

## BREVE ANALISIS DE METODOS PARA LA MEDIDA DEL AGUA PRECIPITABLE

*Por Revuelta, A.; Rodríguez, C.; Mateos, J., y Garmendia, J.  
Departamento de Física del Aire. Facultad de Ciencias.  
Universidad de Salamanca.*

### Introducción

La investigación sobre el contenido de agua atmosférica reviste un creciente interés, al tratarse del único componente que se encuentra en la atmósfera en los tres estados, participando de una manera directa y mayoritaria en los procesos de atenuación de la radiación y su evolución a lo largo del año resulta ser de especial importancia en el desarrollo de la vida de nuestro planeta.

Por otra parte, la determinación de la cantidad de vapor de agua resulta trascendental en los estudios de predicción cuantitativa de la precipitación y contaminación atmosférica a fin de establecer la composición real de la atmósfera en un lugar determinado. Su cálculo ha sido y sigue siendo motivo de constante preocupación por parte de organismos e investigadores, lo que justifica la existencia de un buen número de métodos diferentes.

En este trabajo se presenta una revisión de los procedimientos que en la actualidad disponemos para la estima del agua precipitable, aportándose un nuevo método que en un principio se ha aplicado para días despejados con resultados muy satisfactorios.

### 1. Clasificación de los métodos para la estima del agua precipitable

Una estima, que creemos la más representativa, del vapor de agua en la atmósfera, se concreta en la medida del agua precipitable; es decir, la masa de agua líquida correspondiente a la condensación

de todo el vapor de agua contenido en una columna vertical atmosférica de sección unidad.

Se han venido proponiendo diferentes métodos que se decantan por razón de las variables utilizadas, o bien por la técnica empleada para su determinación.

Los numerosos planteamientos y opciones recogidas de la bibliografía los hemos agrupado en los siguientes:

- Métodos aerológicos.
- Métodos actinométricos.
- Métodos basados en las medidas de humedad en superficie.

Seguidamente pasamos a describir brevemente cada uno de ellos.

#### 1.1. Métodos aerológicos

Encuadramos en este apartado aquellos métodos que utilizan equipos localizados en la atmósfera y que a lo largo de sus desplazamientos van registrando, cuantitativamente, las variables meteorológicas que nos permiten calcular el contenido de vapor de agua atmosférico. Un aparato ya clásico (el más extendido) para la medida del agua precipitable es el "Radiosonda" que incorpora sensores para la determinación de la temperatura, humedad y presión. El material de que están contruidos los sensores de humedad podría ser: cloru-

ro de litio, óxido de aluminio, fluoruro de bario, nylon, etc., si bien parece que en la actualidad se extiende el uso de los higrístores.

El contenido de agua precipitable se obtiene aplicando la expresión:

$$W = \frac{1}{g} \Sigma \bar{q} \Delta p$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $\text{cm} \times \text{s}^{-2}$ ),  $\Delta p$  la variación de presión entre los límites superior e inferior del estrato atmosférico (hPa) y  $\bar{q}$  la humedad específica media de la capa (gramos de vapor de agua por kilogramo de aire húmedo); el agua precipitable  $W$  vendrá dada en centímetros. El sumatorio suele extenderse desde el suelo hasta el nivel de presión de 500 o 400 hPa.

La norma general es la realización de un sondeo matinal y otro nocturno.

Actualmente se llevan a cabo medidas de vapor de agua atmosférico mediante sondeos aerológicos motorizados (Martin, D.), que consisten en un pequeño avión teledirigido capaz de efectuar un análisis tridimensional del área de estudio. Ello lo convierte en un método más versátil que los radiosondas, si bien su cobertura vertical (unos 4.000 m) es sensiblemente inferior a la de aquellos. El avión incorpora un equipo similar al que portan los globos radiosonda.

Por último se realizan también sondeos aerológicos instalando sensores en aviones convencionales.

