

JOURNAL OF ENVIRONMENTAL HYDROLOGY

The Electronic Journal of the International Association for Environmental Hydrology

On the World Wide Web at <http://www.hydroweb.com>

VOLUME 19

2011



COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DE LA PRECIPITACIÓN EN TENERIFE, ISLAS CANARIAS

E. Sosa
J.C. Guerra
M.T. Arencibia

Grupo de Investigación en Hidrometeorología
Facultad de Física
Universidad de La Laguna
Tenerife, Islas Canarias, España

En este trabajo se presentan los resultados del estudio más largo realizado en Canarias (Tenerife, La Laguna) sobre composición isotópica en eventos de precipitación individuales. Se han recogido muestras de eventos de precipitación durante el periodo 2007-2009 para su análisis isotópico ($\delta^{18}\text{O}$ y δD), dentro del proyecto Global Network for Isotopes in Precipitation (GNIP). Los datos obtenidos muestran variaciones en $\delta^{18}\text{O}$ entre -9.3‰ a -1.4‰ y entre -6.8‰ a -57.8‰ para δD . Los valores medios fueron de -4.34‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y -18.9‰ para δD . Se analizaron 42 muestras de precipitación y se calculó la línea meteórica local (LML; $\delta^{\text{H}} = 7.6 \cdot \delta^{18}\text{O} + 13.7$), la cual está en buena concordancia con la obtenida en estudios previos realizados en esta región. Las correlaciones con parámetros meteorológicos mostraron ser muy buenas con la Intensidad de Precipitación Media (IPM), calculada como la relación entre la precipitación total y el total de días que dura el evento. Sin embargo, la correlación con la temperatura superficial fue inapreciable, tal como se ha observado en otras islas subtropicales. Por otro lado se encontraron mejores correlaciones con la temperatura de la base y la cima de la nube, calculadas a partir de los sondeos atmosféricos locales, debido a que la temperatura de la nube es más representativa de la temperatura a la que se inicia la precipitación. Por último, se estudiaron las fuentes y las trayectorias del vapor de agua usando retro-trayectorias isentrópicas de 5 días. Los primeros datos sugieren que los valores bajos de $\delta^{18}\text{O}$ se asocian con eventos que proceden del este o eventos producidos tras una invasión de polvo del Sáhara o se deben a largos recorridos desde el noroeste. Los valores más altos se relacionan con eventos que proceden del noroeste y con trayectorias cortas.

INTRODUCCIÓN

El análisis de los isótopos estables del oxígeno ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) y del hidrógeno ($^2\text{H}/^1\text{H}$) en la precipitación atmosférica se ha convertido en una herramienta muy importante en campos de investigación, tales como la hidrología, la climatología o la meteorología. (IAEA, 1981; Rozanski et al., 1993). Los estudios hidrológicos a escala regional dan información sobre el nivel medio de recarga, la cuantificación de los recursos hídricos para su gestión efectiva, la interacción agua-roca, tiempo de tránsito, etc. La hidrología isotópica contribuye de manera eficiente a este conocimiento, a tenor de que la composición isotópica de la precipitación varía espacial y temporalmente como consecuencia del fraccionamiento ocurrido durante la evaporación en el océano y la condensación durante la advección del vapor de agua (Dansgaard, 1964). Por tanto, la composición isotópica de la precipitación se debe en primer lugar a procesos de escala regional, que están influenciados por: el origen de las masas de aire húmedo, las trayectorias seguidas durante el transporte de las masas de vapor de agua sobre los continentes y su posible condensación parcial en áreas cercanas a la precipitación (Merlivat and Jouzel, 1979) y en general al promedio del historial de la masa de aire que genera la precipitación (Rozanski et al., 1982).

La composición isotópica del hidrógeno y del oxígeno en el agua se expresa en función de δ , donde:

$$\delta_{\text{muestra}} = \left[\frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{VSMOW}}}{R_{\text{VSMOW}}} \right] \times 1000$$

siendo R la relación entre el isótopo pesado respecto al ligero ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ o D/H) de la muestra de agua (R_{muestra}) o del Promedio Estándar de Agua de Océano de Viena, V-SMOW (R_{VSMOW}).

Se define entonces la ecuación de la línea meteórica como

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + d$$

El termino d, exceso de deuterio (d-excess) (Dansgaard, 1964), depende entre otros factores del lugar donde se recogen las muestras. El valor medio global del exceso de deuterio fue dado por Craig (1961) siendo su valor de 10‰. El exceso de deuterio refleja las condiciones de evaporación del lugar de donde procede la masa (Jouzel et al. 1982; Armengaud et al. 1998). Bajo condiciones climáticas secas, la fracción cinética durante la evaporación puede intensificarse teniendo d valores más altos en las siguientes precipitaciones. En condiciones climáticas húmedas, la fracción cinética en la evaporación puede disminuir resultando valores bajos de d en las siguientes precipitaciones (Merlivat y Jouzel 1979).

Numerosos estudios han encontrado una buena relación entre el contenido isotópico y la temperatura (Craig, 1961; Dansgaard, 1964), la cantidad de precipitación (Dansgaard, 1964), la altitud (Poage y Chamberlain, 2001; Gonfiantini et al., 2001), la latitud (Dansgaard, 1964; Fricke y O'neil, 1999) y la historia de las masas de aire y/o el origen de la precipitación ((Lawrence et al., 1982; Zhongfang et al., 2008). Por esta razón la hidrología isotópica puede contribuir a revelar los mecanismos que se están viendo alterados como consecuencia del cambio climático. De acuerdo con la información del Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC, 2007), la región subtropical de las Islas Canarias es una zona muy sensible a los cambios climáticos, lo cual la convierte en un emplazamiento ideal para el estudio de éstos. A pesar de ser una zona poco estudiada (con respecto a otras) desde un punto de vista meteorológico, es una zona

crucial para entender la dinámica y la termodinámica atmosférica, por su coincidencia en latitud con la rama descendente de la Célula de Hadley, que originan una estructura térmica vertical típica desde la superficie hasta la tropopausa. Las islas Canarias se convierten así en un lugar idóneo para el estudio de la atmósfera desde diferentes perspectivas.

