

DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA DETERMINAR AGUA PRECIPITABLE EN BASE A MEDICIONES CON UN RADIÓMETRO SOLAR

Elian A. Wolfram y Jorge O. Tocho

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata y
Centro de Investigaciones Ópticas (CIC – CONICET), CC 124, 1900 La Plata, Argentina
FAX (54–221) 471 2771, correo electrónico: jorget@ciop.unlp.edu.ar

Carmen Esteban y Amílcar Fasulo,

Departamento de Física, Universidad Nacional de San Luis, Chacabuco y Pedernera, 5700 San Luis,
FAX (54 2652) 430224, correo electrónico: solar@unsl.edu.ar

RESUMEN

Se ha desarrollado un algoritmo computacional que permite determinar el contenido total de vapor de agua atmosférico o agua precipitable, en base a la medición de la transmitancia atmosférica solar en 940 nm. Se emplea un modelo de capas y la transmisión se calcula adicionando la contribución de todas las líneas espectrales comprendidas en el ancho de banda del medidor con el ensanchamiento correspondiente a cada presión y temperatura de cada capa. Se analizan datos obtenidos con un radiómetro espectral de seis canales y con un fotómetro solar Microtops II. Los resultados del algoritmo han sido contrastados satisfactoriamente con datos obtenidos con globos sonda en Ezeiza.

INTRODUCCIÓN

Una de las formas usuales de cuantificar el vapor de agua en la atmósfera es definiendo el *agua precipitable (AP)*, como la altura que alcanzaría el agua líquida de una columna de sección unitaria si todo el vapor de agua que hay en la misma (entre la superficie y el tope de la atmósfera) se condensara. El contenido de *AP* es muy dependiente de la latitud y de la estación. Es más, su valor puede cambiar rápidamente durante el transcurso de un mismo día. El valor medio anual en el país de *AP* es aproximadamente 2 cm, con valores extremos de 0.5 y 6 cm. La distribución en altura también es cambiante, pero normalmente la mitad del agua precipitable esta concentrada en los primeros 2 km sobre el nivel del mar; mas allá de los 12 km, la cantidad de agua es despreciable. Debido a la importancia del vapor de agua, la especificación del contenido de *AP* en la atmósfera es considerado crítico en cualquier descripción completa del estado de la misma.

De las diversas formas de medir *AP*, una de las más convencionales, y en realidad la única que describe un perfil verdadero de la distribución del vapor de agua en la atmósfera, es el radiosondeo; su costo elevado hace que sólo se realicen en los aeropuertos importantes y no más de 2 veces por día. Otra forma de estimar el agua precipitable es relacionándola con la temperatura del punto de rocío en la superficie. Con una buena correlación para escalas de tiempo grandes, este método tiene un error del 30 % en escala horaria (Smith, 1966).

La espectroscopia óptica permite un método rápido y económico para determinar *AP*. Los primeros intentos (Voltz, 1974), tropezaron con la dificultad de la elevada falta de linealidad que presenta la atenuación con la cantidad de *AP*. Para la radiación espectral integrada (todas las longitudes de onda), 0.4 cm de agua absorben un 10 % de la energía que llega a la superficie, mientras que se necesitan otros 3.6 cm de agua para absorber otro 10 % (Iqbal 1983). Esta característica y el elevado número de líneas espectrales del agua comprendidas en cualquier ancho de banda de un instrumento real, hicieron que se desarrollaran numerosos modelos empíricos o estadísticos para poder cuantificar el *AP* con técnicas ópticas. El modelo más empleado se conoce como "random model" y es utilizado por ejemplo en el medidor Microtops II, de Solar Light (Reagan, 1987).

Hoy día, el avance de las técnicas computacionales y la elevada precisión con la que se conoce el espectro del agua (Rothman, 1987), permiten afrontar el cálculo de la transmisión en forma directa: ese fue el objetivo del presente trabajo.

