

# ESTUDIO DEL CONTENIDO ISOTÓPICO DE EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EN CANARIAS

Juan C. Guerra García, Elisa Sosa Trujillo, M<sup>a</sup> Teresa Arencibia Pérez, Ángela Hernández.  
Grupo de Investigación en Hidrometeorología, Facultad de Física, Universidad de La Laguna.  
Canarias.

[jcguerra@ull.es](mailto:jcguerra@ull.es), [estruji@ull.es](mailto:estruji@ull.es), [mtarenci@ull.es](mailto:mtarenci@ull.es)

## Resumen

En este trabajo se analiza la composición isotópica ( $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ ) de muestras de eventos de precipitación recogidas entre 2007 y 2009 en una estación experimental en la Isla de Tenerife, dentro del proyecto Global Network for Isotopes in Precipitation (GNIP). Se analizan las relaciones entre los isótopos estables de H y O, obteniéndose una línea meteórica local dada por  $\delta^2\text{H} = 7,6 \times \delta^{18}\text{O} + 13,7$ . Se han estudiado las correlaciones con la temperatura y la cantidad de precipitación y por último se analiza la situación sinóptica de varios episodios con valores significativos registrados durante el periodo de estudio.

## Introducción

La utilización de los isótopos estables del agua más abundantes, el  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  (2000 ppm en agua de mar) y  $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$  (320 ppm en agua de mar), se ha convertido en las últimas décadas en una potente herramienta para el estudio del funcionamiento general del ciclo hidrológico, ya que la composición isotópica de la precipitación puede reflejar el origen, el transporte y los procesos de mezcla ocurridos durante su movimiento dentro del ciclo. Numerosos estudios han identificado dependencias con la temperatura (Craig, 1961; Dansgaard, 1964), con la cantidad de precipitación (Dansgaard, 1964), con la altura (Poage y Chamberlain, 2001; Gonfiantini et al., 2001), con la latitud (Dansgaard, 1964; Fricke y O'neil, 1999) y con la historia de la masa de aire y/o la fuente de la precipitación (Lawrence et al., 1982; Zhongfang et al., 2008). Por estas razones la hidrología isotópica puede aportar importantísima información a los mecanismos que se están viendo alterados como consecuencia del cambio climático.

Según los datos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007), la región subtropical sobre Canarias es una zona muy sensible frente a los cambios climáticos, lo que la convierte en un emplazamiento ideal para el estudio de tales cambios. Si a esto añadimos que, a pesar de ser una región poco estudiada (respecto a otras) desde el punto de vista meteorológico, es una zona con una importancia crucial para entender la dinámica y termodinámica atmosférica, por su

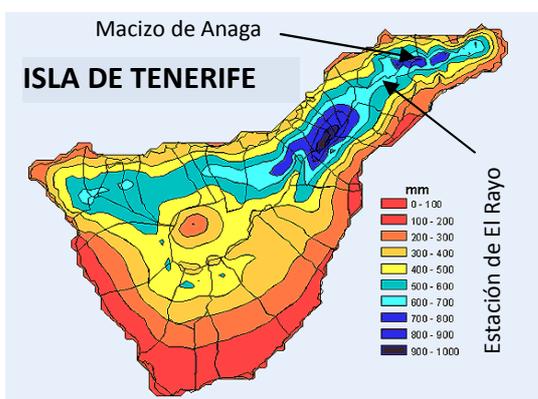
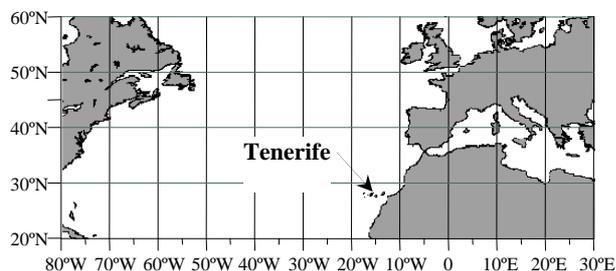
coincidencia en latitud con la rama descendente la célula de Hadley, que origina una estructura térmica vertical característica desde la superficie hasta la tropopausa, las islas se convierten en un emplazamiento privilegiado para el estudio de la atmósfera desde diferentes perspectivas.

En este trabajo se exponen los primeros resultados de la investigación que realiza en Canarias el Grupo de Investigación en Hidrometeorología de la Universidad de La Laguna, en el marco del proyecto GNIP (Global Network for Isotopes in Precipitation) auspiciado por la Agencia Internacional de la Energía Atómica y la Organización Meteorológica Mundial. Se analizan 42 eventos de precipitación ocurridos entre 2007 y 2009 en una estación experimental en la isla de Tenerife, lo que nos va a permitir establecer los valores promedio de  $\delta^2\text{H}$ , de  $\delta^{18}\text{O}$  y de exceso de deuterio, analizar su dependencia con la temperatura y la cantidad de precipitación. Además al estudiar eventos de precipitación y no valores promedio mensuales, podremos determinar la influencia de las fuentes e historia de las masas de aire que generan precipitación sobre Canarias. Este estudio permitirá establecer patrones de circulación general a partir del análisis isotópico y analizar de esta forma posibles cambios de la dinámica subtropical asociado a los cambios globales que puedan tener lugar en nuestra atmósfera.

## Área de estudio, técnicas y análisis

Las muestras de precipitación han sido recolectadas en una estación experimental situada en el valle de Agüere (El Rayo, 28.5°N, 16°W) a 580 m.s.n.m., en el noreste de Tenerife (figura 1). La abrupta orografía de la isla genera grandes irregularidades espaciales en cuanto a los valores registrados de las variables meteorológicas, ocasionando una gran variedad de microclimas. El valle de Agüere está abierto a la influencia de las perturbaciones de procedencia NW y SE, si bien el macizo de Anaga (con alturas superiores a los 1000 m.) que lo limita al noreste, impide que reciba la influencia directa del alisio, generando éste un flujo del NW paralelo al eje valle. Además de estas características superficiales, el valle presenta una estructura subterránea que hace

que el nivel freático esté muy cerca de la superficie, con lo que una de las características más destacadas del clima del valle son sus altos valores de humedad relativa y unas oscilaciones térmicas anuales grandes.



**Fig. 1.** Mapa de situación de Canarias y de la estación de medida en la isla de Tenerife.

Las muestras de precipitación en la estación se recogen en intervalos de tiempo correspondientes a la duración de la perturbación que genera lluvia, pudiendo registrarse eventos de uno o varios días. Estas muestras son enviadas posteriormente al laboratorio de hidrología isotópica de la Organización Internacional de la Energía Atómica (OIEA) en Viena para su análisis.

### Resultados y discusión

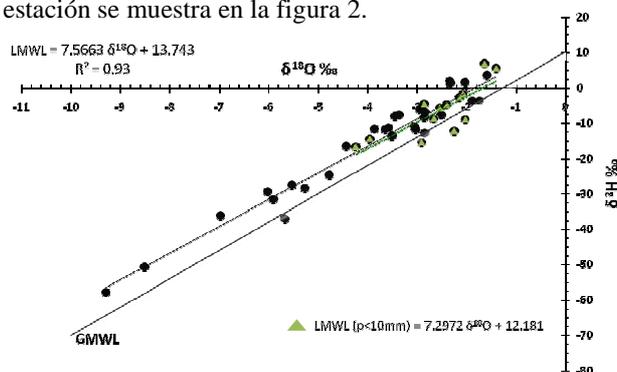
La concentración de isótopos estables en la lluvia está controlada por diversos factores entre los que se encuentran la temperatura de formación del vapor de agua que origina las nubes, la topografía o altura sobre el nivel del mar, la latitud, la continentalidad (transporte de las masas húmedas desde el mar hacia el continente), la época del año y la cantidad de precipitación.

#### Línea Meteórica Local

Se ha observado que las variaciones isotópicas en la precipitación están generalmente caracterizadas por una fuerte correlación lineal entre  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ , directamente relacionadas con condiciones de equilibrio isotópico que se representan mediante la denominada Línea Meteórica Mundial (LMM;

Craig, 1961) cuya ecuación es  $\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O}+10$ . Esta relación es un promedio a escala global, por lo que las relaciones isotópicas a escala regional o local, la denominada Línea Meteórica Local (LML), difiere generalmente respecto de la LMM, consecuencia de de las condiciones de la fuente de vapor de agua en cada región.

La relación entre  $\delta\text{D}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  encontrada para la estación se muestra en la figura 2.



**Fig. 2.** Relación  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$  con representación de la línea de regresión y ecuación. Se superponen además los puntos y ajuste para eventos de precipitación menores de 10 mm.

Se puede observar que la pendiente de la LML es ligeramente inferior a 8, indicando quizás la presencia de fraccionamiento cinético poco representativo. Se ha representado y ajustado sólo aquellos eventos en los que la precipitación fue menor de 10 mm y no se obtuvieron cambios significativos en la pendiente. En general los datos se ajustan bien a los encontrados en estudios anteriores realizados en la zona de Canarias (Custodio et. al, 1987). Los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  para los eventos de precipitación ocurridos en el periodo de estudio oscilaron en el rango entre  $-1.4\text{‰}$  y  $-9.3\text{‰}$  y los de  $\delta\text{D}$  entre  $6.8\text{‰}$  y  $-57.8\text{‰}$ . Los valores medios de estos parámetros ponderados con la precipitación son de  $-5.1\text{‰}$  para el  $\delta^{18}\text{O}$ , de  $-26.3\text{‰}$  para el  $\delta\text{D}$  y de  $14.7\text{‰}$  para el exceso de deuterio. Estos resultados difieren ligeramente de los encontrados en otras estaciones en Tenerife situadas a nivel del mar (Díaz-Teijeiro, 2009) y representativas de la vertiente sur de la isla. Sin embargo están en buena concordancia con otras realizadas en Tenerife a alturas superiores (Jiménez-Martínez et al., 2008) que encuentran valores similares para el exceso de deuterio y que atribuyen a la sequedad ambiental a pesar de tratarse del Océano Atlántico.

#### Relación con la cantidad de precipitación

La relación aparente entre la cantidad de precipitación y la composición isotópica fue detectada originariamente por Dansgaard en 1964, observando una anticorrelación entre ambos parámetros. Algunos estudios realizados en Canarias sobre el contenido isotópico de aguas meteóricas (Gasparini,

1989. Herrera Lameli, Christian, 2001), encuentran que al aumentar la cantidad de precipitación, el valor isotópico  $\delta^{18}\text{O}$  se sitúa en torno al  $-4\text{‰}$ . En nuestro caso, tal como puede verse en la figura 3, se observa la anticorrelación antes comentada, pero existe una gran variabilidad en el contenido isotópico para valores de precipitación por encima de 20 mm, obteniéndose para valores superiores a los 50 mm tanto valores de  $\delta^{18}\text{O}$  muy negativos como positivos.

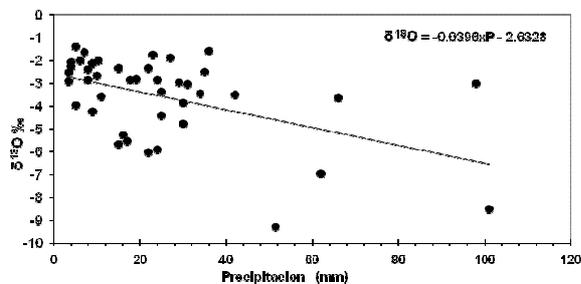


Fig. 3. Dependencia del contenido isotópico con la cantidad de precipitación.

Estos valores extremos, al tratarse de episodios de precipitación concretos, podrán ser objeto de un análisis más profundo con el fin de determinar las causas que originan las diferencias encontradas (tipos de precipitación, condiciones sinópticas, etc.).

#### Contenido isotópico frente a la temperatura

Al igual que se observa una variación del contenido isotópico con la cantidad de precipitación recogida, Dansgaard también encontró que existe una marcada correlación con la temperatura. En nuestro caso, al tratarse de un archipiélago en el que las precipitaciones tienen sólo lugar durante algunos meses correspondientes al otoño e invierno, el rango de temperaturas en que se producen episodios de precipitación es bastante corto. Sin embargo podemos observar una tendencia positiva con una gran variabilidad en el rango entre 15 y 16 grados, temperatura promedio de la estación en la mayoría de los eventos de precipitación registrados.

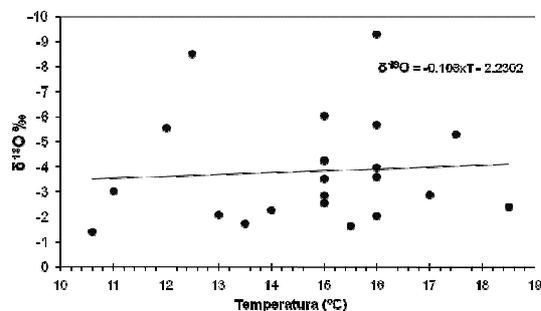


Fig. 4. Contenido isotópico frente a la temperatura.

#### Variaciones con la altura

Los resultados que se muestran en este estudio se centran en los datos obtenidos de una única estación

de medida, si bien dentro de los objetivos del proyecto que financia esta investigación se contempla que a lo largo del desarrollo del mismo se incorporen otras estaciones a diferentes alturas en la isla de Tenerife. Aunque no contamos, por lo tanto, con datos a diferentes alturas que nos permitan estudiar una relación altimétrica, si existen estudios puntuales a diferentes alturas en las Islas Canarias y una estación de medida en Tenerife (36 m s.n.m., AEMET) que opera de forma continua dentro de la red española de medida de isótopos en precipitación (Spanish Network for Isotopes in Precipitation: SNIP). Con respecto a esta última, los análisis realizados para el periodo 2001-2006 para  $\delta^{18}\text{O}$  y de  $\delta^2\text{H}$  dan unos valores promedio pesados por la cantidad de precipitación de  $-2.52\text{‰}$  y  $-13.2\text{‰}$  respectivamente (Araguas L.J., 2009, Teijeiro M.F., 2009), y comparando con los valores obtenidos en la estación de El Rayo (580 m s.n.m;  $\delta^{18}\text{O} = -4.34\text{‰}$  y de  $\delta^2\text{H} = -18.90\text{‰}$ ), obtenemos unos gradientes altitudinales de  $-0.35\text{‰}/100$  para el  $\delta^{18}\text{O}$  y de  $-1.1\text{‰}/100$  para el  $\delta^2\text{H}$ . Estos valores son ligeramente superiores a los encontrados en otros estudios realizados en Canarias que encuentran valores entre  $-0.13\text{‰}/100$  a  $-0.32\text{‰}/100$  (Herrera, 2001) para el  $^{18}\text{O}$ .

#### Estudio detallado de eventos de precipitación

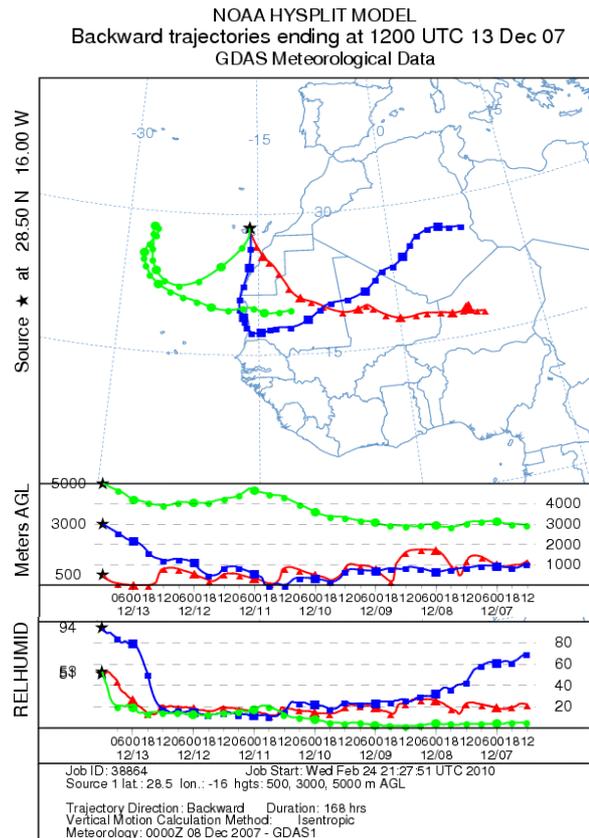
Las variaciones observadas de los isótopos estables del agua en la precipitación no son sólo debidas a factores meteorológicos (temperatura, volumen de la precipitación, humedad relativa, etc.) sino que dependen también de las fuentes de humedad y del recorrido de las masas de aire (Aravena et al., 1999; Liu et al., 2008). Como se ha mencionado con anterioridad, el análisis de eventos de precipitación, a diferencia de los estudios que usan muestras con valores mensuales, nos permitirá estudiar detalladamente cada episodio que genera lluvia y buscar correlaciones entre concentración isotópica, situaciones sinópticas y patrones de circulación, aportando sin duda una importantísima información frente a los cambios que en los mismos se puedan producir. Analizaremos con detalle algunas situaciones encontradas durante el periodo de estudio, correspondientes a episodios que muestran valores atípicos en el contenido isotópico. Para describir las diferentes situaciones sinópticas usaremos mapas de superficie y de altura y analizaremos la procedencia de las masas de aire mediante el cálculo de retro trayectorias isentrópicas a 5 o 7 días con el modelo HYSPLIT4 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), perteneciente al National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA; EE.UU.)

Un 80% de las situaciones sinópticas que generan lluvia en el archipiélago canario están relacionadas con sistemas de bajas presiones superficiales y/o en

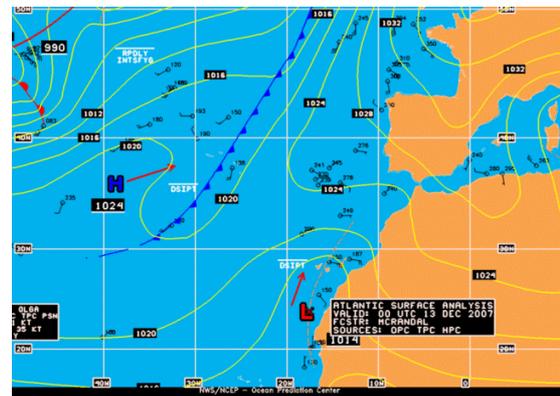
altura, situadas generalmente en el Atlántico norte, sobre Canarias, Mediterráneo y norte de África, que permiten la llegada al archipiélago de aire frío y húmedo procedente de altas latitudes (Font, 1956; García H., et al., 2001; Knippertz, 2003). Sin embargo existe un importante porcentaje de eventos que no responden a estas condiciones, generando episodios que podrían tener sus marcas isotópicas específicas. Analizaremos a continuación algunos de ellos.

**Episodio del 13 de diciembre de 2007.-** Corresponde dicho evento con el episodio de contenido isotópico más bajo registrado en la estación, con valores de  $\delta^{18}\text{O} = -9.29\%$  y de  $\delta\text{D} = -57.85\%$ . La cantidad de precipitación medida en la estación durante el evento fue de 52 mm (en un intervalo de unas 5 horas), con gran variabilidad en cuanto a la cantidad en estaciones cercanas, donde se registraron precipitaciones en forma de granizo y en forma de nieve por encima de los 3000 metros. Además el episodio se registró con importante aparato eléctrico poco frecuente en las islas. La temperatura media para este día fue de unos  $16^\circ\text{C}$ , aunque durante el evento se produjera una importante variación térmica con oscilaciones diarias de hasta  $10^\circ\text{C}$  en algunas estaciones. Esta importante oscilación térmica se explica teniendo en cuenta que en los días anteriores al evento, y hasta unas horas antes del mismo, predominaron las altas temperaturas en todo el archipiélago, consecuencia de una alta presión localizada en el norte de África que produjo una advección de aire africano sobre el archipiélago que dio como resultado un incremento de los niveles de polvo en suspensión y una subida de las temperaturas, registrándose máximas por encima de  $25^\circ\text{C}$  en algunas islas. Esta advección se muestra claramente en las retrotrayectorias isentrópicas calculadas para este día, en las que se observa un flujo sobre Tenerife procedente del norte de África por debajo de los 5000 m.

La situación sinóptica en superficie para las horas anteriores al evento de precipitación muestra una baja de muy poca profundidad y extensión que se mueve paralelamente a la costa occidental africana desde el sur en dirección a Canarias, estando el anticiclón atlántico muy alejado hacia el Oeste. Esta situación corresponde claramente con una depresión sudano-sahariana (Font, 1956) que atravesaría Canarias durante el día 13. Este tipo de perturbaciones, difíciles de identificar en los mapas sinópticos debido a su escasa profundidad (en algunos modelos no se aprecia claramente), se originan en la ZCI (zona de convergencia intertropical), y raramente alcanzan Canarias, aunque a veces sus trayectorias cruzan el archipiélago repercutiendo notablemente en el tiempo atmosférico de las islas.



**Fig. 5.** Retrotrayectorias isentrópicas correspondientes al 13/12/2007 para tres alturas diferentes sobre la isla de Tenerife. Se representa además de las alturas durante el trayecto, la humedad relativa.

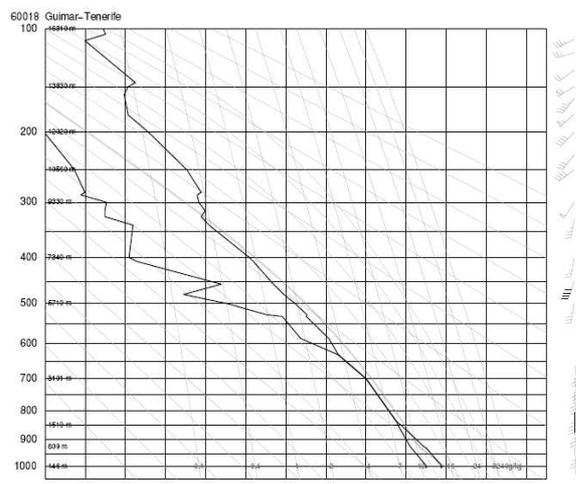


**Fig. 6.** Análisis de superficie correspondientes al 13/12/2007 (Fuente: Oceanic Prediction Center /NOAA).

El sondeo termodinámico de este día (12 horas) muestra en superficie valores altos de temperatura, próximos a los  $20^\circ\text{C}$ , la isocera a unos 3100 metros y  $-15^\circ\text{C}$  a los 5000 m de altura. Podemos observar como desaparece la típica inversión de subsidencia y la formación de un profundo estrato saturado desde los 1500 m de altura hasta los 4000 m aproximadamente, consecuencia del desarrollo de nubes convectivas debidas a la

fuerte inestabilidad vertical, puesta de manifiesto en el perfil vertical de temperatura y en los valores de los índices de inestabilidad ( $Lifted\ (LI)=-2.5$ ), ayudada por la orografía de la isla. Otro hecho apreciable en el perfil vertical es que en el episodio no se observa la formación de la “melting layer”, confirmando la fuerte convección antes señalada.

El análisis anterior revela que en este evento de precipitación la masa de aire africano, con humedades relativas muy bajas (tal como puede verse en la figura 5), caliente y pobre en isótopos pesados a tenor de su recorrido sobre el continente, determinó el contenido isotópico registrado durante la irrupción de la baja sudano-sahariana. Sin embargo, la escasa humedad de la masa africana nos hace suponer que sería incapaz de explicar por sí sola los registros de lluvia obtenidos, por lo que su interacción con la masa húmeda sería en definitiva la responsable de los valores observados.

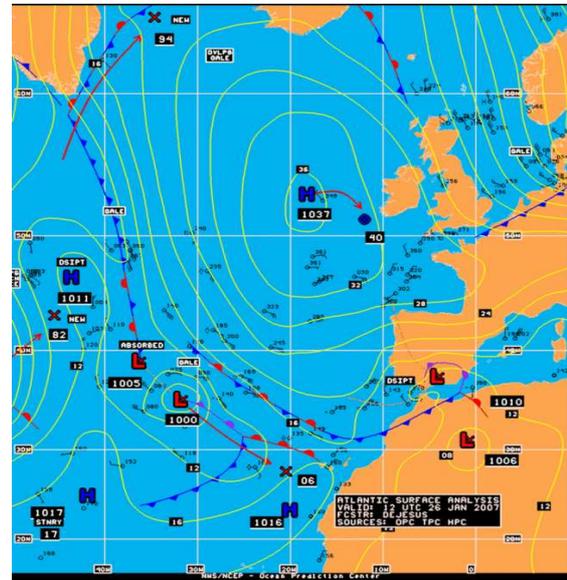


**Fig.7.** Sondeo vertical correspondiente al 13/12/2007 (Fuente: Universidad de Wyoming, USA).

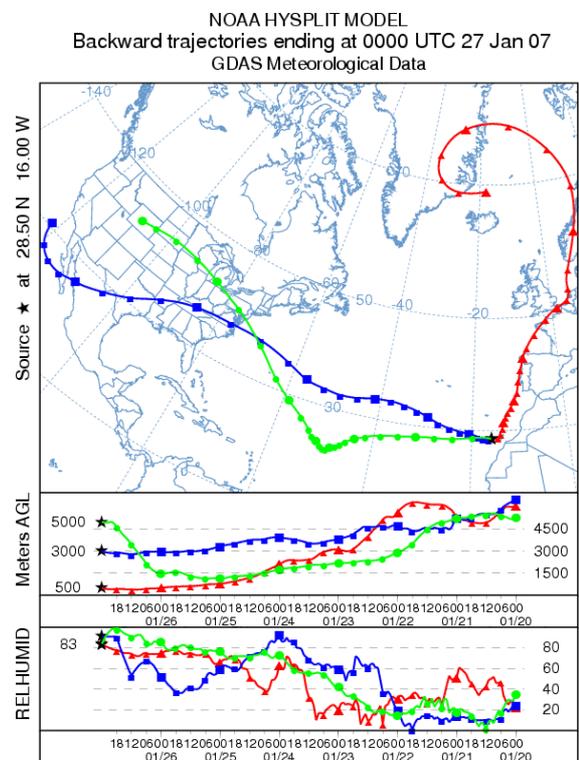
Otros episodios de similares características, donde la perturbación que genera lluvia se encuentra con una masa de aire africano sobre Canarias, da valores bajos en las relaciones isotópicas medidas.

**Episodio del 26-28 de Enero de 2007.-** Durante este evento se midieron valores de  $-50.63\%$  para  $\delta D$  y de  $-8.52\%$  para  $\delta^{18}O$ , también por debajo de la media. Se recogió durante estos días 101 mm de precipitación total en la estación, correspondiéndose con uno de los eventos de precipitación más abundantes registrados en el periodo de estudio. La temperatura media para este día fue de unos  $14^{\circ}C$ . La situación sinóptica muestra la llegada a Canarias desde el NW de una depresión que se mantuvo durante varios días en las proximidades de Canarias, generando registros importante de precipitación en algunas partes de las islas, como en la isla de El Hierro dónde se recogieron valores de 500 mm en 36

horas. Los análisis de retro trayectorias confirman la procedencia de la masa de aire, la cual muestra a partir de la mitad de su recorrido sobre el atlántico norte, valores grandes de humedad relativa. Esto confirmaría que la fuente de humedad procede de altas latitudes sobre el atlántico norte, explicando los valores bajos registrados en el contenido isotópico de la precipitación, a lo que se sumaría el efecto debido a la cantidad.



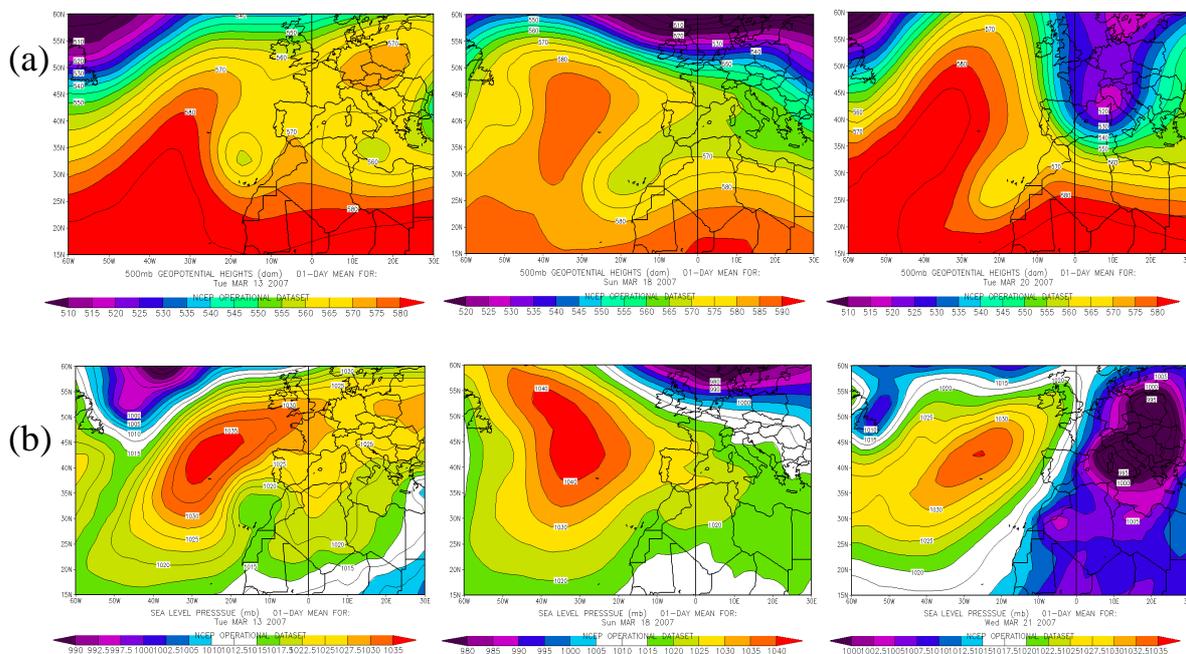
**Fig. 8.** Análisis de superficie correspondientes al 26/01/2007 (Fuente: Oceanic Prediction Center /NOAA).



**Fig. 9.** Retro trayectorias isentrópicas correspondientes al 27/01/2007 para tres alturas diferentes de llegada sobre la isla de Tenerife. Se muestra además las alturas durante el recorrido y la humedad relativa.

Episodio del 14 al 21 de Marzo de 2007.- Este es un episodio en el cual se mantuvo durante un periodo relativamente largo (unos 8 días) una situación sinóptica que produjo lluvias intermitentes y dispersas en el archipiélago. Durante el mismo se recogieron muestras a diferentes intervalos de tiempo, cuya finalidad era analizar la posible evolución temporal del evento. La situación

sinóptica se caracterizó por la formación, durante los primeros días, de una baja en altura sobre el archipiélago con reflejo en superficie, el cual desapareció en los días sucesivos para quedar sólo visible en altura. El análisis de retro trayectorias muestra además que no se produjo cambios significativos en la procedencia de la masa de aire.



**Fig. 10.** Situación sinóptica correspondiente al periodo del 13 al 21 de marzo de 2007. (a) Mapa de 500 hPa. (b) Mapa de superficie.

Durante el evento se registraron valores de  $\delta D$  y de  $\delta^{18}O$  cada vez mayores, dando cuenta de precipitaciones más enriquecidas en isótopos pesados (tabla 1).

Días	$\delta^{18}O$ (‰)	$\delta D$ (‰)
13-14-15	-5.54	-27.53
16-17-18	-3.03	-11.84
19-20-21	-1.04	5.6

**Tabla 1.** Valores de  $\delta^{18}O$  y de  $\delta D$  registrados durante el evento.

La explicación de los registros obtenidos no puede hacerse en principio argumentando el empobrecimiento de la precipitación en isótopos pesados según transcurre el evento. En este caso observamos justo lo contrario, un enriquecimiento en isótopos pesados que se traduce en valores mayores de  $\delta^{18}O$  y  $\delta D$ . Este efecto, al que hemos denominado “efecto de permanencia” puede estar relacionado con la duración de la situación sinóptica que obliga a que la fuente de vapor sea más cercana a medida que transcurre el tiempo, explicando esta

cercanía el hecho de tener mayores valores de las relaciones isotópicas.

### Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado gracias a la financiación de los proyectos de referencia PI042005/034 y SolSubC200801000260 del Gobierno autónomo de Canarias.

### Referencias

- Aravena R, Suzuki O, Pena H, et al. 1999. Isotopic composition and origin of the precipitation in northern Chile. *Applied Geochemistry*, 14(4): 411–422.
- Craig, H., 1961. *Isotopic Variations in Meteoric Waters*. Science. Vol 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. In *Hidrología y Recursos Hidráulicos*, Madrid. XI: 263-280.

- Dansgaard W., 1964. Stable isotopes in precipitation, *Tellus*. Vol.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*. Vol 155: 87-97.
- 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 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 Canaries). *Journal of Hydrology*, 114: 61-91.
- Gonfiantini R., Roche M.A., Olivry J.C., Fontes J.Ch. y G.M., 2001. The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains, *Chemical Geology*, 181, 1147–1167.
- Herrera Lameli, Ch., 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.
- 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.
- Knippertz P. 2004. A simple identification scheme for upper-level troughs and its application to Winter precipitation variability in northwest Africa. Notes and Correspondence. *American Meteorological Society*. 1411-1418.
- Lawrence J.R., Gedzelman S.D., White J.W.C., et al., 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.
- 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.
- 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*, vol.2:49-57.