

# Observación del vapor de agua

por Ed Dlugokencky<sup>1</sup>, Sander Houweling<sup>2</sup>, Ruud Dirksen<sup>3</sup>, Marc Schröder<sup>4</sup>, Dale Hurst<sup>1,5</sup>, Piers Forster<sup>6</sup> y la Secretaría de la OMM<sup>7</sup>

Quienes cuestionan la relevancia del cambio climático a veces sostienen que la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a la atmósfera tendrá un efecto muy limitado, porque el gas de efecto invernadero más importante es el vapor de agua. Si este es el caso, ¿por qué preocuparse tanto del CO<sub>2</sub> y de otros gases de efecto invernadero? Las observaciones del programa de la Vigilancia Atmosférica Global de la OMM han ayudado a investigar esto con más detalle.

Algunos gases atmosféricos, tales como el vapor de agua y el CO<sub>2</sub>, absorben y reemiten energía infrarroja desde la atmósfera hacia la superficie terrestre. Este proceso, el efecto invernadero, hace que la temperatura media de la superficie sea 33 °C más alta de lo que sería en ausencia de dichos gases. Si no fuese por el efecto invernadero, la temperatura en promedio sería tan fría como -18 °C. Sin embargo, son los gases de efecto invernadero no condensables o de larga permanencia –principalmente CO<sub>2</sub>, pero también metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y halocarburos (CFC, HCFC, HFC)– los que ejercen de impulsores del efecto invernadero. El vapor de agua y las nubes actúan como retroalimentaciones

rápidas, lo que quiere decir que el vapor de agua responde rápidamente a los cambios en la temperatura, a través de la evaporación, la condensación y la precipitación.

Esta fuerte retroalimentación del vapor de agua significa que para un escenario en el que se considere una concentración doble de CO<sub>2</sub> respecto a las condiciones preindustriales, el vapor de agua y las nubes llevarían a un incremento global en la energía térmica que rondaría el triple del valor ocasionado por los gases de efecto invernadero de larga permanencia. Por tanto, si se toma como referencia la capacidad de retener el calor que emana de la superficie terrestre, el vapor de agua y las nubes son los mayores contribuyentes al calentamiento. La cantidad de vapor de agua en la atmósfera tiene una respuesta directa en la cantidad de CO<sub>2</sub> y de otros gases de efecto invernadero de larga permanencia, incrementándose cuando ellos lo hacen.

Es imposible controlar directamente la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, ya que el agua se encuentra en nuestro planeta por todas partes, cubriendo el 71% de la superficie terrestre. Para limitar la cantidad de vapor de agua en la atmósfera y controlar la temperatura de la Tierra, es preciso que el ser humano limite en lo posible los gases de efecto invernadero; en la práctica estos son el CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero de larga permanencia.

El programa de la Vigilancia Atmosférica Global observa el vapor de agua ya que este es un constituyente atmosférico importante por el papel que desempeña en el sistema climático, tanto como gas de potente efecto invernadero como por su carácter de fuente para la formación de nubes. El vapor de agua también es importante como compuesto químico, tanto en la troposfera como fuente del radical hidroxilo –el oxidante más importante en la troposfera–, como en la estratosfera, donde influye en la disminución del ozono, especialmente en las regiones polares.

<sup>1</sup> Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA, Estados Unidos de América)

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones Espaciales de los Países Bajos (SRON)

<sup>3</sup> Centro principal de la Red de referencia de observación en altitud (GRUAN) del Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC), Servicio Meteorológico de Alemania (DWD)

<sup>4</sup> Servicio Meteorológico de Alemania (DWD)

<sup>5</sup> Instituto Cooperativo para la Investigación en Ciencias Ambientales (CIRES), Universidad de Colorado

<sup>6</sup> Escuela de la Tierra y el Medio Ambiente, Universidad de Leeds

<sup>7</sup> Oksana Tarasova, director, y Geir Braathen, funcionario científico principal, Vigilancia de la Atmósfera Global