DESARROLLO DEL ALGORITMO

Se ha desarrollado un algoritmo para reducir los datos obtenidos con un radiómetro solar espectral en la banda de 940 nm y con un ancho de banda de 10 nm (Tocho et al., 1998). Los detalles del cálculo escapan al presente trabajo (Wolfram, 1999). La Fig. 1 muestra una de las dificultades ya mencionadas: las numerosas líneas en la banda. El efecto de la saturación de cada una de estas líneas es diferente, por lo que no se pueden simular por una sola.

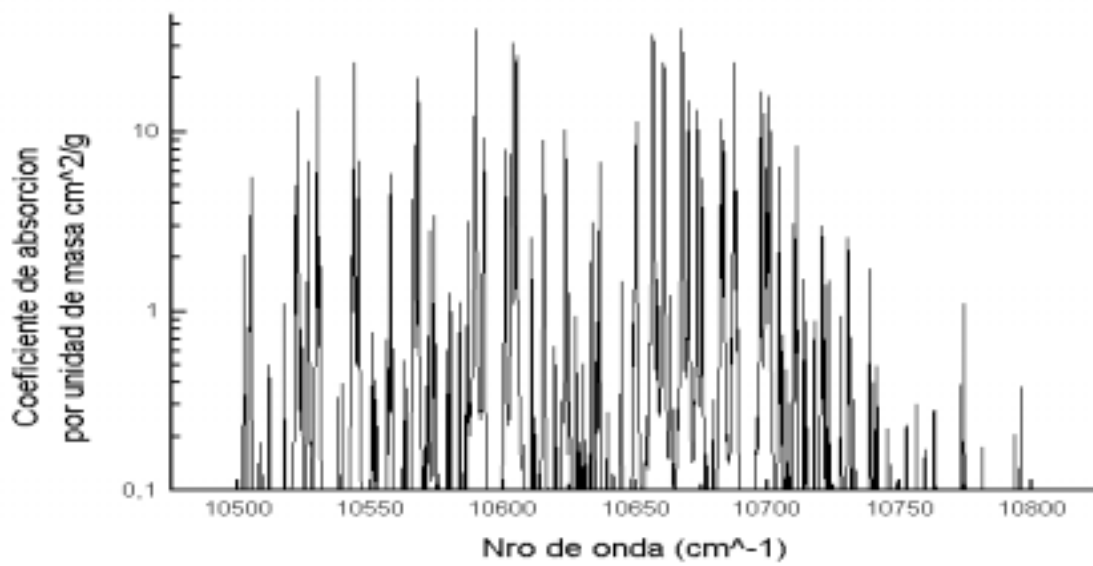


Fig. 1. Espectro de absorción del agua en la banda de 940 nm.