Antes de este trabajo, los datos sobre isótopos en precipitación en Canarias eran escasos. Sin embargo, se encuentran algunos estudios hidrológicos realizados en el archipiélago que muestran la variación de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) e hidrógeno ($\delta^2\text{H}$) de precipitación y de aguas subterráneas. Estos estudios fueron realizados por Gonfiantini, 1973; Gonfiantini et al., 1976; Custodio et al., 1987; Gasparini et al., 1987,1990; Veeger, 1991; Herrera y Custodio, 2000; Herrera, 2001; Custodio y Manzano, 2000; Muñoz, 2005. En 1973 Gonfiantini trazó la primera línea meteórica local usando un número limitado de muestras de aguas subterráneas. La línea que se obtuvo fue: $\delta^2\text{H}=6,57\cdot\delta^{18}\text{O}+6,75$. Más tarde Custodio obtuvo nuevos datos, calculó y representó la nueva línea adoptando una pendiente de 8. De esta manera, el término aditivo que se obtiene representa el exceso de deuterio. La línea meteórica era: $\delta^2\text{H}=8\cdot\delta^{18}\text{O}+15$. El valor medio del exceso de deuterio obtenido en 2008 por Custodio y Jiménez Martínez fue de +14‰. Los valores del exceso de deuterio que se obtienen en Canarias pueden deberse a la cercanía del Archipiélago con el continente africano, que confiere a la atmósfera de las islas valores bajos de humedad. Se tiene un gradiente de altitud de -0,22‰/100m y -0,19‰/100m para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ (Gonfiantini, 1973), respectivamente en la isla de Tenerife. Para Gran Canaria, Gonfiantini (1976) encontró $\delta^{18}\text{O}=-0,13\text{‰}/100\text{m}$ y $\delta^2\text{H}=-1\text{‰}/100\text{m}$ para el norte de la Isla. Los estudios llevados a cabo en la zona sur de esta Isla muestran valores de -0,25‰/100m y -1,2‰/100m para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. En la isla de Fuerteventura, se obtuvieron para $\delta^{18}\text{O}$ los valores - 0,27 a -0,32 ‰/100m (Herrera, 2001).

Los objetivos de este estudio son: (1) obtener una base de datos de precipitación en Tenerife con el fin de ayudar a investigaciones hidrológicas y atmosféricas en esta región; (2) documentar la variación espacial y temporal de la composición isotópica de los isótopos estables en precipitación de una región semi-tropical donde los cambios de temperatura son mínimos; (3) analizar la variación isotópica de la precipitación con las diferentes regiones fuentes de vapor así como con las diferentes trayectorias de las masas de aire que generan precipitación en las islas.

SECCIÓN EXPERIMENTAL

Área de estudio

Las Islas Canarias están situadas al oeste de África del Norte (Figura 1a), encontrándose bajo la influencia directa de los vientos alisios, lo que hace que tengan un clima estable a lo largo del año. Por lo general, el anticiclón de las Azores actúa como una barrera impidiendo la llegada de las bajas atlánticas que afectan a la zona por encima de los 30°N. En otoño e invierno, cuando el anticiclón es más débil, sistemas de bajas presiones pueden alcanzar Canarias. En primavera, el anticiclón comienza a reforzarse y en verano alcanza su máximo fortalecimiento y posición latitudinal, aumentando la intensidad de los vientos alisios (Font, 1956). Debido a la casi permanencia de las condiciones de subsidencia en las Islas Canarias, aparece una zona de inversión térmica por debajo de los 2000 m.s.n.m (metros sobre el nivel del mar) durante todo el año, resultando una fuerte estratificación en la baja troposfera. Por otra parte, las islas están afectadas por la corriente fría de Canarias, que procede del norte, derivada de la Corriente del Golfo. Los vientos alisios soplan en la vertiente norte de las islas y proporcionan una advección húmeda y fresca, la cual puede elevarse sobre las laderas de las islas más montañosas, permitiendo a menudo

la condensación y crecimiento de la nube que se encuentra bloqueada por la estructura típica de la estratificación vertical. Los eventos de precipitación ocurren cuando las perturbaciones, tanto superficiales (bajas atlánticas) como de niveles altos (depresiones aisladas) rompen la inversión térmica, modificando la estructura vertical. La mayoría de las situaciones de lluvias no se detectan a nivel de superficie y sólo son evidentes cuando se analizan los niveles altos..

El régimen medio de precipitación en las islas muestra una fuerte estacionalidad, con una precipitación máxima mensual entre 30 y 100mm durante el otoño e invierno y relativamente seco o sin lluvia durante los meses de abril-mayo a septiembre (García Herrera et al., 2001). El relieve es un factor importante que afecta a la distribución de la precipitación, como puede verse en el mapa de isoyetas correspondiente a la Isla de Tenerife (Figura 1b). En general, la precipitación va aumentando mientras atraviesa el archipiélago de este a oeste.

La estación de medida se encuentra situada en el Valle de Agüere (El Rayo, 28.5°N, 16°W) a 580 m.s.n.m, en el NE de Tenerife (Figura 1b). Este valle es un camino natural del aire oceánico que sopla de norte a sur entre los montes de ‘La Esperanza’ y de ‘Las Mercedes’. La estación de Agüere está cerca de la ciudad de La Laguna y expuesta directamente al aire de NO que predomina en el Valle (vientos alisios canalizados desde el océano). Su humedad relativa durante todo el año es relativamente alta y las precipitaciones son escasas o inexistentes durante los meses de verano. Los datos del radiosondeo se obtienen de la estación de sondeo #60018 (Güimar: 28.321°N, 16.381°W, 105 m.s.n.m) a 20 km de la estación de El Rayo (Figura 1b). Los radiosondeos se lanzan dos veces al día a las 00UTC y 12UTC por el Centro Meteorológico Territorial en Canarias Occidental perteneciente a la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) en Tenerife usando el Vaisala ‘ DigiCORA Sistema no tripulado AUTOSONDA’ con una sonda RS80.

Recogida de muestras

La mayoría de los estudios isotópicos de la precipitación se han basado en valores medios mensuales y los estudios meteorológicos, climáticos o hidrológicos se han llevado a cabo en estos intervalos de tiempo. Sin embargo, una base de datos de eventos permite llevar a cabo investigaciones sobre aspectos específicos, debido a su resolución temporal, tales como la relación local con la temperatura, cantidad de precipitación, regiones fuente y trayectorias en el transporte del vapor, etc. En este estudio se han recogido cuarenta y dos muestras de eventos de precipitación entre 2007 y 2009. Eventos con precipitaciones menores a 2mm se han descartado ya que la composición isotópica puede verse afectada por la evaporación de las gotas de lluvia durante la precipitación y/ o la recogida y almacenamiento. Los eventos analizados pueden registrarse en un solo día o en un periodo de varios días, recogidos siguiendo las directrices dadas por la AIEA (Agencia Internacional de la Energía Atómica) diseñadas para minimizar la re-evaporación y por lo tanto el enriquecimiento de la muestra. Estas muestras son enviadas posteriormente al laboratorio de hidrología isotópica de la AIEA en Viena, donde se analizan los isótopos estables siguiendo los métodos estándares establecidos. Los resultados de la composición isotópica se expresan en tanto por mil respecto al estándar internacional V-SMOW (Gonfiantini, 1978). La media ponderada del $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de la composición de la precipitación se obtiene según la ecuación propuesta por Yurtsever (Yurtsever et al., 1981):

$$R_{MW} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \partial X_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

donde P_i es la precipitación del evento, n el número de días del evento y ∂X_i la composición del evento de precipitación referida a $\delta^{18}\text{O}$ o $\delta^2\text{H}$.

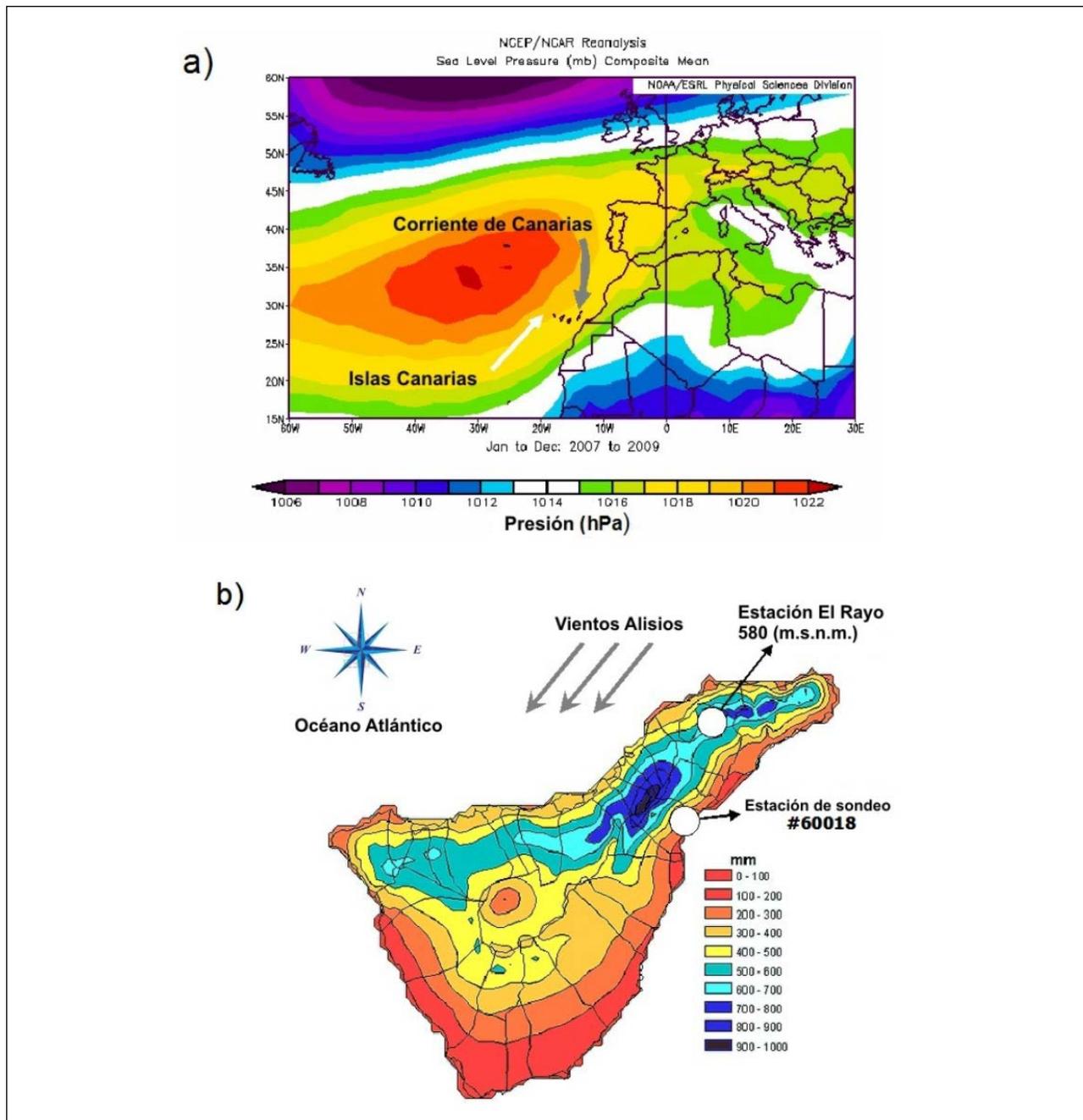


Figura 1. a) Localización de las Islas Canarias y situación media sinóptica; b) distribución espacial de precipitación de la Isla de Tenerife (mm/año) de acuerdo con el CIATFE (Consejo Insular de Aguas de Tenerife) y localización de las estaciones de muestreo y sondeo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Línea meteórica local (LML)

Las muestras de precipitación de los eventos recogidos en la estación de El Rayo tienen valores que van desde -9.30‰ a -1.40‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y de 6.80‰ a -57.80‰ para δD . Los valores medios son -3.55‰ y -13.1‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y δD respectivamente. El valor medio ponderado de todos los datos, calculado de acuerdo a la ecuación (1) es de -4.34‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y de -18.9‰ para δD . Los valores más bajos ($\delta^{18}\text{O}=-9.29$ y $\delta\text{D}=-57.85$) corresponden a precipitaciones ocurridas tras un evento de invasión del Sáhara.

La mejor línea de ajuste entre δD y $\delta^{18}O$ de la composición de la precipitación se llama Línea Meteorica. Craig (1961) después de un estudio mundial del contenido de isótopos estables en precipitación propuso una Línea de agua Meteorica Global (LMG), que fue posteriormente modificada por Rozanski et al. (1993) y que se expresa como:

$$\delta D(\text{‰}) = 8.17\delta^{18}O(\text{‰}) + 10.35 \quad (n=206, r^2=0.98) \quad (2)$$

La ecuación para los datos de la estación El Rayo que representa la Línea Meteorica Local (LML, figura 2), es:

$$\delta D(\text{‰}) = 7.57 \cdot \delta^{18}O(\text{‰}) + 13.7 \quad (n=42; r^2=0.93) \quad (3)$$

Las desviaciones de la pendiente y la ordenada en el origen respecto a la LMG (Craig, 1961) reflejan las características específicas de la circulación atmosférica local, las fuentes regionales del vapor de agua y el medio de evaporación. La LML obtenida para El Rayo muestra una desviación respecto a la LMG muy cercana a la que se obtiene en la región del Mediterráneo con precipitaciones procedentes del Atlántico (Araguás-Araguás et al., 2005; Díaz-Teijeiro et al., 2009), indicando la importancia de la fuente de humedad del Atlántico Norte en la precipitación de las Islas Canarias. También, debe considerarse el efecto cinético de la evaporación en el medio marino relativamente seco del cinturón sahariano, siendo el mismo efecto que explica los valores grandes de exceso de deuterio observados en precipitaciones originadas en el área mediterránea (Herrera et al., 2003).

La pendiente menor a 8 (7.6) puede atribuirse a las variación de las condiciones en las regiones fuente del vapor y/o a el aumento en la evaporación de las gotas de lluvia en una atmósfera relativamente seca debajo de la base de la nube (Araguás et al., 2000). Por otro lado, la evaporación durante la recolección de las muestras puede afectar a la composición isotópica y cambiar la pendiente de la LML a valores más bajos. Muchos de los valores bajos están asociados con volúmenes de precipitación pequeños por lo que es más probable la evaporación en la toma de muestras o en la botella de almacenamiento. En orden de investigar este punto, se representa los datos de precipitación con volúmenes inferiores a 10mm (línea roja de la Figura 2). La LML encontrada con 15 pares de datos de composiciones isotópicas no muestra diferencias significativas, indicando que las muestras de eventos con cantidad de precipitación pequeña no están sujetas a evaporación durante la recolección de las muestras.

El exceso de deuterio muestra un incremento de 3‰ con respecto a la LMG y varía hasta en un 15‰, con un valor medio de 14.7‰. El valor que se obtiene es similar a resultados obtenidos en estudios previos realizados en Canarias y que lo atribuyen al ambiente seco existente, a pesar de estar en el Océano Atlántico (Custodio et al., 1987; Marrero et al., 2007; Jiménez-Martínez et al., 2008; Díaz-Teijeiro, 2009).

Efecto de Cantidad y Humedad

La aparente correlación entre la cantidad de precipitación mensual y la composición isotópica fue observada por primera vez por Dansgaard (Dansgaard, 1964) y la llamó 'Efecto de Cantidad'. Este efecto se ha atribuido a numerosos factores: 1) el valor isotópico en la condensación en una nube decrece con el enfriamiento y los procesos de precipitación; 2) el equilibrio de pequeñas gotas de lluvia con el vapor de agua y con las condiciones de temperatura debajo de la base de la nube; y 3) la mayor evaporación de las gotas pequeñas de lluvia respecto de las grandes en su camino hacia la superficie terrestre. La figura 3a muestra esta relación para los datos de la estación de El Rayo. La línea de regresión de esta figura indica que el cambio en los valores de $\delta^{18}O$ es de

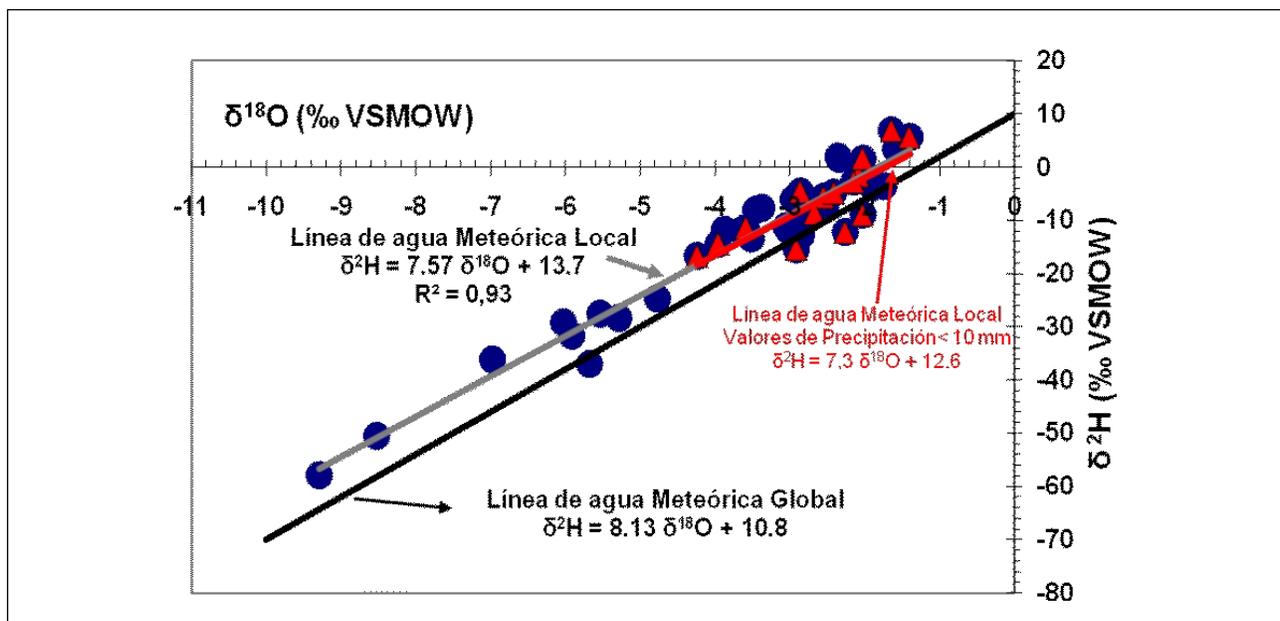


Figura 2. Relación isotópica de los eventos de precipitación recogidos en La Laguna. La línea meteórica local se calcula a partir de la regresión de los 42 grupos de datos isotópicos y la línea de agua meteórica global es la dada por Rozanski et al. (1993). En rojo se representa la línea de dispersión de los eventos con precipitación menor a 11 mm (12 grupos de datos isotópicos).

-3.96‰ y en δD de -28.6‰ por cada 100 mm de precipitación. Se puede ver también que la composición isotópica en precipitaciones grandes muestra una dispersión mayor que para cantidades de precipitación pequeñas. Algunos estudios llevados a cabo en las islas más orientales (Gran Canaria y Fuerteventura) de la composición isotópica de aguas meteóricas (Gasparini et al., 1990, Herrera, 2001) encontraron que al aumentar la cantidad de precipitación el valor de $\delta^{18}O$ se estabilizaba entorno a -4 ‰. Considerando que los patrones de precipitación en las Islas Orientales están caracterizados por eventos con escasa precipitación, puede verse en la Figura 3 similares resultados a los obtenidos con cantidades de precipitación pequeñas (cuadrados rojos; precipitación < 11 mm).

Rozanski (Rozanski, 1993) dio una explicación adicional sobre el efecto de la cantidad, incluyendo la intensidad de las precipitaciones y la extensión de la lluvia en nubes convectivas y la distinta composición isotópica del vapor de agua dependiendo de la región fuente. La relación inversa entre la precipitación y los valores de $\delta^{18}O$ (δD) y la Intensidad de Precipitación (IP) ha sido estudiada por diferentes autores (Miyake et al., 1968; Yapp, 1982). En nuestro caso hemos incluido el parámetro Intensidad de Precipitación Media (IPM) de cada evento, que se calcula dividiendo la composición isotópica por el número de días que dura el evento. La representación frente a los valores $\delta^{18}O$ (δD) se muestra en la Figura 3b. En este caso se encuentra una mayor correlación, con coeficientes relativamente altos. Aunque existe una buena relación entre $\delta^{18}O$ (δD) con la precipitación y la IPM, tal resultado no implica que la IPM sea un factor determinante en la variación de la composición isotópica en la precipitación, porque $\delta^{18}O$ (δD) y la IPM en la atmósfera cambian juntos, bajo las mismas condiciones de circulación gobernadas por factores meteorológicos y geográficos similares.

En relación al efecto de la cantidad y las condiciones de humedad atmosférica, algunos investigadores han encontrado buenas correlaciones entre $\delta^{18}O$ (δD) y el Agua Precipitable total (AP) (Zhang et al., 2010; Yoshimura et al., 2010). El agua precipitable en la atmósfera se define

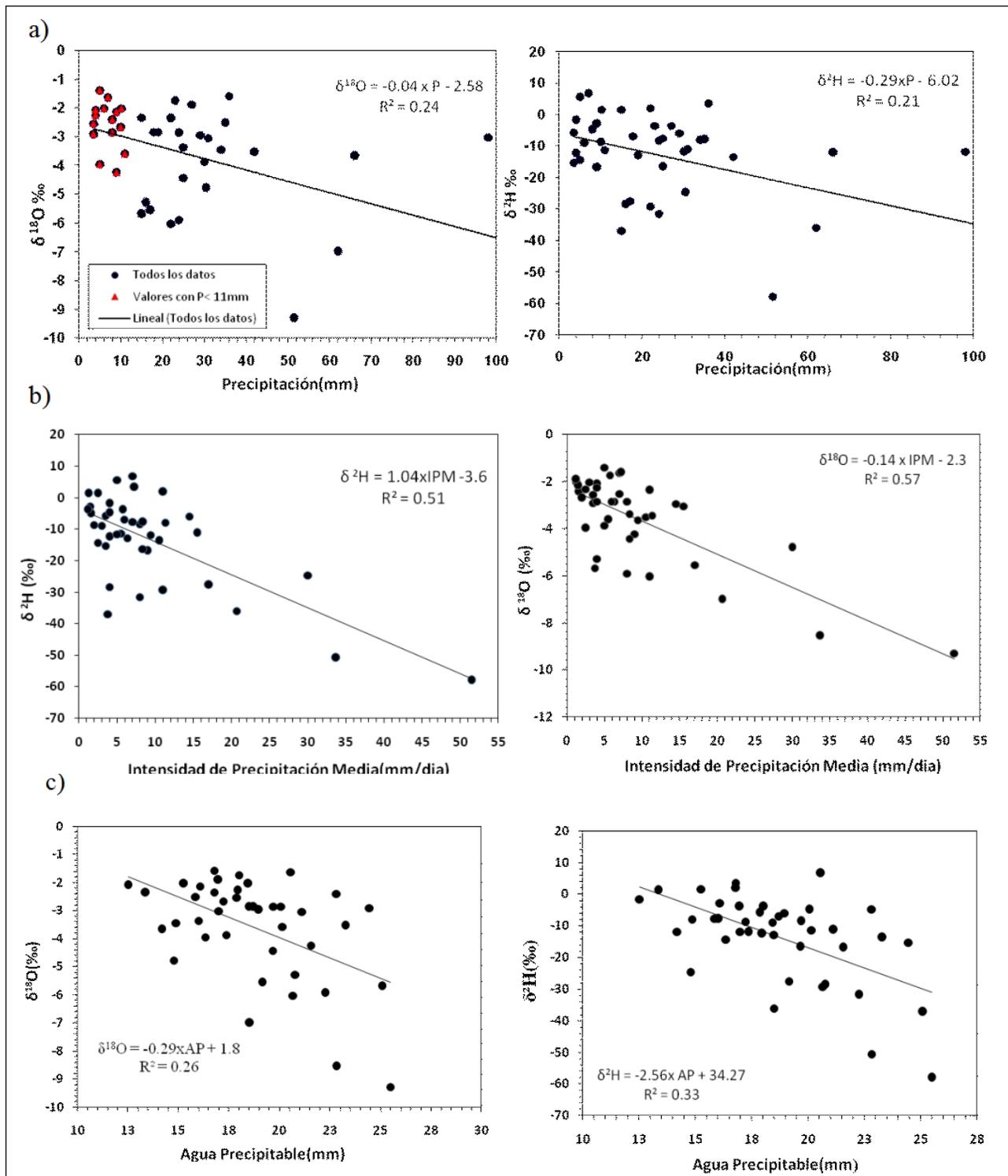


Figura 3. Relación entre $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ con el efecto de la cantidad. a) dependencia del contenido isotópico con la cantidad de precipitación; b) correlación con la Intensidad de Precipitación Media (IPM); c) dependencia con el Agua total Precipitable (AP).

como la altura de la columna de agua líquida obtenida si se condensa todo el vapor de la columna vertical de aire. Este parámetro refleja las condiciones de humedad de toda la atmósfera. En la Figura 3c se representa la correlación entre $\delta^{18}\text{O}$ y δD con el AP, calculado a partir de los sondeos meteorológicos en la estación de Tenerife. En este caso puede verse como hay una relación similar que con la cantidad de precipitación, con coeficientes de correlación similares.

Relación con la Temperatura

La correlación entre la composición isotópica de la precipitación con la temperatura es conocida desde hace mucho tiempo, como resultado de la dependencia con la temperatura de los procesos de destilación de la atmósfera (Craig, 1961; Dansgaard, 1964). Esta correlación es más significativa en el interior de los continentes. Sin embargo, en la mayoría de las estaciones de islas tropicales donde la región fuente de vapor coincide esencialmente con la zona de precipitación, el contenido isotópico de la precipitación posee una relación baja con la temperatura, siendo más relevante la dependencia con la cantidad de precipitación. La transición en el control de la composición isotópica por temperatura o por cantidad de precipitación ocurre a unos 30°N/S (Bowen, 2008). Como corresponde a una isla subtropical, los datos muestran una mala correlación con la temperatura de la superficie (Figura 4a), mostrando una gran dispersión en el corto rango de temperaturas en que ocurren los eventos de precipitación en las Islas Canarias.

Algunas investigaciones han mostrado que existe una mejor correlación con la temperatura de la cima (Rindsberger y Magaritz, 1983) y base (Suzuki y Endo, 2001) de la nube, porque la temperatura de la nube se aproxima mejor a la temperatura actual de la precipitación. Para verificar este punto, se hace uso de los datos del radio-sondeo de la estación de Güimar en Tenerife y calculamos la temperatura de la base y cima de la nube para cada evento de precipitación, en el que la base y cima de la nube se encuentra bien definido. La extensión de la nube se calcula mirando en el sondeo el nivel de humedad relativa mayor a 95%. En eventos de precipitación con más de un día de duración, se calcula la media de la temperatura de la base y la cima del periodo. Los resultados muestran que existe una mejor correlación usando la temperatura de la base y cima de la nube que la temperatura a nivel superficial (Figuras 4 b,c). La dependencia lineal de la temperatura de la base de la nube mejora si se consideran sólo los datos de $\delta^{18}\text{O}$ mayores a -6‰ (triángulos rojos en la figura 4b). Así por ejemplo, se encuentra un efecto de temperatura de 0.15‰ y $R^2=0.44$ $\delta^{18}\text{O}$ y de 1.15‰ con $R^2=0.36$ para $\delta^2\text{H}$. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ menores a -6‰ son poco frecuentes a estas latitudes, por lo que la composición isotópica de la precipitación de estos eventos con valores isotópicos bajos puede estar influenciados por otros factores (fuente de vapor y temperatura de la fuente, trayectorias de las masas de aire y su historial de precipitación, reciclaje de agua, etc.) que será investigado en detalle en futuros trabajos.

Historia de la precipitación y fuente de humedad de las masas de aire

La variación isotópica de la precipitación no está solo influenciada por factores meteorológicos, sino también por la fuente de humedad y las trayectorias de transporte (Rozanski et al., 1993; Aravena et al., 1999). En las Islas Canarias el ochenta por ciento de las situaciones sinópticas que generan lluvias están relacionadas con perturbaciones en superficie (bajas atlánticas) o en niveles altos (depresiones), las que permiten que lleguen a las islas aire frío y húmedo de latitudes altas (Font, 1956; García H. et al., 2001; Knippertz, 2003). Sin embargo, un porcentaje importante de los eventos de precipitación registrados no responden a estas condiciones, por lo que podrían tener sus composiciones isotópicas específicas. Para investigar la relación entre la composición isotópica de la precipitación y el origen y trayectorias seguidas por las masas de aire, se calculan las retrotrayectorias isentrópicas para 5 días, usando el modelo HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 4.0 (Draxler y Rolph, 2003; Rolph, 2003), con la base de datos meteorológica de FNL y modelo de velocidad vertical. El inicio de las retrotrayectorias es Tenerife (estación El Rayo) y la altitud fue calculada en el nivel de presión donde se encuentra la base de la nube

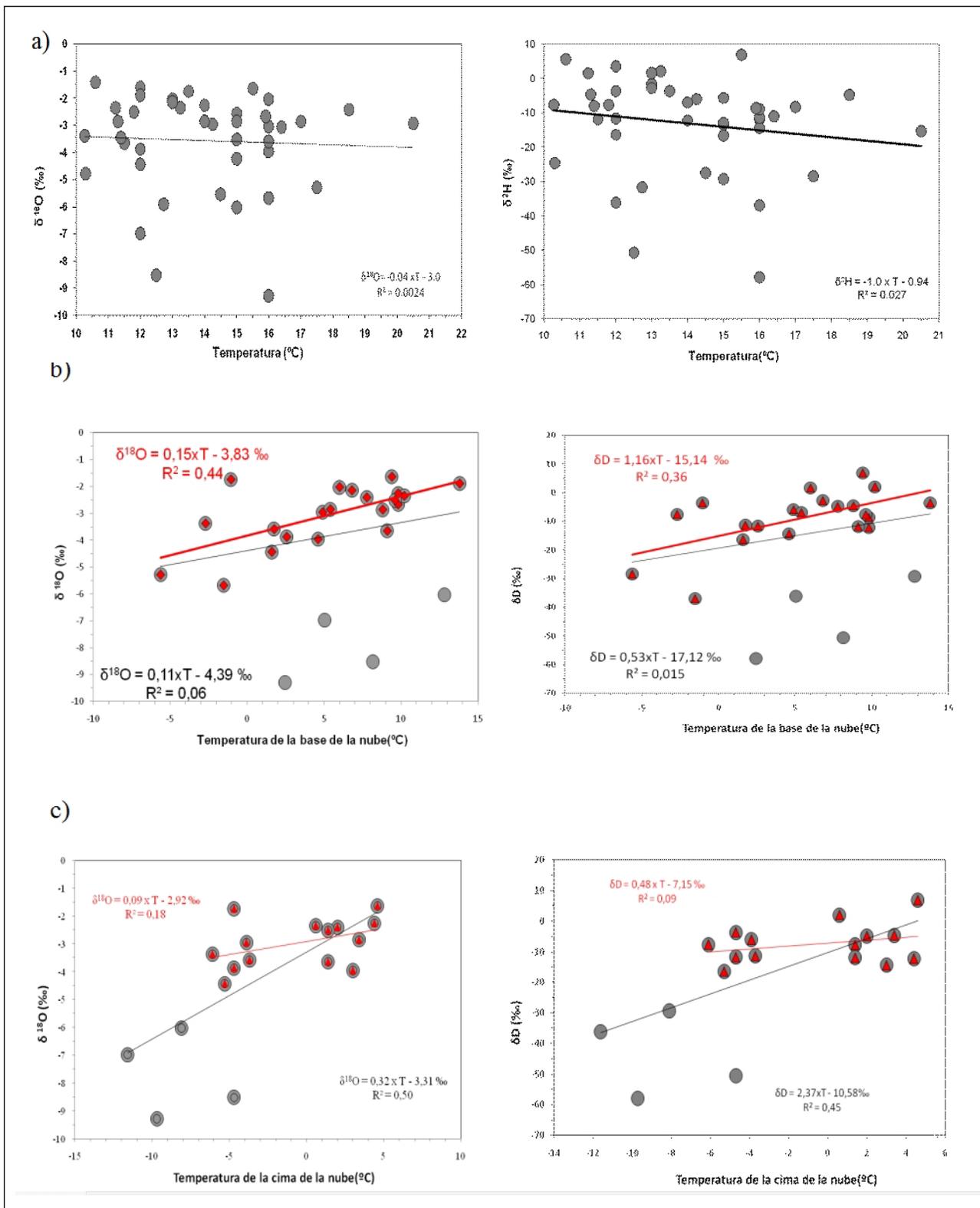


Figura 4. Relación de dispersión entre $\delta^{18}\text{O}$ -T y $\delta^2\text{H}$ -T. a) correlación con la temperatura en la superficie; b) dependencia con la temperatura de la base de la nube; c) relación con la temperatura de la cima de la nube.

La Figura 5 muestra las retro trayectorias calculadas de acuerdo a su composición isotópica como muestra la leyenda de la gráfica. La mayor parte de las trayectorias que llegan a Tenerife proceden principalmente del noroeste y norte (América y Sector Atlántico Norte), correspondiendo

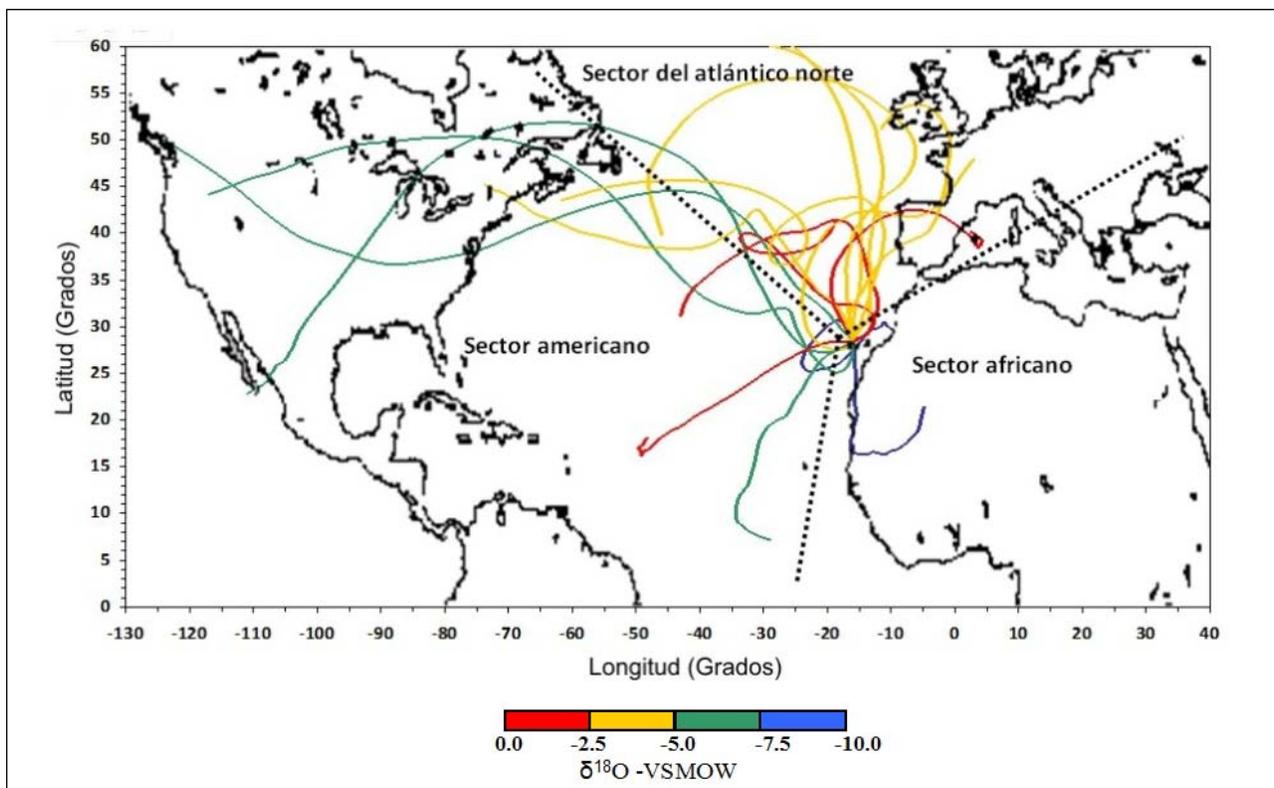


Figura 5. Trayectorias de las masas de aire calculadas 120 horas antes de alcanzar Tenerife.

a bajas atlánticas o depresiones en niveles altos. Sin embargo, hay algunas trayectorias que derivan del suroeste y sureste. El aspecto más remarcable es que las masas de aire con la misma composición isotópica son similares en todos los aspectos, indicando una fuente y trayectorias similares de las masas de vapor. En general, la composición isotópica más enriquecida (línea roja de las trayectorias) corresponde a retrotrayectorias con un corto recorrido y de diferentes sectores (nunca del sector Africano), indicando probablemente una fuente de humedad local. Las fuentes más lejanas de la estación de muestreo y originadas en zonas al oeste tienen valores isotópicos más pequeños, indicando que ha habido precipitación sobre el océano, dejando el vapor restante empobrecido en ^{18}O and ^2H . Pero la composición isotópica más empobrecida corresponde a trayectorias que ocurren después de una intrusión de polvo africano (línea azul de las trayectorias). La llegada de aire del norte de África es un patrón de tiempo común en las Islas Canarias, principalmente durante el invierno, teniendo un importante efecto sobre la temperatura, humedad y visibilidad. La importancia de las intrusiones de polvo sobre Canarias y su especial marca isotópica hace necesario realizar investigaciones más detalladas de estos eventos en futuros trabajos.

CONCLUSIONES

Este estudio, sobre la composición isotópica de la precipitación, es uno de los más extensos llevados a cabo en las Islas Canarias y el primero basado en eventos de precipitación. La relación encontrada entre $\delta^{18}\text{O}$ y δD que determina la Línea Meteorológica Local, está de acuerdo con otras investigaciones realizadas por distintos autores, corroborando que la desviación respecto de la LMG es debida a condiciones meteorológicas específicas de la región. Se estudia también la relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de la precipitación con la temperatura. No se encuentra una correlación significativa con la temperatura superficial, como era de esperar en una isla subtropical, pero se

encuentra una mejor relación con la temperatura de la base y cima de la nube. Se analiza también el efecto de cantidad, encontrando mejores correlaciones que con respecto a la temperatura, hecho esperable a tenor de la localización de la estación de medida, por debajo de los 30°N. Se ha obtenido una buena correlación con la Intensidad Media de Precipitación (IPM) calculada como la relación entre la precipitación total y el número de días que dura el evento, debido al hecho de que la composición isotópica en la precipitación y la IPM cambian juntas, es decir, están gobernadas por factores meteorológicos similares. Un aspecto importante en este estudio es la interpretación de la composición isotópica relacionada con las trayectorias de las masas de aire. Este último aspecto investigado, que requerirá de futuros estudios cuando se cuente con una base de datos más extensa, revela preliminarmente que los valores bajos de $\delta^{18}\text{O}$ se obtienen después de eventos de invasión de aire africano o en eventos que proceden del este o porque las trayectorias de las masas de aire recorren largos caminos desde el noroeste.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido llevado a cabo gracias a la financiación del proyecto con referencia PI042005/034 y SolSubC200801000260 del Gobierno Autónomo de Canarias.

REFERENCIAS

- Araguas-Araguas, L., K. Froehlich, and K. Rozanski. 1998. Stable isotope composition of precipitation over Southeast Asia. *J. Geophys. Res.* 103, D22: 28,721–28,742.
- Araguas-Araguas, L., K. Froehlich, and K. Rozanski. 2000. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and the atmospheric moisture. *Hydrol. Process* 14: 1341-1355.
- Araguás-Araguás, L.J., and M.F. Díaz Teijeiro. 2005. Isotope composition of precipitation and water vapour in the Iberian Peninsula. In: *Isotopic composition of precipitation in the Mediterranean Basin in relation to air circulation patterns and climate*. IAEA-TECDOC-1453. Vienna. 173-190. (http://wwwpub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1453_web.pdf).
- Aravena, R., O. Suzuki, and H. Pena. 1999. Isotopic composition and origin of the precipitation in northern Chile. *Applied Geochemistry*, 14(4): 411–422.
- Armengaud, A., R.D. Koster, J. Jouzel, and P. Ciais. 1998. Deuterium excess in Greenland snow: analysis with simple and complex models. *J. Geophys. Res.*, 103:8947-8953.
- Bowen, G. 2008. Spatial analysis of the intra-annual variation of precipitation isotope ratios and its climatological corollaries. *J. Geophys. Res.* Vol. 113.
- Clark, I., and P. Fritz. 1997. *Environmental isotopes in hydrology*. Boca Raton: Lewis Publishers; 1997.
- Craig, H. 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133: 1702-1703.
- Custodio, E., Hoppe J., Hoyos-Limón A., Jiménez J., Plata A. & Udluft P. 1987. Aportaciones al conocimiento geohidrológico de Tenerife utilizando isótopos ambientales. En *Hidrología y Recursos Hidráulicos*, Madrid. XI: 263-280.
- Custodio, E., and M. Manzano. 2000. Estudio hidrogeoquímico e isotópico preliminar de la isla de La Gomera. Plan Hidrológico de las Islas Menores. Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Dpto. Ing. Terreno.UPC.
- Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation, *Tellus* 1964, 16: 436-468.
- Díaz Teijeiro, M.F., Rodríguez J., y Castaño S. 2009. La red española de vigilancia de isótopos en la precipitación (REVIP): distribución isotópica espacial y aportación al conocimiento del ciclo hidrológico. *Ingeniería Civil*, 155: 87-97.
- Draxler, R.R., y G.D. Rolph. 2003. HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website: <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Font, I., 1956. *El Tiempo Atmosférico en las Islas Canarias*. Servicio Meteorológico Nacional, Publicaciones serie A, nº 26.

- Fricke, H.C., O'Neil J.R. 1999. The correlation between $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 170: 181–196.
- García Herrera, R., Gallego D., Hernández E. 2001. Influence of the North Atlantic Oscillation on the Canary Islands Precipitation. *Journal of Climate*, 14: 3889–3903.
- Gasparini, A., Custodio E., Fontes J.C., Jiménez J. y Nuñez J.A. 1990. Exemple d'étude géochimique et isotopique d'aquifères en terrain volcanique sous climat semi-aride (Amurga, Gran canaria, Iles Canarias). *Journal of Hydrology*, 114: 61–91.
- Gonfiantini, R. 1978. Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature* 271: 534–536.
- Gonfiantini, R., Roche M.A., Olivry J.C., Fontes J.Ch. 2001. The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains, *Chemical Geology*, 181: 1147–1167.
- Herrera, C. 2001. Caracterización hidrogeoquímica del macizo de Betancuria. Fuerteventura, Archipiélago de Canarias, Memoria de Tesis, Universidad Politécnica de Cataluña, Depósito legal/ISBN: B.37618-2001/84-699-5747-3.
- Herrera, C. y Custodio E., 2003. Hipótesis sobre el origen de la salinidad de las aguas subterráneas en la isla de Fuerteventura, Archipiélago de Canarias, España. *Boletín Geológico y Minero*. Vol. 114 (4), pp. 433–452.
- Hughes, C.E. and Crawford J., 2009. A rainfall amount weighted meteoric water line for use in hydrological applications. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11, EGU2009-6660.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). 1981. Statistical treatment of environmental isotope data in precipitation. IAEA Tech. Rep. Ser. No. 206. IAEA, Vienna.
- IPCC, 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Equipo de redacción principal: Pachauri R.K. y Reisinger A. (directores de la publicación) IPCC, Ginebra, Suiza.
- Jiménez-Martínez, J. y Custodio E., 2008. El exceso de deuterio en la lluvia y en la recarga. *Boletín Geológico y Minero*, 119 (1): 21–32.
- Jouzel, J., L. Merlivat and C. Lorius. Deuterium excess in an east Antarctic ice core suggests higher relative humidity at the oceanic surface during the last glacial maximum, *Nature*, 299, 688–691, 1982.
- Knippertz, P., M. Christoph, and P. Speth, 2003: Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteor. Atmos. Phys.*, 83: 67–88.
- Lawrence, J.R., Gedzelman S.D., White J.W.C. 1982. Storm trajectories in eastern US D/H isotopic composition of precipitation. *Nature*, 296: 638–640.
- Liu, Z., Tian L., Yao T., Gong T. y Yin Ch. 2008. Influence of moisture transport on stable isotope in precipitation in Yarlungzangbo River basin, *Front. Earth Sci. China*. 2(1): 49–57.
- Liu, Z., Tian L., Chai X. and Yao T. 2008. A model-based determination of spatial variation of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ over China. *Chemical Geology* 249: 203–212.
- Marrero, R. 2010. Modelo Hidrogeoquímico del Acuífero de Las Cañadas del Teide, Tenerife, Islas Canarias. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 659pp.
- Merlivat, L., and J. Jouzel. 1979. Global Climatic Interpretation of the Deuterium-Oxygen 18 Relationship for Precipitation. *Journal of Geophysical Research* 84(c8): 5029–5033.
- Miyake, Y.; Matsubaya O., Nishihara C. 1968. An isotopic study on meteoric precipitation. *Papers in Meteorology and Geophysics* 19: 243–266.
- Muñoz, J.S. (2005). Caracterización hidrológica del acuífero de La Aldea (Gran Canaria). Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 310pp.
- Poage, M.A., Chamberlain C.P., 2001. Empirical relationships between elevation and the stable isotope composition of precipitation and surface waters: considerations for studies of paleoelevation change. *American Journal of Science* 301: 1–15.
- Rindsberger, M., M. Magaritz, I. Carmi, and D. Gilad (1983). The relation between air mass trajectories and the water isotope composition of rain in the Mediterranean Sea area, *Geophys. Res. Lett.*, 10(1), 43–46.
- Rolph, G.D., 2003. Real-time Environmental Applications and Display System (READY) Website: <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Rozanski, K., Sonntag G., Munnich K.O., 1982. Factors controlling stable isotope composition of European

- precipitation. *Tellus* 34, 142–150.
- Rozanski, K., Araguas-Araguas L., Gonfiantini, R., 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. In: Swart, P.K. (Eds.), *Climate Change in Continental Isotopic Records*. Geophysics Monograph Series, 78: 1–36.
- Suzuki, K. and Endo Y., 2001. Oxygen isotopic composition of winter precipitation in central Japan. *J. Geophys. Res.* 106-D7, 7243-7249.
- Veeger, A.I., (1991). *Geochemical methods for evaluating the origin and evolution of ground water in volcanic rocks*. Doctoral Thesis, University of Arizona. 241pp.
- Yapp, C.J., (1982). A model for the relationship between precipitation D/H ratios and precipitation intensity. *J Geophys Res* 87: 9614-9620.
- Yoshimura, K., Masao Kanamitsu and Michael Dettinger. 2010. Regional downscaling for stable water isotopes: A case study of an atmospheric river event. *J. Geoph. Res.*, Vol.15, pp: 14032-2010.
- Yurtsever, Y. and Gat J.R., 1981. Atmospheric waters. In: *Stable isotope hydrology: Deuterium and oxygen-18 in the water cycle*. Technical Report Series 210:103-142. IAEA, Vienna.
- Zhang, Xin-Ping, Jing-Miao Liu, Xiao-Yun Wang, Masayoshi Nakawo, Zi-Chu Xie, Jian-Ming Zhanga and Xin-Zhu Zhanga, 2010. Climatological significance of stable isotopes in precipitation over south-west China. *Int. J. Climatol.* Vol.: 30, pp: 2229–2239.
- Zhongfang, L., Lide Tian, Tandong Yao, Tongliang Gong and Changliang Yin. 2008, Influence of moisture transport on stable isotope in precipitation in Yarlungzangbo River basin, *Frontiers of Earth Science in China*, 2: 49-57.

DIRECCIÓN PARA LA CORRESPONDENCIA

E. Sosa

Grupo de Investigación en Hidrometeorología

Facultad de Física

Universidad de La Laguna

Tenerife, Islas Canarias, España

Email: estruji@ull.es