## 1.2. Métodos actinométricos

El estudio de los procesos de atenuación, en especial de absorción, de la radiación solar en la atmósfera ha proporcionado otro método para la evaluación del vapor de agua. Este vapor presenta fenómenos de absorción en unas zonas espectrales muy concretas que se extienden a modo de bandas en el infrarrojo próximo y lejano fundamentalmente con apenas interferencias de otros componentes atenuantes.

Del primero que tenemos referencia bibliográfica que ha utilizado la técnica espectroscópica para la medida del agua precipitable es Fowle, F. (1912), que obtiene unas curvas de calibración para las bandas de absorción de vapor de agua:  $\emptyset$  ( $1.030 < \lambda < 1.230 \text{ nm}$ ), ( $860 < \lambda < 990$ ) y ( $1.240 < \lambda < 1.530 \text{ nm}$ ), entre la radiación absorbida y diferentes espesores de agua precipitable. Desde entonces hasta nuestros días han sido muchos los estudios dedicados a este problema, entre los que merece destacar los realizados por Yamamoto, G.; Mugge, R.; Moller, F.; McDonald, J., y Puigcerver, M., entre otros.

La técnica espectroscópica es el método disponible más rápido para cuantificar de forma continua el contenido total del vapor de agua en la atmósfera.

McDonald, J. (1960), propone una relación de tipo potencial  $a(u) = 0,77 u^{0,30}$ , siendo  $a(u)$  la fracción de la constante solar absorbida y  $u$  el espesor de agua precipitable.

En 1974, Volz, F., utilizando un heliofotómetro multispectral (sunfotómetro) mide las transmissividades a dos longitudes de onda 935 y 880 nm, que le permiten calcular el agua precipitable por la expresión:

$$W = \frac{K}{m} (\text{Ln } q_2/q_1)^2$$

donde  $m$  es la masa de aire relativa y  $K$  una constante que se obtiene por comparación con los datos obtenidos por radiosondeo.

Actualmente se utiliza la radiometría de microondas con frecuencias del orden de GHz para la medida del vapor de agua (Guiraud, F. O., 1979) y para la determinación del agua líquida de las nubes (Snider, J. B., 1980).

## 1.3. Métodos basados en medidas de humedad en superficie

Utilizan variables meteorológicas sencillas (presión de vapor de agua, temperatura del punto de rocío, humedad absoluta, proporción de mezcla, etc.), o en su caso, recurriendo a datos

climatológicos de carácter general confeccionados en sus territorios y distribuidos por latitudes por los Estados Unidos y la Unión Soviética.

De todas las ecuaciones encontradas en la bibliografía presentamos aquellas que aparecen con mayor profusión:

Hann, J.  $W = Ae$

Reitan, C.  $\ln W = at_d + b$

Smith, W.  $\ln W = a - \ln(\lambda + 1) + bt_d$

Labajo, J.

$$W = \frac{622 \times 6,108}{g(\lambda + 1)} \cdot 10^{\frac{7,5t_d + 1,055}{t_d + 237,28}}$$

siendo e (tensión de vapor, mb),  $t_d$  (temperatura de rocío, °C), g (aceleración de la gravedad en cm/s<sup>2</sup>),  $\lambda$  (parámetro que depende de la distribución vertical de la humedad, función además de la latitud del lugar y época del año), y W (el agua precipitable expresada en cm de agua líquida).

Hemos calculado para Salamanca un valor promedio anual de la constante A de 0,151 y el parámetro  $\lambda$ , 3,543.

Los coeficientes de correlación obtenidos con estas ecuaciones arrojan valores especialmente bajos (incluso negativos) en los meses más cálidos del año, y los resultados van a depender en gran medida, entre otros factores, del estado de la atmósfera y sobre todo de la existencia o no de mecanismos de convección vertical.

A continuación en la tabla 1 aparecen los coeficientes de correlación para un período de trabajo de 131 días despejados, distribuidos a lo largo del año durante el trienio 1979-1981.