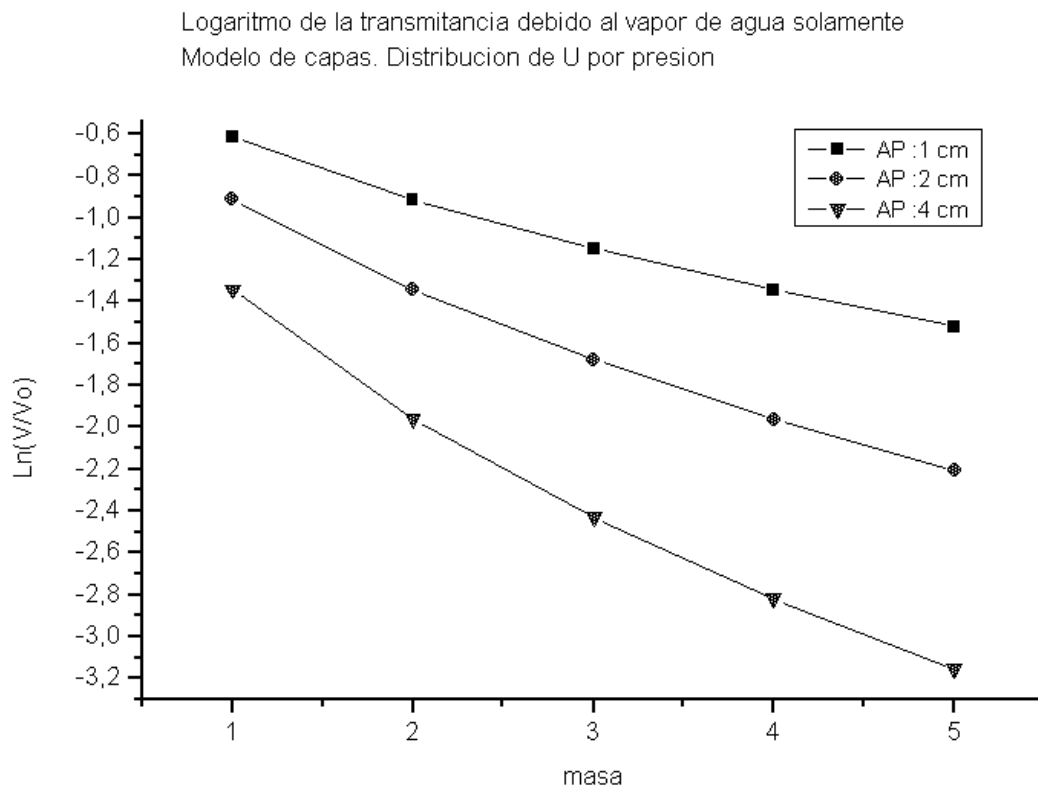


Fig. 2. Transmisión de la atmósfera en la banda de 940 nm indicada en función de la señal del radiómetro normalizada a la señal con agua nula. Se ha calculado para 1, 2 y 4 cm de agua. La masa (masa de aire) se ha tomado como la secante del ángulo zenital.

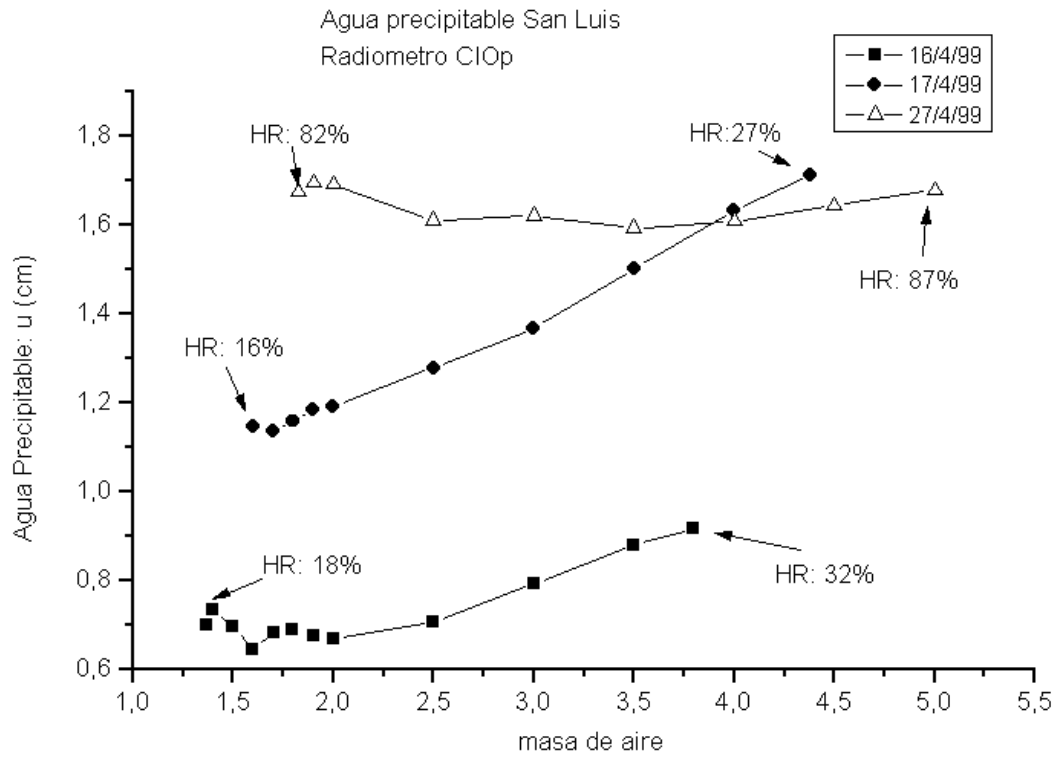


Fig. 3. Resultados de la medición de AP total (u), en San Luis, obtenida con el algoritmo desarrollado y datos del radiómetro espectral de 6 canales. Se indican los valores de humedad relativa de la superficie.

