

## Características termodinámicas de masas de aire a lo largo del valle del Guadalquivir mediante el cálculo de trayectorias

M. A. Hernández-Ceballos<sup>1,2</sup>, J. A. Adame<sup>1</sup>, J. P. Bolívar<sup>2</sup> y B. A. de la Morena<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Área de Investigación Atmosférica e Instrumentación, Estación de Sondeos Atmosféricos “El Arenosillo”. Crta. Huelva-Matalascañas km 34, 21130 Mazagón, Huelva

<sup>2</sup>Universidad de Huelva, Departamento de Física Aplicada, Campus El Carmen, 21007 Huelva

Recibido: 1-VI-2010 – Aceptado: 2-II-2011 – Versión original

Correspondencia a: hernandezma@inta.es

### Resumen

*La presencia del valle del Guadalquivir favorece la canalización de masas de aire desde zonas costeras hacia el interior de Andalucía. Por este motivo, este trabajo presenta una primera aproximación sobre la variación espacial a lo largo del valle del Guadalquivir de alguna de las propiedades termodinámicas representativas de las masas de aire. Con este objetivo se han seleccionado tres emplazamientos representativos de su curso bajo, medio y alto, analizándose en todos ellos las trayectorias diarias y los registros horarios de temperatura potencial, humedad específica y velocidad del viento durante el periodo 2000-2007. El conjunto de trayectorias ha sido calculado utilizando el modelo HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), estableciéndose las 12 UTC como hora de llegada, una duración de 120 horas y una altura final de incidencia de 500 m. El análisis por clusters ha permitido la selección de diez tipos de masas de aire, seleccionándose de este conjunto aquellas con clara procedencia del oeste. El análisis en los tres emplazamientos de los ciclos diarios de temperatura potencial muestran un progresivo enfriamiento durante el periodo frío (noviembre-febrero) del año (3-4 K) y un calentamiento durante el periodo cálido (junio-septiembre) en el rango de 5-6 K entre los extremos del valle. La humedad específica experimenta un descenso, independiente del periodo y tipo de masa de aire, a medida que la masa de aire recorre el valle, siendo más intenso durante el periodo cálido con hasta  $8 \text{ g kg}^{-1}$  por los  $1-2 \text{ g kg}^{-1}$  del periodo frío. Los ciclos de velocidad del viento muestran un progresivo descenso de la misma a lo largo del valle, siendo más acentuada entre el tramo final con una reducción de hasta  $3 \text{ m s}^{-1}$  cada 100 km, registrándose los valores más intensos durante el periodo cálido del año con valores medios de hasta  $4 \text{ m s}^{-1}$ .*

**Palabras clave:** valle del Guadalquivir, masas de aire, HYSPLIT, ciclos diarios

### 1 Introducción

Las propiedades termodinámicas de las masas de aire no son constantes en su desplazamiento sino que pueden verse modificadas dependiendo de las características que posean las zonas por las que transitan, ya sean continentales o marítimas. Esta variación temporal y espacial de sus propiedades termodinámicas afecta a las sustancias que se encuentran en su interior, ya sean gases o partículas (Millán et al., 1997; Evtugina et al., 2006).

Diversos estudios como los Hernández-Ceballos et al. (2010a) y Toledano et al. (2009) han permitido identi-

ficar y caracterizar la llegada de masas de aire sobre Andalucía occidental, región situada al sudoeste de la Península Ibérica. Ésta se encuentra caracterizada por la presencia del valle del Guadalquivir actuando como canal natural de transporte de masas de aire desde la costa atlántica hacia el interior de la región. Además, destaca la presencia de importantes fuentes de emisión de sustancias, tanto de origen natural (Parque Nacional de Doñana, Sierra Norte de Sevilla, Valle de los Pedroches) como antropogénico (polo industrial de Huelva, las ciudades de Sevilla o Córdoba), lo que unido al efecto canalizador del valle hacen posible que estas sustancias puedan ser



transportadas desde sus focos de emisión hacia zonas del interior.

En los últimos años se han realizado diversos estudios con el fin de establecer las características de los procesos de contaminación atmosférica, tanto por ozono superficial (Adame et al., 2008; 2010) como por material particulado (Rodríguez et al., 2001; Querol et al., 2002) que se desarrollan en el sudoeste de la Península Ibérica.

Por la importancia que las condiciones meteorológicas tienen sobre los procesos de formación, transporte, transformación y eliminación de los gases o material particulado, el objetivo de este trabajo se ha centrado en la identificación de escenarios sinópticos que presenten situaciones meteorológicas favorables a que se produzca la canalización y desplazamiento de masas de aire a lo largo del valle del Guadalquivir. Con los casos seleccionados se ha estudiado la variación que experimentan los ciclos diarios de la velocidad del viento, temperatura potencial y humedad específica en tres emplazamientos representativos, para así, obtener una aproximación sobre la variación espacial de estas variables a lo largo del valle.

## 2 Área de estudio, emplazamientos de medida y metodología aplicada

El área de estudio es Andalucía occidental, región situada al sudoeste de la Península Ibérica, la cual presenta una topografía caracterizada por la presencia del valle del Guadalquivir actuando como abertura natural al océano Atlántico (Figura 1). Éste posee un área triangular orientada en la dirección SW-NE, delimitada por Sierra Morena al norte y por los sistemas Béticos al sur, que ejercen como eje transversal de la región.

Tres emplazamientos a lo largo del valle del Guadalquivir han sido seleccionados con el fin de: i) disponer de una óptima cobertura espacial del valle, ii) tener representatividad de las tres zonas en las que se divide el mismo (bajo, medio y alto) y iii) disponer de información meteorológica de superficie. Como punto costero ha sido seleccionada la Estación de Sondeos Atmosféricos “El Arenosillo” (37,1°N -6,7°W, 40 metros sobre el nivel del mar (msnm), la ciudad de Córdoba (37,84°N -4,85°W, 91 msnm) situada a 200 km de la costa como representativa de su zona media, y la población de Santa Elena (Jaén) (38,37°N -3,51°W, 750 msnm), localizada en su zona alta, a unos 330 km de la franja costera. En cada uno de ellos la información meteorológica es proporcionada por estaciones automáticas pertenecientes a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) cada 10 minutos.

Cada uno de los emplazamientos presenta una rosa de vientos a lo largo del eje oeste/suroeste-nordeste (Figura 1), representativa de la dinámica de flujos del valle (eje suroeste-nordeste), garantizando de esta forma su localización en el mismo. Durante el periodo frío (noviembre-febrero) predominan los flujos del nordeste con intensidad moderada menor de  $5 \text{ m s}^{-1}$ . En los meses considerados como cálidos

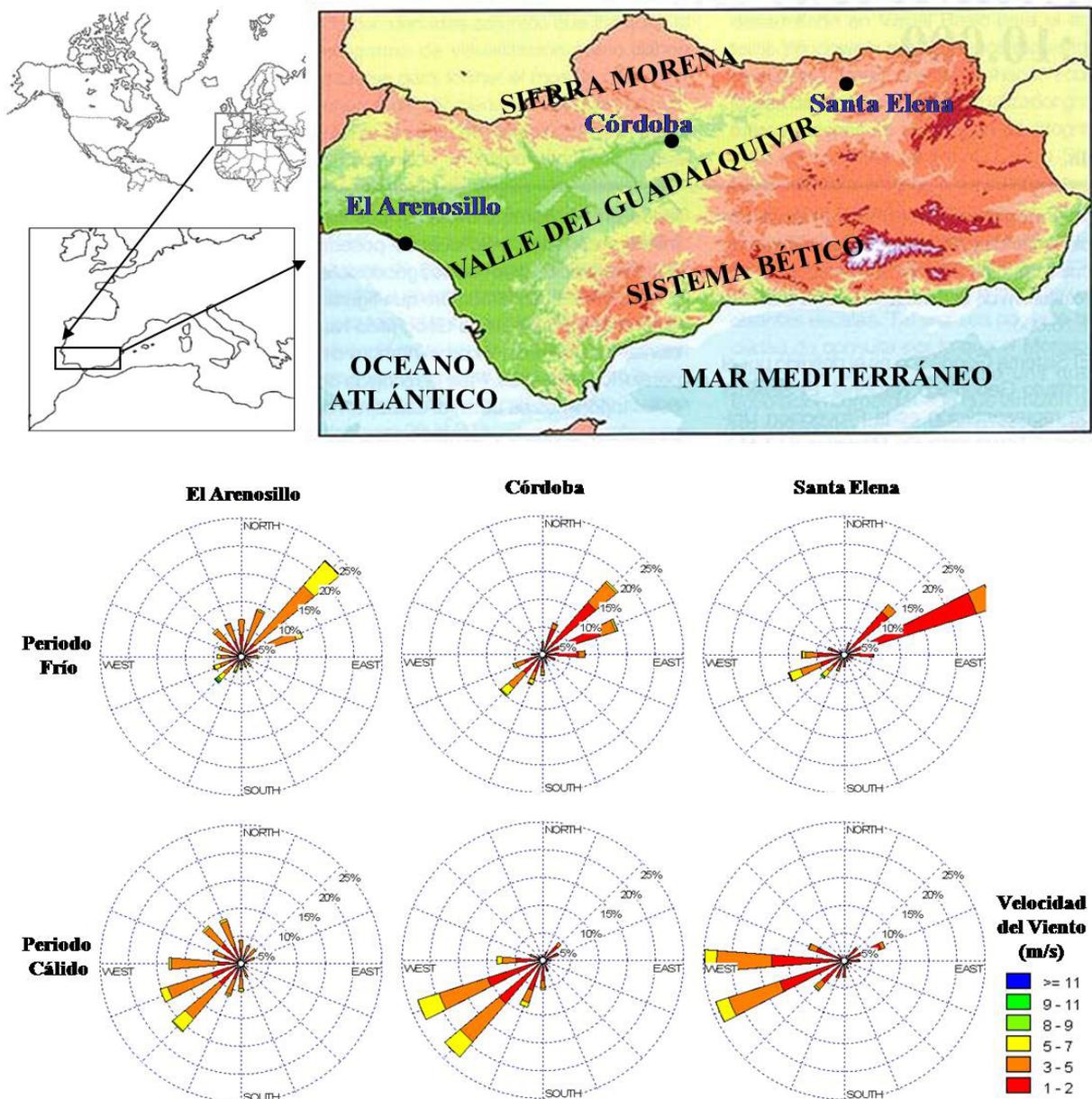
(junio-septiembre) los flujos predominantes son aquellos procedentes del suroeste con intensidad no superior a los  $7 \text{ m s}^{-1}$ .

En cada uno de los emplazamientos se han utilizado los datos de velocidad del viento, humedad, temperatura y presión durante el período 2000-2007. Este periodo ha sido seleccionado al existir una elevada disponibilidad de datos horarios simultáneamente en los tres emplazamientos seleccionados. La comparativa de los valores anuales de temperatura de este periodo con los registros climatológicos anuales proporcionados por la AEMET para el periodo 1971-2000 en las estaciones de Huelva (18,1°C) y Córdoba (17,6°C) permiten catalogar al periodo de estudio como cálido respecto al citado periodo climático.

La elección de la velocidad del viento se justifica por ser un parámetro que ayuda a estimar la capacidad dispersiva y de ventilación que tiene la atmósfera, mientras que la temperatura potencial es una magnitud conservativa para ascensos y descensos adiabáticos que aporta información sobre la intensidad de los procesos adiabáticos, tales como el calentamiento diurno y enfriamiento nocturno en ausencia de nubosidad significativa que pueden transformar las propiedades de la masa de aire, influyendo de esta forma sobre la capacidad de mezclado vertical y de la ocurrencia de transformaciones químicas. Por último, la humedad específica es también una magnitud conservativa que representa la cantidad absoluta de humedad existente en la atmósfera.

El modelo “*Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory*” (HYSPLIT) (Draxler y Hess, 1998; Draxler et al., 2009), desarrollado por la NOAA’s *Air Resources Laboratory* (ARL), es ampliamente utilizado en el cálculo de las trayectorias (Jorba et al., 2004; Shan et al., 2009; Hondura et al., 2010; Davis et al., 2010; Hernández-Ceballos et al., 2010b). Se han utilizado como información de entrada los ficheros meteorológicos FNL (*Final Analysis*) y GDAS (*Global Data Analysis System*), los cuales disponen de información precisa sobre la evolución de la componente vertical del viento. Por este motivo, se han calculado trayectorias cinemáticas (3D) ya que presentan una mayor precisión que el resto de opciones de cálculo que permite el modelo (isobáricas, isentrópicas...) cuando se dispone de esta información para su cálculo (Stohl, 1998).

La obtención de una trayectoria diaria a las 12 UTC ha sido considerada como adecuado ya que el objetivo del trabajo no es el estudio de la variabilidad diaria de las masas de aire a lo largo del valle. La altura final de 500 m ha sido seleccionada con el fin de que su altura de incidencia se encuentre dentro de la capa límite atmosférica (ABL, *Atmospheric Boundary Layer*) (Warneke, 1997), habiendo sido también utilizada como referencia en Toledano et al. (2009) para el análisis de aerosoles sobre El Arenosillo. Por último, el recorrido previo de 120 horas ha sido seleccionado ya que permitirá conocer el desplazamiento de las masas de aire con un origen sinóptico.



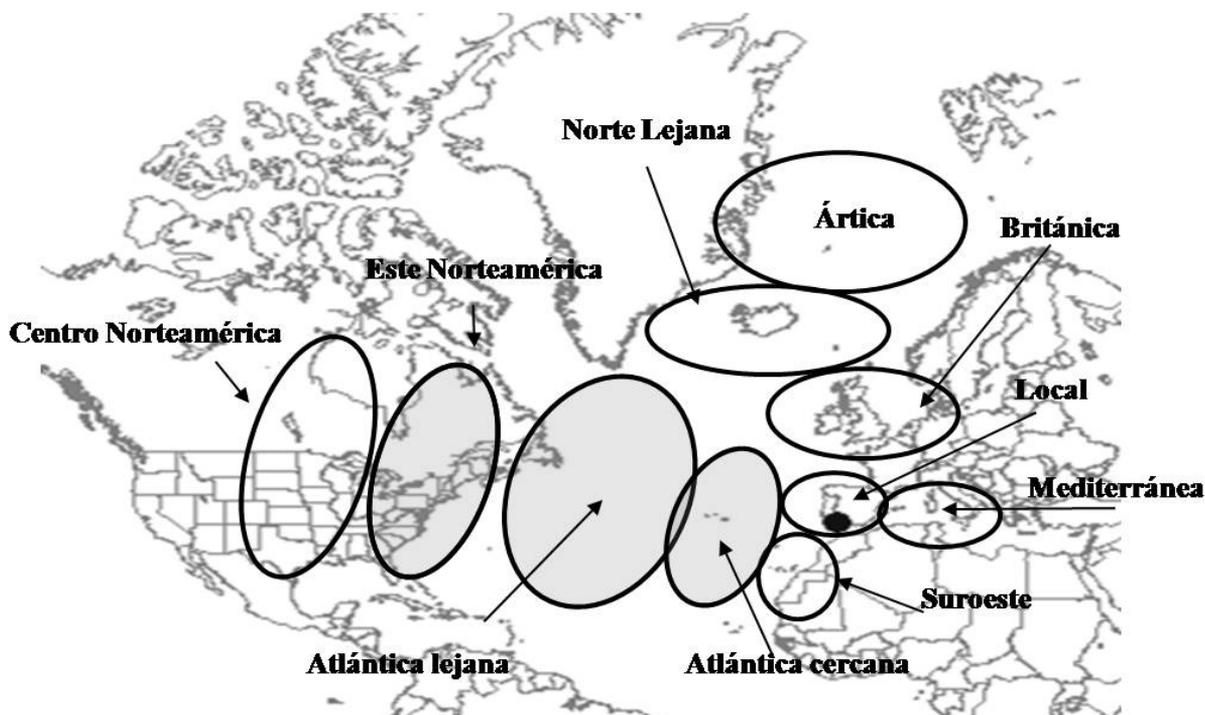
**Figura 1.** Principales elementos topográficos del área de estudio y localización de las estaciones meteorológicas seleccionadas. Rosas de viento en cada uno de los emplazamientos seleccionados correspondientes al periodo frío (noviembre-febrero) y periodo cálido (junio-septiembre) calculados durante el periodo 2000-2007.

Con el objetivo de extraer información de un amplio conjunto de trayectorias individuales, es común la aplicación de técnicas estadísticas que permiten la agrupación de aquellas trayectorias similares en diferentes grupos, denominados clusters. De esta forma, cada cluster está formado por trayectorias que presentan un recorrido similar, representando el centroide o centro de cluster el promedio de todas las trayectorias que están incluidas en dicho cluster.

El modelo HYSPLIT dispone de una herramienta de agrupación basada en las variaciones tanto de la varianza total entre clusters (TSV, *Total Spatial Variance*) como de la

varianza entre cada uno de los elementos que los componen (SPVAR, *Spatial Variance*) (Draxler et al., 2009). El primer índice aporta información sobre el grado de similitud (disimilitud) que existe entre los distintos grupos o clusters que se forman, mientras que el segundo indica el nivel de semejanza (diferencia) interna que existe entre los elementos que forman cada uno de los grupos formados.

El proceso de agrupación se inicia con un número inicial de trayectorias individuales y finaliza con la creación de un único cluster que agrupa a todas ellas, uniéndose en cada una de las etapas aquellos dos elementos que provoquen



**Figura 2.** Localización de las zonas de procedencia de masas de aire a 120 horas de su llegada al golfo de Cádiz a 500 msnm durante el periodo 2000-2007.

el mínimo incremento de los índices TSV y SPVAR. Esta variación porcentual se irá incrementando conforme el número de clusters se vaya reduciendo al tener que unirse cada vez grupos menos similares entre sí.

El modelo HYSPLIT proporciona información sobre la variación porcentual que experimenta el índice TSV en cada etapa del proceso respecto a la anterior, siendo utilizada esta variación en la definición del número de cluster óptimo (Stunder, 1996), que es aquel que representa el número de patrones de circulación que mejor resumen la variabilidad existente dentro de un conjunto inicial de trayectorias. La forma de seleccionar este número óptimo de clusters es fijar una variación porcentual del índice TSV límite, de tal forma que el número óptimo corresponderá a aquella etapa en la que primero se supere este valor umbral. En este trabajo, considerando el conjunto de resultados obtenidos en Stunder (1996) así como los estudios realizados en la zona (Toledano et al., 2009; Hernández-Ceballos et al., 2010a) ha sido impuesto un valor límite del índice TSV del 40% con el objetivo de evitar que la unión de dos clusters muy diferentes entre sí provoque una pérdida de información considerable en el desarrollo del trabajo.

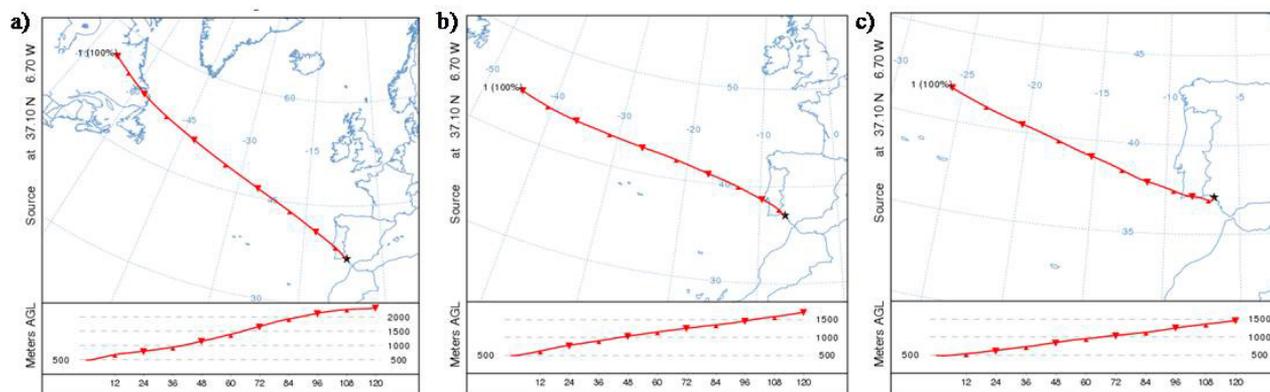
### 3 Resultados

#### 3.1 Masas de aire características del golfo de Cádiz

Durante el periodo de estudio, 2000-2007, se han calculado un total de 2912 trayectorias diarias con punto final en

El Arenosillo (zona costera). Por otro lado, es bien conocido que en esta zona costera en los meses de primavera y verano fundamentalmente, la dinámica atmosférica de la baja atmósfera viene gobernada por circulaciones de mesoescala. En estudios previos (Adame et al., 2010), a partir de los registros horarios de dirección y velocidad del viento registrados en la estación costera de El Arenosillo se han identificado y contabilizado los períodos en los cuales se desarrollan brisas costeras sobre la costa atlántica andaluza. Debido a la resolución espacial de los ficheros meteorológicos de entrada utilizados (190 km y 111 km), el modelo HYSPLIT no puede reproducir estas situaciones de mesoescala. Por este motivo y con el fin de evitar una distorsión de los resultados obtenidos, se ha procedido a la eliminación de aquellas trayectorias pertenecientes a períodos en los que se detectó el establecimiento y desarrollo de circulaciones de brisa sobre la zona de estudio. Aplicando el mismo criterio seguido en Adame et al. (2010), se produce una reducción en el número de trayectorias superior al 20% para cada uno de los años, utilizándose finalmente un total de 2119 trayectorias.

Una vez definido el número inicial de trayectorias, se ha aplicado la técnica cluster anteriormente mencionada sobre cada conjunto anual de ellas. El análisis y comparativa entre los resultados clusters anuales ha permitido la identificación de diez tipos diferentes de masas de aire sobre el Golfo de Cádiz a 500 m durante el periodo 2000-2007 (Figura 2). Cada una de las zonas no se corresponde con regiones fuente de masas de aire, sino que son zonas representativas de la



**Figura 3.** Circulación promedio (centroide) de los tres tipos de masas de aire seleccionadas a) costa este de norteamérica, b) atlántica lejana y c) atlántica cercana.

localización de la masa de aire 120 horas antes de incidir sobre el golfo de Cádiz a 500 m snm, pudiéndose denominar como zonas de procedencia. De entre ellas, las masas de aire locales representan circulaciones que se caracterizan por un recorrido menor a 1200 km. Este conjunto de zonas son acordes con las obtenidas en Hernández-Ceballos et al. (2010a) durante el periodo 1997-2007.

De este conjunto de masas de aire se han seleccionado en este trabajo aquellas que verifiquen: i) circulaciones de origen sinóptico que presenten una homogeneidad en el tipo de área recorrida, es decir, marítimo o continental, ii) procedencia del sector sudoeste-noroeste y iii) que presenten unos porcentajes de ocurrencia durante el periodo 2000-2007 superiores al 10%. De esta forma, se garantiza la utilización de aquellas que no hayan experimentado grandes variaciones en las propiedades termodinámicas, así como que su incidencia sea elevada durante el periodo de estudio.

Aplicándose los criterios mencionados a los diez tipos de masas de aire, sólo tres de ellas los verifican (Figura 2, área gris): circulación del este de Norteamérica (264 días), atlánticas lejanas (501 días) y atlánticas cercanas (446 días). La Figura 3 muestra el desplazamiento horizontal y vertical promedio (centroide) de cada una de ellas.

En general, la llegada de masas de aire con origen en Norteamérica se produce bajo un sistema de bajas presiones centrado en el Atlántico norte, en latitudes similares a las islas Británicas y relativamente cercanas a éstas. Esta configuración isobárica hace que se favorezca el recorrido de masas de aire desde Norteamérica hacia Europa atravesando todo el Atlántico norte. A modo de ejemplo puede observarse en la Figura 4a la trayectoria de la masa de aire para el día 17 de febrero de 2006 junto con el mapa de presiones en superficie.

Las masas de aire atlánticas lejanas y cercanas presentan configuraciones sinópticas muy similares y diferentes a las encontradas para el primer caso expuesto, las norteamericanas. La meteorología sinóptica asociada se caracteriza por la combinación de centros de altas y bajas presiones en el Atlántico, estando condicionado el recorrido de las masas de

aire, y por tanto, la incidencia de una u otra sobre el suroeste de la Península Ibérica, a la posición que estos centros adoptan en el Atlántico, pudiendo discriminarse de esta manera entre las atlánticas lejanas y cercanas. A modo de ejemplo de circulación atlántica cercana, se muestra en la Figura 4b la situación que aconteció el día 10 de Agosto de 2005.

A partir del conjunto de trayectorias obtenidas para los tres tipos de masas de aire seleccionados, se ha aplicado un procedimiento de selección, con el fin de extraer aquellos días en los que simultáneamente se tenga el mismo tipo de masa de aire a lo largo del valle. Con el objetivo de exponer el procedimiento utilizado, se toma como referencia la tipología de atlánticas lejanas. A partir de los días en los que se ha identificado este tipo de circulación sobre El Arenosillo, se calculan las trayectorias para esos mismos días en Córdoba. A las trayectorias de Córdoba se les aplica la técnica cluster. De los clusters obtenidos se selecciona únicamente aquel o aquellos que vengan definidos por circulaciones atlánticas lejanas. De esta manera se tiene un nuevo conjunto de días con la misma tipología de masas de aire en El Arenosillo y Córdoba. En la siguiente fase se calculan las trayectorias en Santa Elena para el último conjunto días mencionado y se vuelve a aplicar la técnica cluster a las trayectorias de Santa Elena. De los centros de los clusters obtenidos, se seleccionaría únicamente el que cumpla el criterio de ser atlántica lejana.

La aplicación de este criterio garantiza que se tenga el mismo tipo de masa de aire de forma simultánea en todo el valle, ahora bien no en todos los casos se debería cumplir que sea la misma masa de aire. De esta forma, la masa de aire que alcanza Santa Elena ha recorrido todo el valle pero no tiene que ser la misma que en ese instante se tenga en El Arenosillo, aunque con este criterio se haya forzado que en todos los emplazamientos se tenga una masa de aire de la misma tipología.

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos después de aplicar este procedimiento a cada una de las tres tipologías de masas de aire. Se observa como la reducción to-

**Tabla 1.** Resultados obtenidos del proceso de reducción del número inicial de jornadas en las que se detecta cada tipo de masa de aire en el Golfo de Cádiz y número total de días por periodo cálido (junio-septiembre) y frío (noviembre-febrero) empleados en los tres emplazamientos seleccionados para el cálculo de las variaciones diarias.

	Norteamericana	Atlántica lejana	Atlántica cercana
Número de días inicial	264	501	446
Número de días final	25	124	66
Reducción (%)	91%	75%	85%
Número de días por periodo definido	- (cálido) 20 días (frío)	23 días (cálido) 53 días (frío)	17 días (cálido) 27 días (frío)

tal en porcentaje es menor en las masas de aire que proceden del Atlántico, con un 75% y un 85% respectivamente para las atlánticas lejanas y cercanas, mientras que es del 91% para las procedentes de Norteamérica. De esta forma, la reducción en la detección de masas de aire similares en el valle del Guadalquivir guardaría relación con el propio desplazamiento previo de las mismas, y por tanto, con las configuraciones sinópticas que originan su llegada sobre el golfo de Cádiz. Aquellas con mayor recorrido, ligadas a grandes flujos del oeste, presentan una mayor dificultad de canalización a lo largo del valle que aquellas originadas en zonas más cercanas.

Así mismo, se ha observado como los tres tipos de masas de aire estudiados no presentan la misma ocurrencia a lo largo del año (Tabla 1) sobre el valle del Guadalquivir. En general se observa un mayor recorrido de masas de aire a lo largo del valle durante el periodo frío que en el cálido. Además, de forma particular, es necesario indicar la ausencia de días en el periodo cálido de aquellas procedentes de la costa este de Norteamérica. Estos resultados podrían ser atribuidos a una mayor homogeneización de las condiciones térmicas del valle durante el periodo frío del año. Por el contrario, durante los meses más cálidos podría existir un mayor desacople en la dinámica superficial entre los distintos tramos del valle.

### 3.2 Evolución diaria de la velocidad del viento, temperatura y humedad específica en el valle del Guadalquivir bajo escenarios sinópticos con flujos del oeste/suroeste

Una vez seleccionados los días en los que se ha observado la misma tipología de masa de aire en los tres tramos del valle se han calculado y analizado las variaciones diarias que experimentan la temperatura potencial, humedad específica y velocidad del viento en cada uno de los tres emplazamientos representativos y en las dos épocas del año (Figura 5) con el objetivo de establecer una primera aproximación a la variación espacial que presenta cada uno de los tipos de masas de aire en el valle del Guadalquivir, ya que para conocer con mayor exactitud las características que presenta esta variación sería necesario ampliar el conjunto de estaciones representativas.

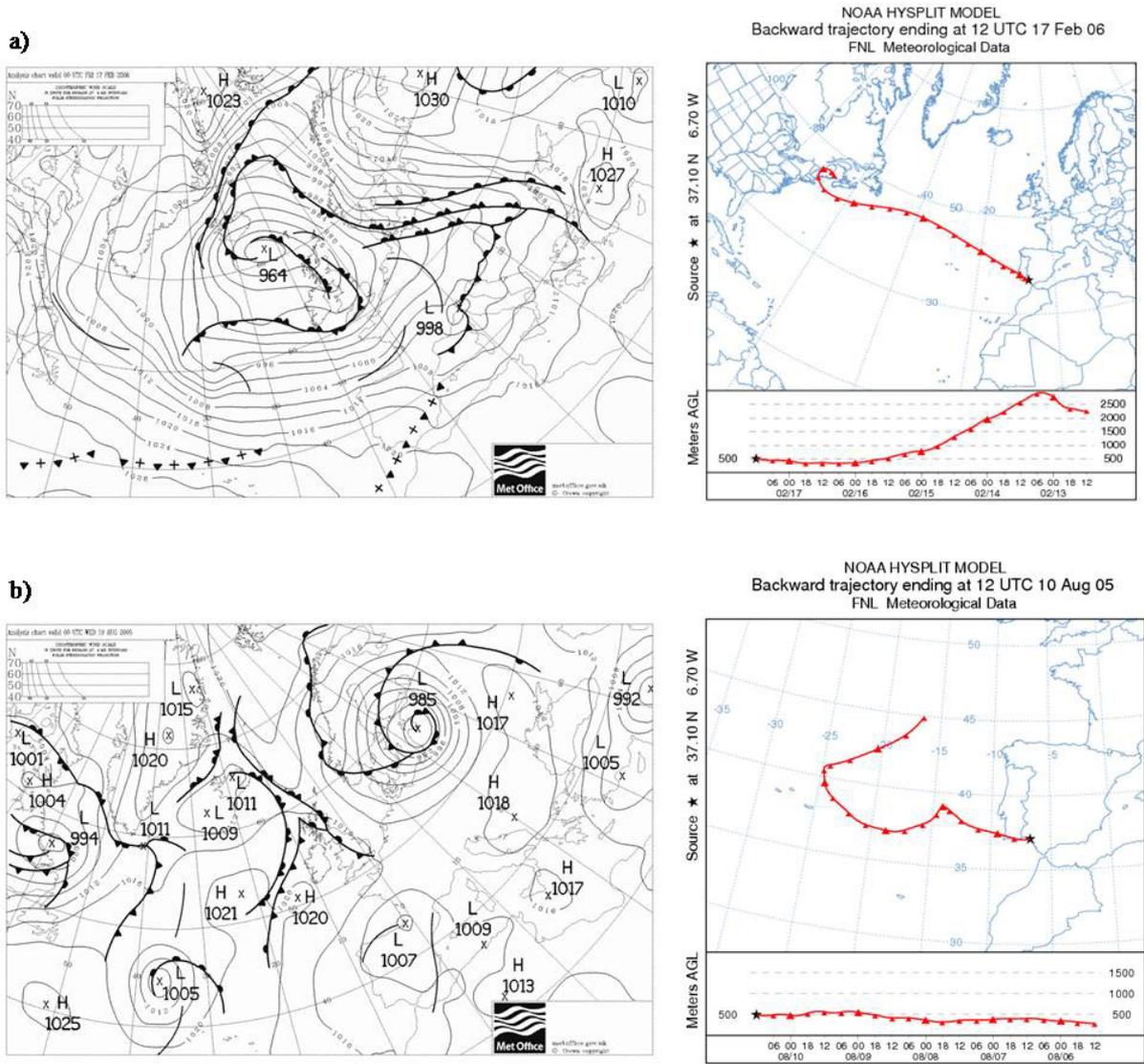
A la hora de interpretar los resultados expuestos en la Figura 5, hay que tener en cuenta que éstos han sido obtenidos a partir del conjunto de días expuestos en la Tabla 1, los cuales son, principalmente, jornadas aisladas y por tanto no consecutivas. Por este motivo, y pese a que los resultados son representativos de jornadas con advección de flujos del suroeste durante el periodo 2000-2007, los ciclos diarios presentan una mínima discontinuidad entre los extremos, registrando además diferentes picos horarios en el caso de la velocidad del viento.

### 3.3 Temperatura potencial

Los ciclos diarios de temperatura potencial muestran la existencia de un ciclo diario bien definido a lo largo del año en cada uno de los tres tramos. En base a estos resultados, durante el periodo cálido, se observa un calentamiento de la masa de aire desde la costa hacia el interior. Sin embargo, esta variación espacial no es continua puesto que se registran valores máximos más elevados en Córdoba que en Santa Elena. Estos resultados podrían estar asociados a la configuración topográfica que presenta la zona de Córdoba, caracterizada por un estrechamiento del valle favoreciendo una mayor probabilidad de estancamiento atmosférico y como consecuencia un mayor calentamiento en los meses cálidos.

Por el contrario, durante el periodo frío, se produce un enfriamiento conforme se amplía la distancia respecto a la costa, registrándose los valores más bajos de temperatura potencial en la estación de Santa Elena. Dentro de este periodo destaca la elevada similitud existente entre los ciclos diarios de El Arenosillo y Córdoba, con diferencias que no superan un grado, pudiendo justificarse este hecho por la mayor homogeneidad térmica que se registra entre estos dos tramos del valle durante este periodo.

La influencia del Atlántico se refleja en los tramos del valle a través de las diferencias que se tienen entre el máximo y el mínimo diario de temperatura. Estas diferencias son menores en la zona costera, estableciéndose entre los 5-10 K, mientras que alcanzan su valor máximo en la zona intermedia con un rango de 5-15 K, asociado a sus condiciones topográficas. En la zona alta estas diferencias son ligeramente inferiores a las intermedias, oscilando entre los 5-13 K. Por tanto, puede indicarse la existencia de una pérdida progresiva de la influencia atlántica conforme se avanza valle adentro y



**Figura 4.** Configuraciones sinópticas (00 UTC) favorables a la incidencia sobre el golfo de Cádiz de a) masas de aire norteamericanas (17/02/2006) y b) atlánticas (10/08/2005).

por tanto, un aumento de la continentalidad, más marcada en la zona intermedia del mismo.

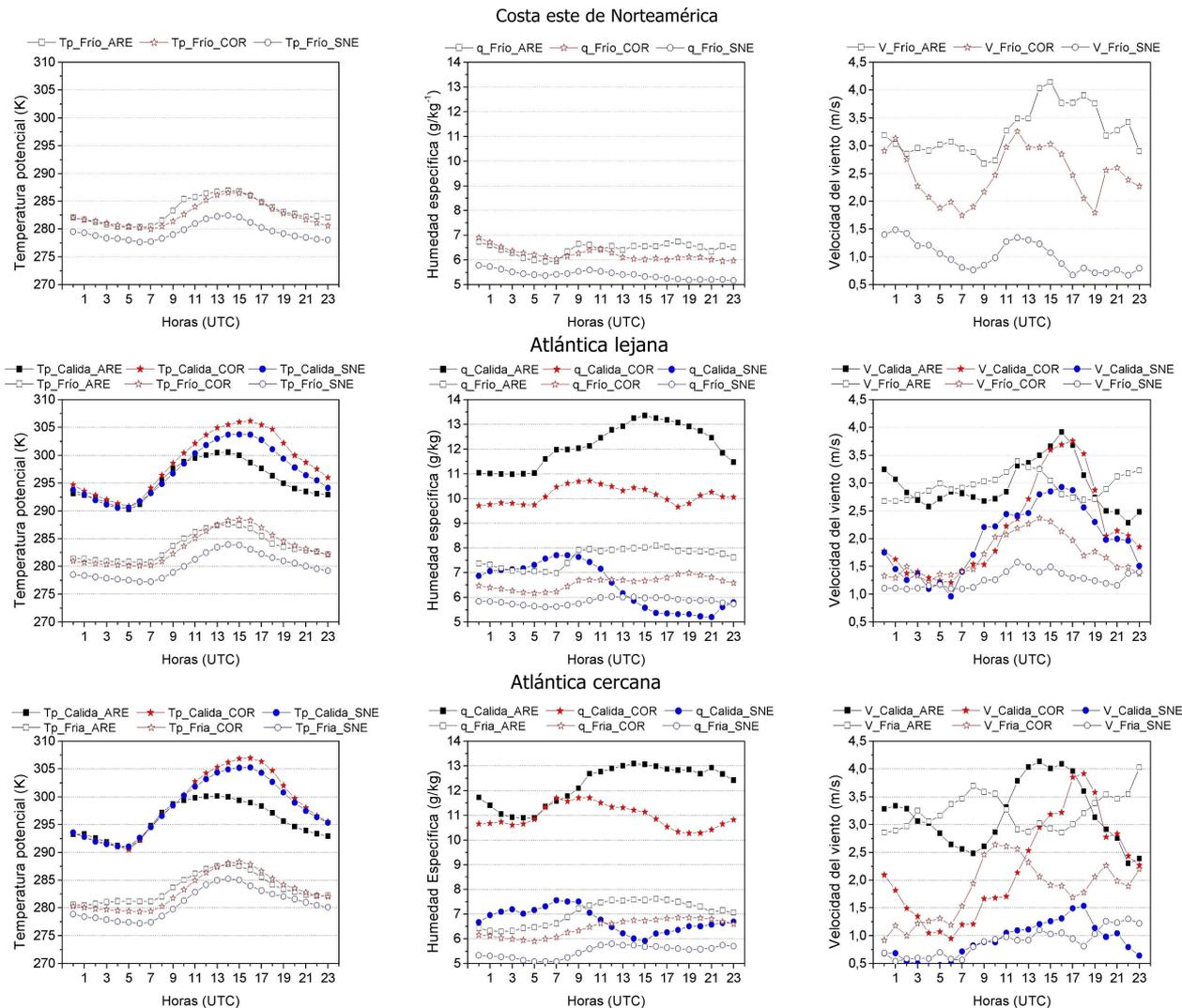
Respecto a la variación espacial que experimentan los valores mínimos de temperatura potencial a lo largo del valle, éstos no superan los 2 K de diferencia en ninguno de los tres tipos de masas de aire, mientras que las diferencias para los valores máximos pueden alcanzar valores de hasta 5 K en masas de aire norteamericanas y de 5-7 K para las circulaciones atlánticas lejanas y cercanas respectivamente.

Por otro lado, los ciclos diarios de temperatura potencial son muy similares en los tres tipos de masas considerados, no encontrándose diferencias apreciables entre ellos. Las diferencias térmicas a lo largo del valle, por tanto, vienen definidas por la época del año y el tramo del valle considerado pero no por el tipo de masa de aire.

### 3.4 Humedad específica

La evolución diaria de la humedad específica muestra distintas variaciones diarias según el período considerado. Esta variación estaría asociada a la propia intensidad de los fenómenos de evaporación o condensación que se registran a lo largo del valle, condicionados por las propias características térmicas, topográficas, de cobertura vegetal o de usos del suelo que presentan los diferentes tramos del mismo, así como por procesos de entrada (*entrainment*) de aire desde niveles altos hacia la ABL.

Durante el periodo frío se observa en todas las estaciones una mayor homogeneidad en los ciclos diarios frente a una mayor variación horaria en el cálido. Mientras que el rango en el periodo frío se establece entre los 5-8 g kg<sup>-1</sup>,



**Figura 5.** Ciclos diarios de temperatura potencial ( $T_p$ ), humedad específica ( $q$ ) y velocidad del viento ( $V$ ) obtenidos para el periodo frío (*Fría*) (noviembre-febrero) y periodo cálido (*Cálida*) (junio-septiembre), en cada uno de los tres emplazamientos, El Arenosillo (*ARE*), Córdoba (*COR*) y Santa Elena (*SNE*) para cada una de los tipos de masas de aire estudiados: costa este de Norteamérica, atlántica lejana y atlántica cercana.

en los meses cálidos alcanza los  $5\text{--}13\ g\ kg^{-1}$ . Esta diferencia entre periodos del año puede estar asociada a la mayor homogeneización de las condiciones meteorológicas a lo largo del valle que se produce en los meses fríos, frente a la mayor variación que se registra durante el periodo cálido.

Pese a esta gran diferencia entre periodos, no se observan grandes diferencias entre los tres tipos de masas de aire, siendo similares entre sí los respectivos ciclos diarios de humedad específica. Únicamente durante el periodo frío del año en la estación de El Arenosillo se observa una diferencia constante de  $1\ g\ kg^{-1}$  entre el tipo norteamericana y las atlánticas, mientras que durante el periodo cálido las mayores diferencias se registran en la estación de Córdoba al presentar la masa de aire atlántica cercana un mayor con-

tenido de vapor de agua, alrededor de  $1\ g\ kg^{-1}$ , respecto a la tipología atlántica lejana.

Independientemente de la tipología y de la época del año considerada se observa una pérdida progresiva de contenido de vapor de agua en las masas de aire hacia el interior del valle. Sin embargo, debido a las condiciones térmicas del valle, esta disminución es mucho mayor durante el periodo cálido, con diferencias de hasta  $8\ g\ kg^{-1}$ , que durante el periodo frío, durante el cual no se registran variaciones superiores a los  $2\ g\ kg^{-1}$  entre los extremos del valle. Desglosando estas diferencias por zonas, se observa como la pérdida de vapor de agua se intensifica entre la zona media (Córdoba) y de cabecera del valle (Santa Elena). Así, durante el periodo cálido ésta se intensifica, estableciéndose entre estas estaciones diferencias de  $5\text{--}7\ g\ kg^{-1}$ , mientras que entre la

**Tabla 2.** Rangos de variación de los gradientes de temperatura potencial ( $\nabla\theta$ ), humedad específica ( $\nabla q$ ) y de velocidad del viento ( $\nabla v$ ) cada 100 km en los tramos del valle del Guadalquivir. Abreviaturas: El Arenosillo (*ARE*), Córdoba (*COR*), Santa Elena (*SNE*).

		Tramo ARE $\rightarrow$ COR	Tramo COR $\rightarrow$ SNE
Periodo Cálido	$\nabla\theta$	+(2,5-3 K)	-(1-2 K)
	$\nabla q$	-(1,5-2 g kg <sup>-1</sup> )	-(5 g kg <sup>-1</sup> )
	$\nabla v$	-(0,5 m s <sup>-1</sup> )	-(3,5 m s <sup>-1</sup> )
Periodo Frío	$\nabla\theta$	-(0,5 K)	-(2-3 K)
	$\nabla q$	-(0,5 g kg <sup>-1</sup> )	-(0,5-1 g kg <sup>-1</sup> )
	$\nabla v$	-(0,5-1 m s <sup>-1</sup> )	-(1-1,5 m s <sup>-1</sup> )

zona costera (El Arenosillo) y Córdoba esta diferencia oscila entre 0-3 g kg<sup>-1</sup>. Esta gran disminución que se registra en el tramo final del valle podría explicarse en el desarrollo de procesos de entrada de flujos de aire desde niveles altos durante la variación diurna de la capa límite.

En el periodo cálido se observa un ciclo diario inverso y una mayor variación horaria entre las estaciones extremas del valle, El Arenosillo y Santa Elena, frente a la menor variabilidad que muestra la estación localizada en la zona intermedia, Córdoba. En esta última, los valores obtenidos presentan una menor oscilación horaria de 1 g kg<sup>-1</sup>, mientras que en la estación de El Arenosillo y Santa Elena las diferencias entre sus valores máximos y mínimos diarios alcanzan los 2-3 g kg<sup>-1</sup>.

### 3.5 Velocidad del viento

El ciclo diario de la velocidad del viento muestra tanto en los meses fríos como en los cálidos e independientemente del tipo de masa de aire, un descenso de la velocidad del viento a medida que se avanza hacia el interior del valle. Así, mientras que en el tramo costero, estación de El Arenosillo, se alcanzan intensidades del viento superiores a los 4 m s<sup>-1</sup>, en el tramo más alejado de la costa, estación de Santa Elena, estas velocidades se mantienen por debajo de los 3 m s<sup>-1</sup>, predominando valores horarios inferiores a los 2 m s<sup>-1</sup>.

Este resultado puede ser entendido como coherente, puesto que debido a los efectos de fricción con la superficie se puede producir una pérdida de energía y por tanto las masas de aire disminuyen su velocidad. Además, también hay que considerar factores como el intercambio de momento con capas superiores y la influencia que ejerce el gradiente de presión imperante en cada una de las zonas, a la hora de poder justificar esta diferencia de velocidades. Esta menor velocidad del viento en la estación de Santa Elena, además, también es observada en las rosas de viento representativas del periodo completo 2000-2007 (Figura 1).

Sin embargo, esta reducción no es constante a lo largo del año, siendo más intensa durante el periodo frío, ni entre los tramos del valle, siendo más acentuada entre el tramo intermedio y final que entre los tramos costero e intermedio. Tomando como referencia los valores máximos de veloci-

dad, las diferencias durante el periodo cálido entre la estación de El Arenosillo y Córdoba son inferiores a 0,5 m s<sup>-1</sup> mientras que entre Córdoba y Santa Elena oscilan entre 1-2,5 m s<sup>-1</sup>. En cambio, durante el periodo frío, las diferencias se incrementan a 1-1,5 m s<sup>-1</sup> entre el primer y segundo tramo, y a 1,5-2,5 m s<sup>-1</sup> entre el segundo y tercer tramo.

Además de los factores comentados anteriormente, una de las posibles causas a la hora de explicar esta elevada disminución de la intensidad del viento entre los tramos intermedio y final podría justificarse en el bloqueo que ejercería el enfriamiento de los flujos que se produciría en la parte alta del valle, e indicaría que la masa de aire, que fluye valle arriba desde el área media, ascendería sobre el aire estancado más frío, que actuaría como cuña. Esta posible explicación, sin embargo, supondría que la masa de aire no sería la misma, y que, por tanto, no existiría circulación valle arriba alcanzando a esta estación, produciéndose de esta forma una situación de bloqueo en la parte alta del valle.

Así mismo, y motivado por la localización de los valores máximos durante el periodo cálido del año, destaca cómo en cada uno de los tramos del valle el rango de velocidades durante el periodo cálido del año es superior al que se registra durante el periodo frío, registrándose los mayores diferencias entre valores mínimos y máximos diarios en la estación de Córdoba, llegándose a alcanzar los 3 m s<sup>-1</sup> durante el periodo cálido frente a los 1,5-2 m s<sup>-1</sup> en el periodo frío. Por el contrario, en las estaciones de El Arenosillo y Santa Elena estas diferencias en cualquiera de los periodos no son superiores a los 2 m s<sup>-1</sup>.

Respecto a las diferencias que se aprecian entre las tipologías de masas de aire destaca como durante el periodo cálido y frío, en la estación de Santa Elena, la masa de aire atlántica lejana registra velocidades mayores, con diferencias máximas de hasta 2 m s<sup>-1</sup>, respecto a la tipología atlántica cercana, la cual muestra intensidades mínimas durante la primera mitad del día. Así mismo, durante el periodo frío, las masas de aire atlánticas presentan intensidades máximas menores a las circulaciones procedentes de Norteamérica tanto en el primer tramo del valle como en el segundo.

### 3.6 Gradientes horizontales

Con el objeto de conocer la variación espacial que experimentan la temperatura potencial, la humedad específica y la velocidad del viento entre los diferentes tramos del valle, se ha calculado el rango de variación de experimentan cada 100 km considerando conjuntamente los tres tipos de masas de aire (Tabla 2). Esta unión de resultados se debe a la escasa diferencia existente entre los resultados obtenidos para cada tipología de masa de aire. Estos gradientes han sido calculados a partir de las diferencias entre los valores máximos diarios que se registran entre cada uno de los emplazamientos para el periodo cálido y frío del año.

De estos resultados puede extraerse cómo es prácticamente generalizada la pérdida progresiva de las propiedades termodinámicas de las masas de aire conforme se avanza valle adentro (gradiente negativo), siendo éstas mayores en el segundo de los tramos, hecho posiblemente asociado a la mayor diferencia entre sus características topográficas, de usos del suelo o cobertura vegetal. Únicamente no se observa esta generalidad en la variación espacial de la temperatura potencial en el primer tramo (+2,5-3 K), pudiendo asociarse a las ya comentadas características topográficas del área en el que se encuentra Córdoba. En el caso concreto de la temperatura potencial las diferencias entre dos estaciones a distintas alturas sólo se pueden asociar a gradientes horizontales si el aire está muy mezclado y esto sólo debe suceder durante el periodo cálido en las horas centrales del día. Si no es así, es muy probable que buena parte se deban a gradientes verticales, que pueden ser muy importantes en casos de inversión térmica.

También se observa una mayor variación de las propiedades termodinámicas durante el periodo cálido que durante el periodo frío, posiblemente asociado a la mayor homogeneidad térmica que gobierna el valle en ese periodo del año. Así, a modo de ejemplo, en el segundo tramo existe una reducción en la humedad específica de  $5 \text{ g kg}^{-1}$  en el periodo cálido mientras que en el frío este descenso oscila entre  $0,5$  y  $1 \text{ g kg}^{-1}$ .

## 4 Conclusiones

En este trabajo se han estudiado las variaciones que experimentan las propiedades termodinámicas de las masas de aire procedentes del oeste a lo largo del valle del Guadalquivir. A partir de un conjunto de trayectorias calculadas mediante el modelo HYSPLIT se han extraído aquellas circulaciones con una clara procedencia del oeste, como son la tipología este de Norteamérica, de la zona más occidental del Atlántico y de un área más próxima a la Península Ibérica. De entre ellas son las atlánticas lejanas (25%) las que presentan una mayor frecuencia de ser detectadas por igual en los diferentes tramos del valle seguidas de las atlánticas cercanas (15%) y norteamericanas (9%).

Cuando se tienen escenarios meteorológicos que favorecen la llegada sobre el valle de los tres tipos de masa con-

siderados, durante los meses de invierno se produce un descenso a lo largo del valle de su temperatura potencial (3-4 K), humedad específica ( $1 \text{ g kg}^{-1}$ ) y velocidad de desplazamiento. Es decir, son más frías, menos húmedas y dispersivas. Por el contrario, en los meses de verano, las masas de aire aumentan su temperatura potencial (5-6 K), y disminuyen su humedad ( $8 \text{ g kg}^{-1}$ ) y velocidad.

Tanto en verano como en invierno, cuando este tipo de masas de aire son detectadas en el valle del Guadalquivir, las sustancias primarias que se encuentren inmersas en ellas tendrán una menor tendencia a la dispersión a medida que se trasladan hacia el interior del valle. Sin embargo, en los meses de verano y mayoritariamente las sustancias secundarias, podrían presentar mayores concentraciones cuando se trasladan hacia el interior, puesto que al aumentar la temperatura y disminuir tanto la humedad específica como la velocidad de las masas de aire que las transportan, se favorecerán las reacciones fotoquímicas y su acumulación en las capas más bajas de la atmósfera.

Por todo ello, los resultados obtenidos en este trabajo tienen como objetivo convertirse en una fuente de información útil que ayude en la interpretación de los problemas atmosféricos y de calidad del aire en esta región. Además, la metodología aplicada puede ser utilizada en otras áreas de características topográficas similares.

**Agradecimientos.** Los autores del trabajo quieren agradecer la ayuda y colaboración prestada por la NOAA, en concreto al *Air Resources Laboratory* (ARL), y muy especialmente al Dr. Ariel Stein. Agradecer así mismo a la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía por el apoyo e interés en los trabajos realizados por este grupo y a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) por la utilización de sus bases de datos.

## Referencias

- Adame, J. A., Lozano, A., Bolívar, J. P., De la Morena, B., Contreas, J., y Godoy, F., 2008: *Behaviour, distribution and variability of surface ozone at an arid region in the South of Iberian Peninsula (Seville, Spain)*, Chemosphere, **70**, 841–849.
- Adame, J. A., Serrano, E., Bolívar, J. P., y De la Morena, B., 2010: *On the tropospheric ozone variations in a coastal area of the southwestern Europe under mesoscale circulation*, J Appl Meteorol Climatol, **49**, 748–759.
- Davis, R., Normile, C., Sitka, L., Hondula, D., Knight, D., Gawtry, S., y Stenger, P., 2010: *A comparison of trajectory and air mass approaches to examine ozone variability*, Atmos Environ, **44**, 64–74.
- Draxler, R. R. y Hess, G. D., 1998: *An overview of the HYSPLIT-4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition*, Australian Meteorology Magazine, **47**, 295–308.
- Draxler, R. R., Stunder, B., Rolph, G., y Taylor, A., 2009: *HYSPLIT-4 User's Guide*, NOAA Air Resources Laboratory.
- Evtuygina, M. G., Nunes, T., Pio, C., y Costa, C. S., 2006: *Photochemical pollution under sea breeze conditions, during summer, at Portuguese West Coast*, Atmos Environ, **40**, 6277–6293.
- Hernández-Ceballos, M. A., Adame, J. A., Bolívar, J. P., y De la Morena, B., 2010a: *The climatology of air masses in southwestern Europe from 1997 to 2007*, Int J Climatol, p. Submitted.

- Hernández-Ceballos, M. A., García-Mozo, H., Adame, J. A., Domínguez-Vilches, E., De la Morena, B., Bolívar, J. P., y Galán, C., 2010b: *Synoptic and meteorological characterization of olive pollen transport in Córdoba province (South-western Spain)*, Int J Biometeorol, pp. doi: 10.1007/s00484-010-0306-4.
- Hondura, D., Sitka, L., Davis, R., Knight, D., Gawtry, S., Deaton, M., Lee, T., Normile, C., y Stenger, P., 2010: *A back-trajectory and air mass climatology for the Northern Shenandoah Valley, USA*, Int J Climatol, **30**, 569–581.
- Jorba, O., Pérez, C., Rocandebosch, F., y Baldasano, J., 2004: *Cluster Analysis of 4-Day Back Trajectories Arriving in the Barcelona Area (Spain) from 1997 to 2002*, J Appl Meteorol, **43**, 887–901.
- Millán, M. M., Salvador, R., Mantilla, E., y Kallos, G., 1997: *Photooxidant dynamics in the Mediterranean basin in summer: Results from European research projects*, J Geophys Res, **102**, 8811–8823.
- Querol, X., Alastuey, A., De la Rosa, J., Sánchez de la Campa, A., Plana, F., y Ruiz, C., 2002: *Source apportionment analysis of atmospheric particulates in an industrialised urban site in southwestern Spain*, Atmos Environ, **36**, 3113–3125.
- Rodríguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Kallos, G., y Kakaliagou, O., 2001: *Saharan dust contributions to PM10 and TSP levels in Southern and Eastern Spain*, Atmos Environ, **35**, 2433–2447.
- Shan, W. P., Yin, Y. Q., Lu, H. X., y Liang, S. X., 2009: *A meteorological analysis of ozone episodes using HYSPLIT model and surface data*, Atmos Res, **93**, 767–776.
- Stohl, A., 1998: *Computation, accuracy and applications of trajectories - A review and bibliography*, Atmos Environ, **32**, 947–966.
- Stunder, B., 1996: *An assessment of the Quality of Forecast Trajectories*, J Appl Meteorol, **35**, 1319–1331.
- Toledano, C., Cachorro, V. E., de Frutos, A. M., Torres, B., Berjon, A., Sorribas, M., y Stone, R. S., 2009: *Airmass classification and Analysis of Aerosols Types at El Arenosillo*, J Appl Meteorol Climatol, **48**, 962–981.
- Warneke, G., 1997: *Meteorologie und Umwelt*, Springer, Berlin.