longitud de onda de propagación es:

$$\Delta\lambda = 1,45\lambda_p^2 kT \quad (3)$$

donde kT se expresa en eV y λ en μm . En el marco de nuestro trabajo, el LED se utiliza como un fotodiodo que genera una corriente inversa, proporcional a los fotones de luz incidente.

La fotometría solar es una de las técnicas más utilizadas para medir espesor óptico de aerosoles. Los fotómetros solares, en general, constan de un filtro de interferencia y un fotodetector, midiendo la intensidad de la radiación en la banda de longitud de onda del filtro de interferencia. En nuestro instrumento, un único LED RGB reemplaza tanto el filtro de interferencia como el detector y funciona espectralmente como un fotodetector selectivo, multicanal. Es necesario, por lo tanto, conocer la respuesta espectral del LED para calcular el espesor óptico de aerosoles. Se observó en las experiencias de caracterización realizadas con diferentes tipos de LEDs, que la banda espectral de detección se encuentra corrida hacia λ menores respecto a la banda espectral de emisión.

El concepto del fotómetro solar basado en LED fue iniciado por Volz⁽⁵⁾ y Shaw⁽⁶⁾. La gran ventaja de este tipo de instrumentos es su bajo costo y portabilidad. August Beer fue un Físico alemán del siglo XIX que trabajó en el campo de la óptica y desarrolló el principio conocido como Ley de Beer, que explica cómo la intensidad de un rayo de luz se reduce cuando pasa a través de diferentes medios. Otros físicos del mismo siglo estudiaron esta ley y la aplicaron a la transmisión de la luz solar a través de la atmósfera.

La ecuación en la que se basa el funcionamiento de un fotómetro solar se conoce con el nombre de ley de Beer-Lambert-Bouguer (BLB), la cual determina que:

$$V_0 = V \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 e^{\left\{ -m \left[AOT + \rho_R \left(\frac{p}{p_0} \right) \right] \right\}} \quad (4)$$

donde $\frac{r}{r_0}$ es la distancia entre la Tierra y el Sol en unidades astronómicas (UA), m la masa relativa de aire,

AOT el espesor óptico de aerosoles, σ_R el espesor óptico debido a la dispersión de Rayleigh (scattering de moléculas) y $\frac{p}{p_0}$ la relación entre la presión atmosférica actual y la presión atmosférica estándar (1013,25 mbar). A partir de la ecuación 4, aplicando el logaritmo se puede arribar a la siguiente ecuación:

$$AOT = \frac{\ln\left(\frac{V_0}{R^2}\right) - \ln(V - V_{dark}) - \sigma_R \left(\frac{p}{p_0}\right) m}{m} \quad (5)$$

donde V_0 es la constante de calibración del fotómetro solar (cada canal tiene su propia constante), R^2 la distancia entre la Tierra y el Sol en UA (varía en el transcurso de un año porque la órbita de la Tierra no es circular), y V y V_{dark} son la tensión medida (en cada canal) cuando el instrumento apunta al Sol y cuando se impide la entrada de luz (corriente oscura o dark) respectivamente. La masa relativa de aire (m) es una medida de la cantidad de atmósfera que atraviesa un rayo de luz. En cualquier lugar o altitud, la masa de aire relativa es 1 cuando el Sol se encuentra en el cenit al mediodía solar. La masa relativa del aire se puede calcular usando:

$$m = \frac{1}{\sin(\beta)} = \frac{1}{\sin(\theta)} \quad (6)$$

siendo β el ángulo de elevación (ángulo que forma el Sol con el horizonte) y θ el ángulo cenital (ángulo entre el Sol y el cenit). Para ángulos cenitales grandes (equivalente a ángulos de elevación pequeños), la masa de aire no puede calcularse usando la ecuación 6, ya que debe tenerse en cuenta la refracción de la atmósfera y la esfericidad de la Tierra^{(7),(8)} debiendo calcularse con esta otra ecuación:

$$m = \frac{1,002432 \cos^2 \theta + 0,148386 \cos \theta + 0,0096467}{\cos^3 \theta + 0,149864 \cos^2 \theta + 0,0102963 \cos \theta + 0,000303978} \quad (7)$$

III. RESULTADOS

Calibración del fotómetro solar

Un fotómetro solar se considera calibrado si se conoce su constante extraterrestre, es decir, la tensión que se mediría con el fotómetro solar si no hubiera atmósfera entre el fotómetro y el Sol. Si fuera posible colocarlo por encima de la atmósfera terrestre y apuntar al Sol, la tensión que se mediría sería la constante extraterrestre del instrumento. El cálculo del AOT a partir de la ley de Beer-Bouguer-Lambert no requiere una calibración absoluta en unidades físicas, sólo la determinación de una constante para cada canal.

El método de calibración empleado en este trabajo es el método de Langley. Dicho método se basa en la Ley de BLB (que es monocromática, es decir, para una λ específica) y establece que si se grafica el logaritmo

natural del nivel de tensión generado por el haz de luz incidente en el LED en función de la masa de aire relativa (considerando que el espesor óptico total de la atmósfera no varía significativamente durante el tiempo que duren las mediciones, es decir, un día limpio y claro) y se realiza un ajuste lineal (por mínimos cuadrados) de los datos, se obtendrá una recta cuya pendiente corresponde al espesor óptico total, y su ordenada al origen, a la constante de calibración de un canal específico⁽⁹⁾. Este método se aplicó a los datos medidos en el intervalo 9:30 a 16:00 hs, tomados cada 30 min. Para asegurar una precisión del orden del 1% en la calibración, es necesario efectuar un cierto número de mediciones (en diferentes días de cielo claro y muy limpios) y efectuar un promedio. Esto es conveniente para no agregar al error en la medición del AOT, un error apreciable debido a la calibración.

Componentes del sistema

El sistema consta de un tubo colimador para garantizar un campo de visión de 2°, en el cual se coloca un difusor para homogeneizar la luz que ingresa al colimador y una lente para enfocar el haz de luz sobre la juntura del LED, y un sensor de temperatura para corregir la señal de salida en función de la temperatura (Fig. 1). El sistema de posicionamiento espacial del tubo colimador (para medir radiación directa) es un mecanismo que emplea dos motores paso a paso (Sanyo Denki 103H7126-0140) de resolución 1,8°/paso, una crapodina, dos interruptores mecánicos para limitar el movimiento en acimut y elevación, y un soporte (trípode).

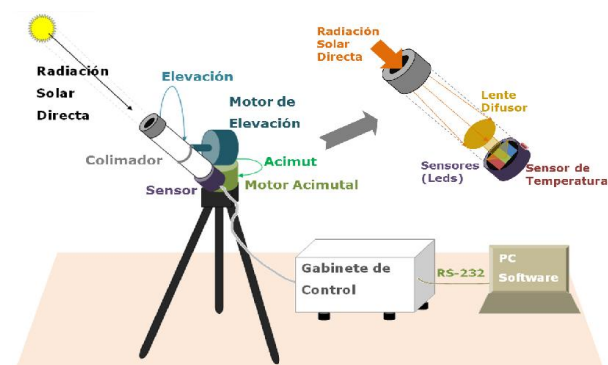


Figura 1. Esquema de los componentes del fotómetro solar basado en tecnología LED.

En un gabinete apropiado se coloca la fuente de alimentación, la electrónica de control de los motores paso a paso, los amplificadores de las señales registradas en cada canal de sensado y la electrónica necesaria para digitalizar dichas señales y comunicarlas a la notebook vía un puerto serie (Fig. 2). Mediante un software especialmente elaborado, se determina el movimiento de cada motor para efectuar el seguimiento solar, y se procesan las señales provenientes del módulo de control.

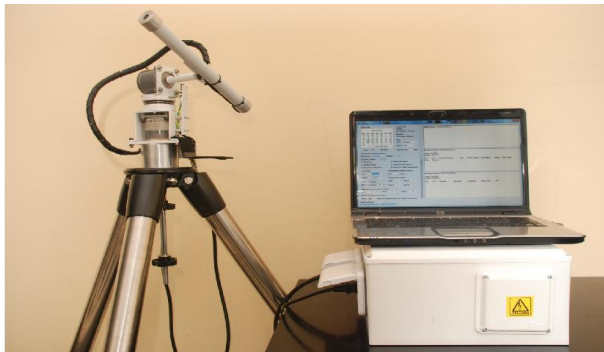


Figura 2. Imagen de los componentes del sistema de sensado remoto.

Funcionamiento del Sistema

El colimador permite que al sensor solamente llegue radiación solar directa, evitando la radiación solar difusa. La interfaz de control calcula la posición exacta del sol y determina los pasos que cada motor debe realizar, de manera tal que el colimador quede apuntando al Sol. Para asegurar un mejor ajuste, el sistema mide la radiación recibida por el sensor en diferentes puntos alrededor del punto calculado. Luego se posiciona dónde midió la radiación más alta, dado que la radiación difusa no debería ser nunca mayor que la radiación directa.

El fotómetro solar desarrollado utiliza como sensor un LED RGB (tres LED, rojo, verde y azul, en una misma pastilla). Cada canal producirá una corriente proporcional a los fotones recibidos dentro de una banda de λ diferente. Cuando se mide la tensión de oscuridad (fotómetro solar con su cabezal tapado) generalmente el valor de tensión es inferior a 10 mV. Apuntando hacia el Sol la tensión se incrementa hasta un valor de 1 a 4 V. Estos valores de tensión se verán afectados (disminuidos) por la presencia de aerosoles en el interior de la masa de aire que ve el instrumento, desde nuestro sensor hasta el Sol.

Calibración del sistema frente a derivas térmicas

El LED empleado es sensible a las fluctuaciones de temperatura, con lo cual es conveniente tener en cuenta que el error relativo del instrumental se incrementará con el aumento de temperatura. El sistema posee un sensor para medir la temperatura en cada instante de tiempo, en las cercanías del LED. Se realizaron experiencias de laboratorio para cuantificar la sensibilidad del instrumento frente a la variación de temperatura en un rango de 0°C a 50°C. Se hizo incidir sobre el sensor una determinada cantidad de radiación mientras se calentaba el sensor con una turbina de aire caliente y posteriormente se enfriaba el sistema mediante celdas Peltier, observando la variación de la tensión en función de la temperatura. También se analizó como varía la corriente oscura (tapando la entrada del colimador) en función de la variación de temperatura. La Fig. 3 muestra la dependencia de la señal de salida expresada en mV en función de la temperatura en °C.

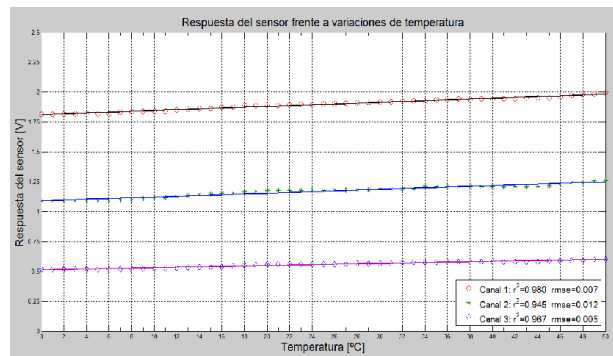


Figura 3. Test de sensibilidad del fotómetro solar en función de la variación de temperatura.

El setup empleado se puede observar en la Fig. 4, donde se muestra el sensor sobre las celdas Peltier (dos celdas en configuración paralelo), el circuito amplificador de la señal generada por el LED, el sistema de control y de medición de la temperatura junto al voltímetro con el que se midieron las tensiones de salida.



Figura 4. Setup de medición de la sensibilidad del instrumento a las variaciones térmicas.

Respuesta espectral de los LEDs funcionando como sensor y emisor

Para determinar la respuesta espectral de los LED, actuando como sensores, se colocó una fuente de luz a la entrada de un monocromador, y se realizó un barrido espectral desplazando manualmente (con una manivela) la red de difracción propia del equipo. A la salida del monocromador se ubicaron los LEDs (a modo de transductor) conectados a un circuito acondicionador y a un dispositivo datalogger, para el almacenamiento de los datos y su posterior procesamiento y análisis utilizando Matlab (Fig. 5).

Una vez registrados los valores, se obtienen las curvas de tensión en función de la longitud de onda (respuesta espectral como sensor). Esta experiencia se repitió para distintos tipos de encapsulados, diferentes λ y potencias en las que se comercializan los LEDs en el mercado local.

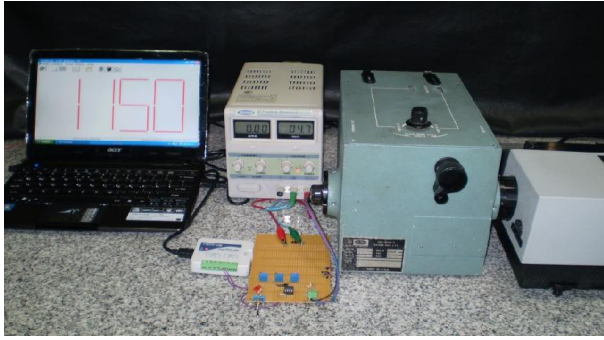


Figura 5. Setup de medición de la respuesta espectral del LED RGB como sensor.

Con el objetivo de cuantificar el desplazamiento y ensanchamiento del espectro de recepción frente al de emisión, se utilizó un mini-espectrómetro (HR4000, Ocean Optics) al cual se le hace incidir la emisión de los LEDs para obtener los espectros de emisión de los mismos. El ancho de banda de emisión de cada canal del LED RGB se puede calcular determinando el ancho a la mitad de la altura de cada perfil medido (FWHM, Full Width at Half Maximum) (Fig. 6).

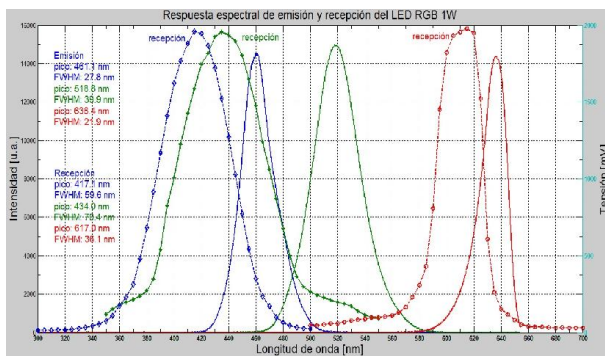


Figura 6. Curvas de emisión y recepción de cada uno de los canales de medición del LED RGB 1W.

En la Fig. 6 se presenta los espectros de emisión y de recepción de los tres canales de medición del LED RGB de 1W empleado en el sistema. Se puede apreciar que el ancho de banda de recepción es mayor que el de emisión, y además, se encuentran desplazados hacia λ inferiores.

Sensibilidad de los LEDs frente a variaciones de transmitancia

Se utilizó una lámpara calibrada y una rueda de filtros en la cual se colocaron 8 filtros neutros de diferente densidad, para simular variaciones de transmitancia debidas a presencia de aerosoles. La luz emitida por la lámpara se hace ingresar a la rueda de filtros, atraviesa el filtro seleccionado atenuándose según la densidad de cada filtro (simulando diferentes concentraciones de aerosoles). Finalmente se registra la tensión generada en el sensor por el haz de luz atenuado. Del análisis de los valores medidos se obtiene la sensibilidad y el rango de operación del circuito sensor para cada canal.

IV. CONCLUSIONES

Se logró poner en funcionamiento un prototipo de fotómetro solar basado en tecnología LED, para esto se determinó la respuesta espectral de diferentes LEDs verificando experimentalmente el desplazamiento de la longitud de onda central de recepción respecto al de emisión y el ensanchamiento del ancho de banda. Se optó por usar un LED RGB de 1W de potencia como sensor del sistema. Se determinó la sensibilidad de los tres canales de dicho sensor, frente a variaciones de transmitancia (simulando distintos espesores ópticos empleando filtros neutros) y de temperatura (de 0° a 50°C). El sistema desarrollado cuenta, como se mostró en las diferentes secciones, con un sistema óptico-mecánico para las mediciones de radiación solar en el rango visible, y una interfaz visual que calcula la trayectoria del Sol, realiza el ajuste fino del posicionamiento con un error menor a 0,5°, mide la temperatura del sensor y controla todo el sistema.

V. REFERENCIAS

- Brooks, D.R. and F.M. Mims. J. Geophys. Res., 106 (D5), 4733–40 (2001).
- Mims, F.M. Optics & Photonics News, 10, 32-38 (2009).
- Miyazaki, E., S. Itami and T. Araki. Rev. Sci. Instrum., 69 (11), 3751–4 (1998).
- Saleh, B. and M. Teich. in “Fundamentals of Photonics”, New York: Wiley series (1991).
- Volz, F.E. Appl. Opt., 13, 1732-3 (1974).
- Shaw, G.E., J.A. Reagen and B.M. Herman. J. Appl. Meteorol., 12, 374–80 (1973).
- Young, A.T. Appl. Opt., 33, 1108-10 (1994).
- Karsten, F. and T. Young. Applied Optics, 28, 4735-4738 (1989).
- Toledano, C. Opt. Pura Apl., 39 (4), 303-311 (2006).