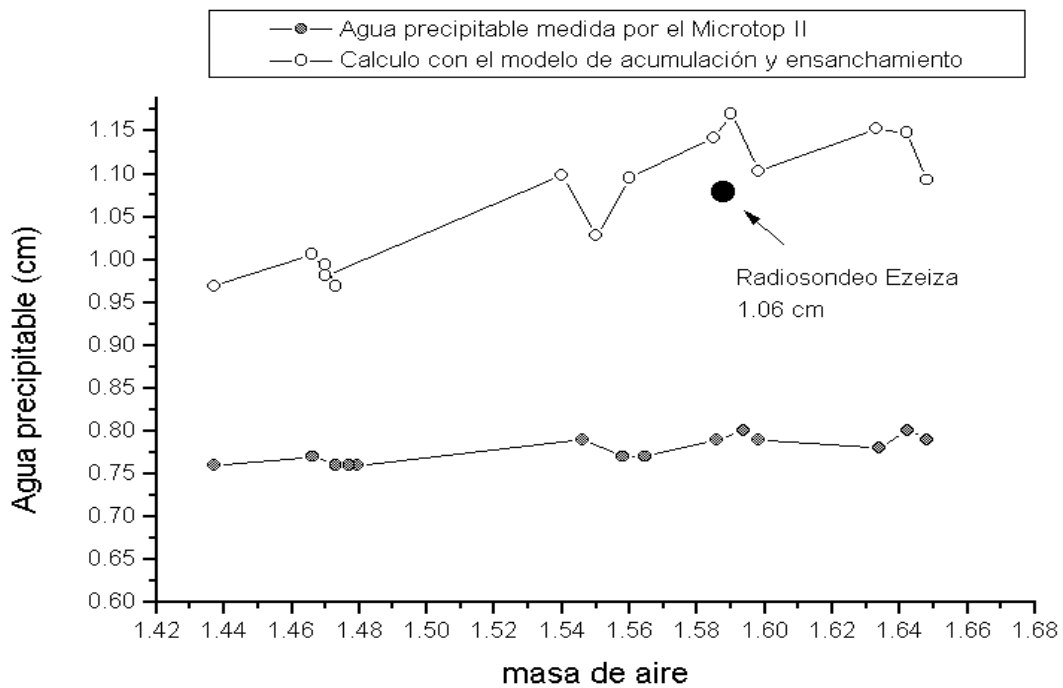


Fig. 4. Aplicación del modelo desarrollado a las mediciones obtenidas con el fotómetro solar Microtops II en Ezeiza, en momentos en que se realiza un radiosondeo. El algoritmo propio del instrumento muestra un error sistemático de aproximadamente 0.3 cm.

Otra dificultad está originada en la distribución en altura del agua y su comportamiento espectroscópico en función de la temperatura y de la presión.

En resumen el procedimiento desarrollado utiliza un modelo de capas en el que se distribuye el agua de acuerdo a un perfil estándar, calcula el ensanchamiento de cada línea espectral para la temperatura y presión de cada capa y acumula en cada longitud de onda el efecto de todas las líneas. Los espectros han sido tomados de la base HITRAN. Una integración sobre toda la banda y la adición de todas las capas permite calcular la absorción para cada valor de agua. La comparación entre este valor calculado, normalizado al valor obtenido sin agua, con la señal medida por el radiómetro, permite calcular el valor de AP presente.