**TABLA 1**

Ecuación	Período frío	Período cálido	Período total
Hann, J.	0,69	0,60	0,76
Reitan, C.	0,68	0,71	0,78
Smith, W.	0,66	0,64	0,77
Labajo, J.	0,66	0,62	0,76

Período frío: enero, febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre.  
Período cálido: abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre.

## 2. Nuevo método para la estima del agua precipitable

La escasez de estaciones meteorológicas que realicen radiosondeos, la alta tecnología necesaria para el tratamiento y resolución de las imágenes de los satélites y para las medidas realizadas por radiómetros que trabajan con frecuencias elevadas, y por último, los resultados alcanzados con las ecuaciones del método basado en medidas de humedad en superficie, justifican la necesidad de encontrar nuevos procedimientos que resulten sencillos, de poco coste económico y que consigan resultados satisfactorios.

Con el método que a continuación describiremos se mejoran los resultados obtenidos por las ecuaciones de la tabla 1.

Es preciso disponer de un piranómetro (en nuestro caso contamos con un piranómetro termoelectrónico Eppley) equipado con un filtro (Schott RG-8) transparente a la radiación solar global en el intervalo 710-2.800 nm, que le corresponde un 50,4 % de la energía solar total y al 99,5 % de la radiación solar infrarroja, para obtener las medidas de la radiación solar global infrarroja. También necesitamos medidas diarias de presión de vapor de agua.

El agua precipitable es una variable que depende del contenido y de la distribución del vapor de agua presente en la atmósfera. Esta distribución no es uniforme, presentándose la mayor concentración en las capas bajas, variando con la hora del día y de unos meses a otros.

La sola utilización de variables medidas en superficie, entendamos que no sería suficiente para estimar el agua precipitable, que cuantitativamente se extiende y de forma irregular en una columna atmosférica de varios kilómetros de altura, ya que las medidas realizadas en una estación meteorológica se ven forzosamente afectadas por condiciones que en poco o nada afectan al contenido real de vapor de agua, como son los abrigos, tipos de suelos, obstáculos, etc, de manera que las variaciones en el agua precipitable no se verán pun-

tualmente reflejadas por las correspondientes variaciones de esos registros de superficie.

A la vista de estas consideraciones parece razonable relacionar el agua precipitable con una variable que se vea afectada por la presencia de vapor de agua atmosférico a lo largo del perfil en que se distribuye aquella.

Estudiando los procesos de atenuación que tienen lugar en esa zona del efecto solar, se observa que de todos los componentes atmosféricos (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, aerosoles, etc) le correspondería al vapor de agua el papel fundamental a la hora de justificar la absorción de la radiación solar en el espectro infrarrojo analizado.

Ahora bien, teniendo en cuenta que el vapor de agua no se reparte uniformemente, sino que tomando un perfil vertical desde el suelo hasta el límite atmosférico, la distribución es más homogénea y sustancialmente representativa en las capas más próximas a la superficie, por lo que, en las capas cercanas al suelo, debido a una mayor concentración del vapor de agua, los procesos que tienen lugar para la componente infrarroja de la radiación solar no se caracterizarían por un proceso de atenuación elemental, al existir una parte de su vapor de agua en fase condensada y formando parte de agregados moleculares de carácter higroscópico cuya actividad atenuadora se centraría fundamentalmente en la zona del espectro visible.

En base a estas ideas, el agua precipitable se puede obtener mediante una ecuación que integre tanto el contenido en vapor de agua en las capas superiores y el existente a nivel del suelo. La ecuación que se propone es:

$$W = a \text{ CGS} + be + c$$

donde CGS es un índice estimativo del vapor de agua presente en la atmósfera y e la tensión de vapor de agua (promedio de las observaciones a las 7, 13 y 18 horas Z).

El valor de CGS se determina por la expresión:

$$\text{CGS} = \frac{G_{\text{OR}} - G_{\text{R}}}{S}$$

G<sub>OR</sub> componente infrarrojo de la radiación solar global en el límite de la atmósfera.

G<sub>R</sub> componente infrarrojo de la radiación solar global media en la estación actinométrica.

S insolación real diaria.

El agua precipitable W viene expresada en cm de agua líquida, y nos estima la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera, diariamente, para un día despejado.

Los resultados obtenidos son suficientemente alentadores, como a continuación veremos (tabla 2), si los comparamos con los alcanzados con otros que emplean solamente variables medidas en superficie (temperatura de rocío, tensión de vapor de agua, etc).

**TABLA 2**

Ecuación propuesta	Agua precipitable		
	Período frío	Período cálido	Período anual
W = a CGS + be + c	0,84	0,74	0,84

Los números corresponden a los coeficientes de correlación.

Estos valores son sustancialmente mejores que los que figuran en la tabla 1. Los datos de agua precipitable de los diferentes períodos estudiados son los correspondientes al radiosondeo del Observatorio de Barajas (Madrid) que entendemos con más representatividad para el área de Salamanca.

### Conclusiones

La estima del vapor de agua atmosférico se puede realizar por diferentes métodos, siendo los actinométricos los que en principio presentan una mayor fiabilidad, pero resultan inaccesibles para la mayoría de los observatorios meteorológicos. Por lo que los métodos basados en la utilización de ecuaciones empíricas que incluyan variables cuya medida puede resultar rutinaria, son los que en la actividad tienen una mayor aplicación.

El método que nosotros proponemos, tanto por el coste instrumental y mantenimiento como por el rigor científico que conlleva, puede ser perfectamente asumido, para el cálculo del agua precipitable, y los resultados con él obtenidos justifican plenamente su utilización.

### Bibliografía

- FOWLE, F: "The spectroscopic determination of aqueous vapor". *J. Astrophysic*, 35, 149-162. 1912.
- GUIRAUD, F. O: "A dual-channel microwave radiometer for measurement of precipitable water vapor and liquid". *IEEE. Trans. Geosci. Electron*, GE-17, 129-136. 1979.
- LABAJO, J; GARMENDIA, J, y NAVARRETE, J: "Estudio sobre la estimación de la cantidad de agua precipitable en función del punto de rocío en superficie". *Revista de Meteorología de la Asociación Meteorológica Española*. Diciembre, 73-79. 1982.
- MARTIN, D: "Les sondes aerologiques motorises". *La Meteorologie*, VI serie, 18, 17-34. 1979.
- PUIGSERVER, M: "Sobre la absorción de la radiación solar por vapor de agua en la atmósfera". *Rev. de Geof.*, vol. XXXIII, n.ºs 3 y 4, 225-237. 1974.
- REITAN, C: "Surface dew point and water vapor aloft". *J. Appl. Meteor.* 2, 776-779. 1963.
- REVUELTA, A: "Medida de la radiación infrarroja. Su relación con el agua precipitable". Tesis doctoral. Servicio de Publicaciones. Univ. Salamanca. F-C-343. 1983.
- SMITH, W: "Note on the relationship between total precipitable water and surface dew point". *J. Appl. Meteor.*, 5, 726-727.
- SNIDER, J: "Cloud liquid measurement with a ground-based microwave instrument". *Radio Sci.*, 15, 683-693. 1980 a.
- VOLZ, F: "Economical multispectral sunphotometer for measurement of aerosols extinction from 0,44 to 1,6 m and precipitable water". *Appl. Opt.*, 13, 1732-1733. 1974.

### Reconocimientos

Los autores agradecen a don José Luis Labajo Salazar (jefe de la Oficina Meteorológica de la Base Aérea de Matacán), a don Antonio Labajo Salazar y don Manuel Gutiérrez Suárez, meteorólogos del INM las facilidades dadas para la recopilación de los datos empleados en el trabajo.