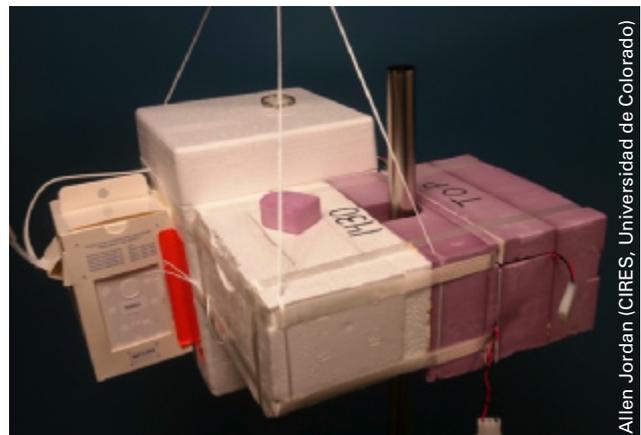
## Medición del vapor de agua

El vapor de agua atmosférico se puede medir utilizando una gran variedad de técnicas y de plataformas de observación. Estas observaciones se usan principalmente en las predicciones numéricas del tiempo, en la vigilancia e investigación del clima, y en la química atmosférica. El vapor de agua se mide *in situ* con instrumentos a bordo de globos y aviones, y por teledetección en tierra y en satélite.

Las diferentes técnicas para medir el vapor de agua incluyen el uso de:

- sensores pasivos de microondas instalados en plataformas orbitales polares;
- sensores infrarrojos, que constituyen el registro satelital más largo de los instrumentos para perfiles y sondeos de vapor de agua;
- cámaras para los canales ultravioleta/visible/infrarrojo cercano (métodos de recuperación diurna que usan dos canales y que proporcionan una resolución espacial alta (~ 1 km));
- sondeo del limbo, la técnica de sondear varias capas de la atmósfera a través de la observación a lo largo de un rayo tangente que no intersecta la superficie terrestre;
- radiosondas, instrumentos comúnmente empleados para sondeos *in situ* que proporcionan perfiles de humedad relativa de alta calidad (entre otras variables) con una resolución vertical hasta ahora inigualable de aproximadamente 5 metros: a nivel mundial, cada día se lanzan unas 1 000 radiosondas; los sensores de humedad de las radiosondas proporcionan datos de humedad de buena calidad a lo largo de prácticamente toda la troposfera, sin embargo, hay que aplicar correcciones importantes en sus mediciones de humedad en la alta troposfera y en la estratosfera;
- globos cargados con un higrómetro de punto de escarcha que utilizan un espejo enfriado, cuya temperatura se controla cuidadosamente en el punto de escarcha;
- instrumentos de tierra, que permiten tomar muestras de forma casi continua de la masa de aire situada sobre una localización fija; y
- varios vuelos comerciales de larga distancia equipados con sensores de vapor.

Las tendencias en el vapor de agua atmosférico observado están interrumpidas por la falta de homogeneidad en los datos registrados, lo que ocurre cuando los programas



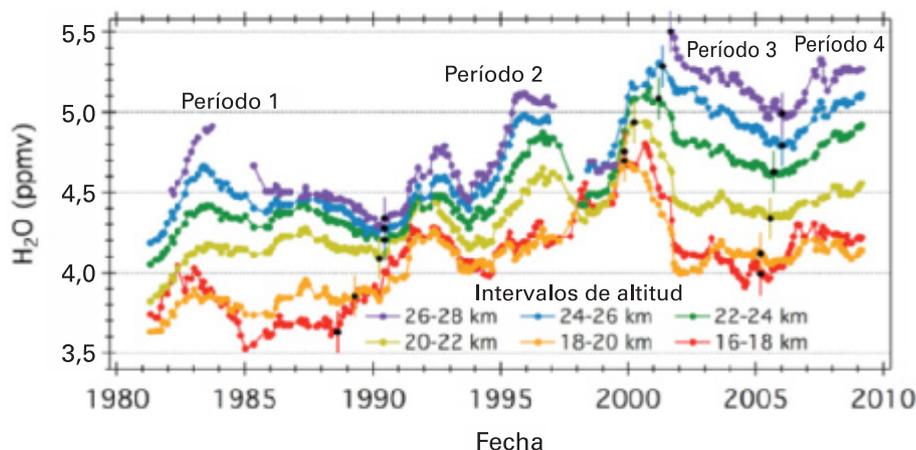
Allen Jordan (CIRES, Universidad de Colorado)

*Carga del sondeo a bordo de un globo que consta de un higrómetro de punto de escarcha de la NOAA (FPH, delante), una ozonosonda de celda de concentración electroquímica (ECC, atrás) y una radiosonda InterMet (a la izquierda). El tubo delgado de acero inoxidable de entrada de aire se extiende hacia el exterior de la parte superior del FPH. Un tubo similar se fija en la parte inferior del FPH antes de su lanzamiento.*



Allen Jordan (CIRES, Universidad de Colorado)

*Emrys Hall (CIRES, Universidad de Colorado) se prepara para lanzar un globo (que lleva un higrómetro de punto de escarcha de la NOAA, una ozonosonda ECC y una radiosonda) desde la estación Marshall en Boulder, Colorado.*



*Observando las tendencias del vapor de agua estratosférico sobre Boulder, Colorado, se aprecia un incremento neto del mismo en los últimos 30 años. Hurst y otros, 2011.*

de mediciones son discontinuos debido, por ejemplo, a la limitada vida útil de las misiones de satélite o a cambios en la instrumentación no comprensibles o insuficientemente documentados. La combinación de registros de diferentes instrumentos que no están en concordancia los unos con los otros, también supone un problema. Un ejemplo es la desviación entre los registros de los instrumentos HALOE y MLS de satélites. Sin embargo, las observaciones ponen de manifiesto un aumento constante del vapor de agua total en columna así como un incremento neto en los últimos 30 años del vapor de agua estratosférico.

## El vapor de agua en los modelos climáticos

Durante la segunda mitad del siglo XX, la cantidad de vapor de agua en la estratosfera mostró una tendencia neta a aumentar, pero desde el año 2000 ha habido períodos tanto de incremento como de disminución de su abundancia (Nedoluha y otros, 2013). En la actualidad no se dispone de un conocimiento suficientemente exhaustivo de todos los mecanismos que gobiernan los cambios que tienen lugar en el vapor de agua estratosférico. Muchos de los intercambios de gases entre la troposfera y la estratosfera ocurren a través de la tropopausa tropical. Debido a la baja temperatura en estas regiones de la atmósfera, el aire se vuelve helado y seco y muy poca agua entra en la estratosfera. De hecho, una fuente importante de vapor de agua estratosférico es la oxidación del metano transportado hacia arriba desde la troposfera. Cabe esperar que tanto el futuro calentamiento debido al cambio climático como el incremento de las concentraciones de metano lleven a un aumento del vapor de agua en la estratosfera.

El aumento del vapor de agua en la alta troposfera y baja estratosfera conlleva un enfriamiento radiativo en estos niveles e induce un calentamiento de la superficie. Análisis recientes sugieren que el calentamiento de la superficie terrestre puede ser sensible a cambios de volumen en el vapor de agua del orden de subpartes por millón (ppm) en la baja estratosfera. La investigación ha descubierto que la reducción de un 10% en el vapor de agua estratosférico entre 2000 y 2009 actuó disminuyendo el ritmo de incremento de la temperatura global de la superficie en este período en un 25% en comparación con el que hubiese ocurrido debido solamente al CO<sub>2</sub> y a otros gases de efecto invernadero<sup>8</sup>. Otros datos más limitados sugieren que el vapor de agua estratosférico probablemente aumentó entre 1980 y 2000, lo cual ha podido reforzar el ritmo decenal de calentamiento de la superficie durante la década de 1990 en torno a un 30% comparándolo con las estimaciones realizadas despreciando este cambio. Tales hallazgos muestran que el vapor de agua estratosférico es un importante impulsor del cambio climático mundial en superficie a lo largo de la década.

En ausencia de observaciones globales tridimensionales del vapor de agua, se usan frecuentemente productos de reanálisis global para validar las simulaciones de los modelos numéricos. Dos de los conjuntos de datos de reanálisis más extensamente utilizados son el Análisis retrospectivo en la era moderna para investigación y aplicación de la NASA (MERRA), con su nuevo

<sup>8</sup> Solomon, S., K. H. Rosenlof, R. Portmann, J. Daniel, S. Davis, T. Sanford y G.-K. Plattner (2010), Contributions of stratospheric water vapour to decadal changes in the rate of global warming, *Science*, 327, 1219-1223, doi:10.1126/science.1182488.

lanzamiento, el MERRA2, y el Reanálisis provisional del Centro europeo de predicción meteorológica a medio plazo (CEPMMP).

Un estudio reciente ha puesto de relieve que los datos de reanálisis del vapor de agua atmosférico de altitudes elevadas, crítico para el efecto invernadero, no son tan exactos como se pensaba inicialmente. Los datos de vapor de agua de la alta troposfera y baja estratosfera de estos conjuntos de datos de reanálisis se han comparado con datos de vapor de agua obtenidos por el instrumento de sondeo del limbo por microondas (MLS) a bordo del satélite AURA. Estos datos satelitales no se han utilizado en la producción de este reanálisis, de modo que representan un conjunto de datos independientes idóneo para la validación. El estudio concluyó que el reanálisis difería bastante de las observaciones del MLS, sobrestimando el vapor de agua medio anual global en la alta troposfera en torno a un 150%. Verticalmente, el transporte del vapor de agua a través de la tropopausa tropical (16-20 km) en el reanálisis es más rápido, en torno a un ~86%, comparado con las observaciones del MLS. En la baja estratosfera tropical (21-25 km), el transporte vertical medio según el CEPMMP es un 168% más rápido que el estimado por el MLS, mientras que MERRA y MERRA2 dan velocidades de transporte vertical dentro del 10% de los valores del MLS. Horizontalmente, a 100 hectopascales, tanto las observaciones del MLS como los reanálisis muestran un transporte hacia los polos más rápido en el hemisferio norte que en el sur. Comparado con las observaciones del MLS, el transporte horizontal del vapor de agua del MERRA y del MERRA2 es un 106% más rápido en el hemisferio norte pero en torno a un 42 a 45% más lento en el hemisferio sur. El transporte horizontal según el CEPMMP es un 16% más rápido que el señalado por las observaciones del MLS en ambos hemisferios.

Para añadir complejidad a estas discrepancias también debería mencionarse que los datos de vapor de agua del MLS muestran un sesgo seco del 10 al 20% en la alta troposfera tropical en comparación con las mediciones de los higrómetros de punto de escarcha lanzados en globos meteorológicos desde Hilo, Hawai y San José de Costa Rica (Dale Hurst, 2016). El sesgo seco del MLS puede reducir ligeramente el sesgo húmedo en los reanálisis MERRA y ERA-Interim (provisional) con respecto al MLS.

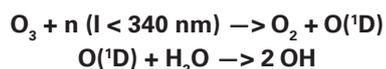
Estas grandes discrepancias entre diferentes tipos de datos observacionales, y entre las observaciones y los resultados de los reanálisis, ponen de manifiesto unas incertidumbres significativas en las mediciones así como una falta de conocimiento de los procesos de transporte

y deshidratación que tienen lugar en la región de la alta troposfera y baja estratosfera, lo que también muestra que hay una gran necesidad de realizar más y mejores observaciones del vapor de agua en estas zonas. Como se mencionó en la sección dedicada a las mediciones, los sistemas actuales de observación se ven condicionados por varias deficiencias, tales como la limitada vida útil de las misiones satelitales y una distribución espacial y temporalmente escasa de mediciones desde globos y desde la superficie terrestre; así, por ejemplo, solo hay una estación en el mundo (Boulder, Colorado) con series temporales de más de 30 años de mediciones con globos del vapor de agua en la zona de la troposfera alta y estratosfera baja.

Los modelos que se utilizan para predecir el clima del futuro hacen uso de datos de reanálisis para verificar la correcta simulación del clima actual. Por consiguiente, la falta de unos datos exactos de vapor de agua en la importante región de la alta troposfera y baja estratosfera limitará la capacidad de estos modelos para predecir el clima del futuro.

## El vapor de agua como compuesto químico

Además de actuar como gas de efecto invernadero y como fuente para la formación de nubes, las moléculas de agua también intervienen en las reacciones químicas en la atmósfera. El vapor de agua, conjuntamente con el ozono, es una fuente importante para la formación del radical hidroxilo (OH), altamente reactivo. El radical OH es el oxidante más importante en la baja atmósfera, constituyendo el sumidero fundamental para numerosos gases de efecto invernadero (p. ej., CH<sub>4</sub>, hidroclorofluorocarburos (HCFC), hidrofluorocarburos (HFC)) y contaminantes (p. ej., CO e hidrocarburos sin metano). En aire limpio, el radical OH se forma a través de estas dos reacciones químicas:



La abundancia de OH en la atmósfera depende de las cantidades de ozono y de vapor de agua. La producción de OH depende asimismo del excedente de ozono, ya que eso determina la cantidad de radiación de onda corta necesaria para romper la molécula de ozono.

Mientras la troposfera es bastante húmeda, la estratosfera es muy seca, típicamente con razones de mezcla del vapor de agua que no superan los 5 ppm. Esto significa

que normalmente no hay nubes en la estratosfera. Sin embargo, si la temperatura disminuye por debajo de  $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$  se puede formar un tipo especial de nubes de hielo de agua y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ). En las superficies de las partículas de hielo ocurren reacciones químicas que convierten los inocuos compuestos de las reservas de cloro (ácido clorhídrico,  $\text{HCl}$ , y nitrato de cloro,  $\text{ClONO}_2$ ) en formas reactivas (monóxido de cloro,  $\text{ClO}$ ) que destruyen el ozono.

El aumento de las concentraciones de vapor de agua y la disminución de la temperatura en la estratosfera (también como consecuencia del cambio climático) darán como resultado un aumento de este tipo de nubes y conllevarán una mayor disminución del ozono, en tanto en cuanto la concentración de los gases destructores de ozono permanezca alta.



*Nubes nacaradas en la estratosfera, en torno a los 20 a 25 km sobre el nivel del suelo, que se forman en las ondas a sotavento cuando soplan vientos fuertes del oeste sobre las montañas noruegas. Los colores se deben a la difracción en torno a las partículas de hielo que constituyen estas nubes. A pesar de su belleza, presagian destrucción de ozono a través de la conversión de los compuestos halógenos pasivos en especies activas que destruyen el ozono.*

## Retos en la observación del vapor de agua

La distribución global del vapor de agua en la alta troposfera y baja estratosfera no se conoce bien debido a la escasez de observaciones con alta resolución vertical en estas regiones de la atmósfera. En algunos casos hay, incluso, grandes discrepancias entre los datos de satélite, los datos de higrómetros de punto de escarcha y los reanálisis meteorológicos. Se necesitan datos más exactos con una mayor cobertura geográfica. Las tendencias temporales observadas en el vapor de agua estratosférico se comprenden vagamente, lo que demuestra una falta de conocimiento acerca de cómo el vapor de agua entra en la estratosfera. Estas son áreas de estudio a las que la VAG se dedicará en el futuro.

*La referencias están disponibles en la versión en línea.*