La Fig. 2 muestra los resultados del logaritmo de la transmisión obtenidos para distintos valores de agua y ángulos de observación. La masa de aire es igual a la secante del ángulo zenital, mientras que V representa la señal que mediría el radiómetro debida a la atenuación del vapor de agua presente en la atmósfera en el instante de la medida. En la presente figura el valor de V fue calculado utilizando el algoritmo teórico desarrollado para tal fin.

RESULTADOS Y COMPARACIONES CON OTROS MÉTODOS.

La Fig. 3 muestra algunos ejemplos de los resultados obtenidos con mediciones del radiómetro de 6 canales instalado en San Luis. Mediante las señales de los canales de 870 nm y 1060 nm se calcula la atenuación originada en los aerosoles y se suma a la señal del canal de 940 nm. El valor de la señal de este canal para agua nula se conoce por mediciones previas en alta montaña, donde el contenido de agua es mínimo. La atenuación Rayleigh puede también corregirse, pero no es significativa en estas longitudes de onda. Se indican los valores de humedad relativa registrados en la superficie. Si bien la tendencia es apropiada, es claro que los dos parámetros no están relacionados de manera simple.

En el mes de diciembre de 1998, un fotómetro solar Microtops II (Solar Light) con un canal espectral para medir agua similar al radiómetro de San Luis, se ensayó en Ezeiza. Los valores de AP brindados directamente por el instrumento y los calculados mediante el algoritmo desarrollado, se muestran en la Fig. 4. En este último caso se utilizó la indicación del canal de 1020 nm que posee el instrumento, para calcular la atenuación de los aerosoles presentes. De la comparación con el valor obtenido mediante el radiosondeo del día, surge que el procedimiento desarrollado es preciso. El error de casi 0.3 cm que acusa el Microtops II debe entonces estar originado en el algoritmo que utiliza en la reducción.

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un procedimiento para calcular los valores de agua precipitable en base a mediciones espectrales de la transmitancia atmosférica en el cercano infrarrojo. En particular se utiliza la banda de absorción del agua en 940 nm. Otros canales cercanos, 870 nm y/o 1020-1060 nm se emplean para calcular y corregir la atenuación que provocan los aerosoles.

El algoritmo emplea un cálculo completo de la absorción del vapor de agua para cada una de las 10 capas en que se divide la atmósfera, cada una con su presión y temperatura correspondientes.

La comparación de los resultados con valores de radiosondeos es satisfactoria y el procedimiento será utilizado de manera rutinaria con los datos obtenidos con el radiómetro instalado en la ciudad de San Luis.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se efectúa en el marco del proyecto "Aplicaciones de la óptica y de la optoelectrónica al control de las emisiones gaseosas industriales" PID-BID OC-AR 802, Proyecto 00059 y del Proyecto X239, "Estudios fotofísicos de materiales", financiado por la Universidad Nacional de La Plata. EAW es Becario de Entrenamiento de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires y JOT es Investigador Principal de CONICET.

REFERENCIAS

Reagan, J., Thorne, K., Herman, B., and Gall, R. (1987). Water vapor measurements in the 0.94 micron absorption band: calculation, measurements and data applications. *Proceeding, International Geosciences and Remote Sensing Symposium*, Ann Harbor.

Rothman, R. (1987). The HITRAN database: 1986 edition. *Applied Optics* **26**, 2365-2374.

Smith, W. (1966). Note on the relationship between total precipitable water and surface dew point. *J. App. Meteor.* **15**, 726-727.

Tocho, J. O., Esteban, C., Fasulo, A., Rodriguez, E. and Wolfram, E. (1998) Sun-photometer for aerosol and precipitable water measurements used in Argentina. *Proceedings SPIE* **3493**, 123-132.

Voltz, F. (1974). Economical multispectral sun photometer for measurement of aerosol extinction from 0.44 microns to 1.6 microns and precipitable water. *Applied Optics* **13**, 1732-1733.

Wolfram, E. A. (1999). Mediciones espectroscópicas del agua en la atmósfera. Trabajo de Diploma, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata.