

8 Conclusiones y recomendaciones

8.1 Situaciones sinópticas que afectan a la Península Ibérica: un enfoque más objetivo

La Península Ibérica y el área geográfica de Catalunya se caracterizan por una compleja orografía y por una localización geográfica que condiciona una gran variedad de situaciones sinópticas que la afectan. El trabajo desarrollado ha puesto de manifiesto como las situaciones sinópticas que afectan a la región de estudio se caracterizan por presentar un desacoplamiento entre la circulación en capas bajas y la troposfera media. Esta característica, junto con un elevado número de episodios definidos por un bajo gradiente bórico en superficie contribuyen a una compleja estructura en los campos de vientos.

La revisión bibliográfica de clasificaciones sinópticas propuestas para la Península Ibérica ha puesto de manifiesto la dificultad que se encuentra al intentar abordar la definición de unos patrones de situaciones típicas que afectan a la zona de estudio. La variedad de clasificaciones, y sus distintos enfoques dificultan la adopción de una propuesta u otra.

Visto que la mayoría de propuestas planteadas hasta el momento presentan un carácter subjetivo elevado se ha considerado interesante la aplicación de una metodología con un enfoque más objetivo para estudiar los distintos patrones de transporte que afectan a la Península Ibérica.

Se ha implementado un algoritmo de cálculo que permite clasificar trayectorias atmosféricas según su dirección y velocidad. Partiendo de una base de datos de 5 años de retro-trayectorias se han cuantificado los patrones de transporte más significativos que afectan a la zona de estudio.

Ésta se ve afectada con un porcentaje elevado de situaciones zonales, sin embargo, el comportamiento meteorológico de la zona difiere de otras regiones por el elevado número de situaciones con bajo gradiente bórico que se observan. Así, durante los períodos estivales se puede afirmar que más de la mitad de situaciones que afectan a la Península Ibérica se caracterizan por presentar un bajo gradiente bórico en superficie. Aunque este comportamiento se conocía conceptualmente, el trabajo desarrollado ha contribuido a cuantificar con un enfoque objetivo los distintos patrones de transporte.

Los resultados del análisis de cúmulos han mostrado una componente zonal marcada en los patrones medios de transporte de largo alcance a Barcelona, con tres grupos distintos de flujos del oeste (rápidos, moderados y lentos) representando el 48% del total de situaciones analizadas a 5500 m, el 38% a 3000 m, y el 23 % a 1500 m. Sin embargo, se ha observado también una elevada ocurrencia de recirculaciones regionales, especialmente en niveles bajos, representando el 45% de las situaciones a 1500 m (wR y eR). Se ha puesto de manifiesto el importante desacoplamiento entre la baja y media troposfera, sobretodo en verano, como una característica particular de la región en comparación con zonas más septentrionales. Combinando los resultados a 5500 m y a 1500 m se han obtenido 20 situaciones distintas. Un 20% de estas situaciones se caracterizan por presentar flujos zonales a 5500 m y a 1500 m. Es relevante la elevada ocurrencia de situaciones con desacoplamiento, y especialmente con bajo gradiente

bárico en 1500 m con una circulación más marcada en altitud (p.e., W-wR, SW-wR, W-eR). El **Capítulo 5** presenta una descripción detallada de cada situación.

Con esta aportación se ha conseguido aplicar una nueva metodología que permite presentar unos resultados más objetivos, y a la vez su carácter numérico permite analizar cuantitativamente las características de las situaciones que afectan a la Península Ibérica.

8.2 Modelo meteorológico mesoscalar: aplicaciones con elevada resolución

Para este trabajo se ha utilizado el modelo numérico de pronóstico meteorológico mesoscalar *5th generation Mesoscale Model* (MM5). Este modelo está considerado un NWP que incorpora los últimos avances en modelización meteorológica mesoscalar. Las tendencias actuales en la modelización meteorológica mesoscalar se dirigen al desarrollo y aplicación de modelos con resoluciones de trabajo más finas. Por ejemplo, el esfuerzo que realizan diversas instituciones norteamericanas para el desarrollo del modelo WRF se encamina al diseño de una herramienta capaz de trabajar con resoluciones de trabajo de hasta 1 km. Los modelos mesoscalares habían sido desarrollados con la finalidad de aplicarlos en la escala de la mesoscala- β . Con el auge de los recursos computacionales la posibilidad de aplicar estos modelos a resoluciones superiores ha conducido a aplicaciones en la mesoscala- γ con resultados satisfactorios.

En el presente tema de Tesis se ha estudiado el comportamiento y la habilidad de MM5 para trabajar con una resolución horizontal de 2 km. Para ello se han realizado distintos estudios de sensibilidad con el modelo MM5. Este modelo dispone de gran número de parametrizaciones físicas y bases de datos para tratar y caracterizar los dominios de estudio con elevado detalle.

Los experimentos científicos con elevada resolución imponen un mejor detalle de las características geomorfológicas del dominio de estudio. Se han realizado distintos trabajos analizando la mejora en la caracterización tanto en los usos del suelo de los dominios de trabajo como en la caracterización de las propiedades geofísicas del suelo. Las modificaciones de estas propiedades han mostrado una influencia en el comportamiento del modelo significativa en la escala local, con modificaciones ligeras de los flujos, variando las direcciones y magnitudes de los mismos. Sin embargo, el comportamiento general del modelo comparándolo con medidas en superficie muestra pocas diferencias con las modificaciones introducidas.

Se ha puesto de manifiesto también la elevada sensibilidad del modelo a la parametrización de la capa fronteriza, y la necesidad de seguir estudiando esquemas que presenten mejores comportamientos en una región tan compleja como la zona de estudio, o mejorar los ya existentes.

En el **Capítulo 6** se presenta la configuración del modelo utilizada, así como los estudios de sensibilidad realizados.

8.3 Simulación de distintas situaciones meteorológicas típicas

Se han simulado siete situaciones meteorológicas típicas afectando a la Península Ibérica. Los días se han escogido representativos de los resultados obtenidos en el estudio de cúmulos (**Capítulo 5**). Así se ha simulado una situación caracterizada por una advección del W en niveles bajos y medios de la troposfera (W-W), una con una advección del NW en niveles bajos (W-NW), una tercera con recirculaciones de masas de aire en la baja troposfera (W-wR). También se han analizado dos situaciones con advección del SW en la troposfera media (SW-wR, SW-eR), una situación caracterizada por un bajo gradiente bórico en toda la troposfera (R-eR) y por último una situación de advección del N (NW-N). La descripción de las situaciones se presenta en el **Capítulo 7**.

Para cada situación se ha extraído un patrón general de las circulaciones que pueden acontecerse en una situación de estas características. Se han detallado las canalizaciones más importantes y las regiones donde se pueden desarrollar distintos fenómenos mesoscalares, ondas de gravedad, forzamientos orográficos o recirculaciones de masas de aire.

Las descripciones de las situaciones se han centrado en los campos de vientos de la Península Ibérica y el área geográfica de Catalunya. La resolución de trabajo para la Península ha sido de 24 km, mientras que el AGC se ha simulado a 2 km.

Se ha realizado un importante esfuerzo de uniformización de la información mostrada a lo largo de las descripciones de las distintas situaciones simuladas. Con ello se ha querido presentar los resultados del modelo del modo más claro y con la mayor capacidad para poder comparar los resultados de las distintas situaciones.

8.3.1 Campo de vientos de la Península Ibérica

La compleja orografía de la Península Ibérica, y su localización marcan significativamente las circulaciones que se presentan en las distintas situaciones meteorológicas analizadas. El cuadrante suroccidental es el que presenta un mayor dominio del flujo sinóptico en niveles bajos. Esto se puede explicar por su orografía menos intrincada, y una posición más cercana a la influencia del anticiclón de las Azores. El cuadrante noroccidental está muy caracterizado por la compleja orografía, aunque los flujos advectivos en niveles bajos no muestran demasiadas perturbaciones. En situaciones de dominio de fenómenos mesoscalares, la mitad occidental de la Península es la que se encuentra más influenciada por la circulación en altitud.

El comportamiento en la mitad oriental ya muestra mayores diferencias. Las cordilleras litorales, y los grandes sistemas orográficos que se localizan en esta región producen modificaciones de los vientos sinópticos en niveles bajos en un grado significativo. En situaciones advectivas de W, NW y N se puede observar el desarrollo de vientos locales en el nordeste (Cierzo y Tramontana). A lo largo del litoral de levante se aprecia el desarrollo de drenajes hacia el mar y la formación de ondas de gravedad en altitud. En el valle del Guadalquivir también se presentan modificaciones del flujo sinóptico importantes. Las situaciones con bajo gradiente bórico y una fuerte insolación se

caracterizan por el desarrollo de brisas de mar en la costa de levante y desarrollo de vientos de montaña en los distintos sistemas orográficos.

La descripción de la evolución de la TKE ha permitido poner de manifiesto el distinto comportamiento en función de la situación sinóptica que afecta a la región. En situaciones con forzamiento sinóptico marcado se observa la formación de TKE de origen mecánico durante todo el día, con niveles similares. Las regiones más accidentadas y expuestas a circulaciones de flujos intensos son donde se observan valores de TKE más elevados. El desarrollo de vientos locales también contribuye a la formación de TKE por la cizalla vertical del mismo. Por otro lado, las situaciones con dominio de fenómenos mesoscalares se caracterizan por presentar niveles de TKE muy débiles o nulos durante la noche, debido a la fuerte estabilidad nocturna, y a una producción de TKE de origen térmico durante las horas diurnas atribuible a la formación de *thermals*. El fuerte calentamiento superficial puede inducir incluso el desarrollo de fenómenos mesoscalares de elevada extensión como puede ser la BTI.

8.3.2 Campo de vientos del área geográfica de Catalunya con elevada resolución

El dominio del AGC se ha simulado con elevada resolución horizontal con un paso de malla de 2 km. Los resultados obtenidos del modelo han puesto de manifiesto la capacidad del mismo para trabajar con elevada resolución. El detalle que se consigue permite analizar las posibles circulaciones que se pueden producir en la región de estudio.

La descripción de los resultados ha puesto de manifiesto las complejas circulaciones que se producen en el AGC. La compleja conformación orográfica de la zona de estudio contribuye a una modificación de los flujos superficiales significativa, y que presentan un desacoplamiento con el régimen sinóptico también importante.

Las diferentes situaciones permiten identificar distintas regiones con comportamientos particulares de los vientos, influidas en algunos casos por el desarrollo de vientos regionales, y en otros por el efecto de su localización respecto a los grandes accidentes geográficos de la zona. Así, las tierras alrededor del curso del río Ebro se caracterizan por una fuerte influencia de las circulaciones que se desarrollan siguiendo el mismo curso del río. Sin embargo, en situaciones de estancamiento, se producen regímenes de calmas en las hondonadas y a lo largo del valle.

La conformación del AGC siguiendo una estructura de abanico con los Pirineos, Depresión Central, y valle del Ebro-Sistema Ibérico condiciona los flujos que se observan en la Depresión Central, en su mitad occidental. En situaciones caracterizadas por el desarrollo de fenómenos mesoscalares esta región presenta unos vientos superficiales siguiendo un régimen térmico reforzado por las circulaciones térmicas de las primeras montañas pirenaicas y por la penetración de la brisa de mar que va coalesciendo con las celdas térmicas que se producen en las cordilleras prelitorales. En situaciones invernales esta región se caracteriza por las fuertes inversiones térmicas que se mantienen durante todo el día, produciendo un desacoplamiento de los vientos superficiales del flujo en altitud muy marcado.

La mitad oriental de la Depresión Central, constituida por el Pla de Bages y la Plana de Vic presentan circulaciones más marcadas por la propia orografía de ambas llanuras. La primera al ser más abierta y extensa se ve más influida por los flujos sinópticos, sin embargo, la segunda queda más resguardada de los mismos por el efecto de sombra aerológica que ejercen los Pirineos sobre esta zona. De las rosas de vientos analizadas en el **Capítulo 2** se ve como las calmas pueden representar hasta un 40%. Esto se ha podido explicar por la localización de la Plana de Vic. Las situaciones con componente zonal en altitud acostumbran a inducir unos flujos muy débiles en esta región debido a la convergencia de los flujos que se dividen al encontrarse con los Pirineos y el efecto de abrigo aerológico que ejercen éstos sobre la llanura. La orografía de la Plana de Vic también contribuye a los débiles vientos, al ser una zona en forma de cubeta donde las zonas del llano quedan muy protegidas de los flujos sinópticos dominantes por las cordilleras que la envuelven.

Por otro lado, los Pirineos representan el accidente geográfico más importante del AGC. Los flujos que se desarrollan en ellos se caracterizan por presentar una estructura vertical muy compleja, con la formación de ondas de gravedad internas. Las situaciones de verano muestran como en la alta montaña los vientos presentan un régimen inducido por los forzamientos térmicos, con desarrollo de vientos de ladera y de valle. En situaciones con un dominio de la circulación sinóptica los flujos son más complejos y presentan distintos forzamientos en función del gradiente de presión de la situación, la velocidad del flujo sinóptico y su dirección respecto a los valles y montañas del macizo.

El litoral presenta por su parte un comportamiento particular, distinguiéndose entre el litoral sur, central y el litoral norte. El litoral sur, al no tener cordillera litoral, presenta unos flujos muy influidos por la circulación marítima dominante, y por los flujos que puedan circular desde el interior del AGC hacia la costa. Esta región se encuentra muy influenciada por las situaciones con desarrollo del Cierzo o Mestral, viento regional de NW.

Por su parte, el litoral central viene caracterizado por su orografía más accidentada con la cordillera litoral, la Depresión Prelitoral y la cordillera prelitoral. A parte, juegan un papel importante las distintas canalizaciones naturales que se producen siguiendo los valles de los ríos que desembocan en esta zona.

El litoral norte está más influenciado por el desarrollo de la Tramontana, viento regional de componente N. Los vientos que vehiculan por la canalización de los Pirineos-Macizo Central afectan en un grado significativo a la circulación marítima delante la costa del litoral norte. En la llanura del interior de esta subregión, la orografía particular, con cordilleras montañosas al oeste y norte contribuyen a situaciones donde los flujos se presentan debilitados, y en el caso del desarrollo de la Tramontana, la componente N se impone por toda la zona al superar las cordilleras septentrionales. En estas situaciones se han observado el desarrollo de ondas de gravedad en las cordilleras que obstaculizan el avance de la Tramontana.

El análisis estadístico de los resultados del modelo ha puesto de manifiesto como el comportamiento del mismo se mantiene estable al aumentar la resolución, sin observarse desviaciones en los resultados simulados, acordes con los dominios externos. Se puede afirmar que el modelo presenta un comportamiento correcto al aumentar la resolución de trabajo. Se debe, sin embargo, analizar con detenimiento las estructuras

verticales que se modelan con estas elevadas resoluciones, que pueden resultar excesivamente intensas. La dificultad de validar estas estructuras ha obligado a dejarlo pendiente. Teniendo en cuenta la mayor cantidad de información aportada por las simulaciones a alta resolución, y su comportamiento satisfactorio, se considera de gran interés para aplicaciones con necesidad de información muy detallada de los vientos de una región.

8.4 Recomendaciones y propuestas de continuidad

Son varios los aspectos en los que sería recomendable seguir profundizando en su conocimiento. El tema de estudio es extenso y complejo y la imposibilidad de abarcar todos los aspectos con el grado de detalle deseado ha inducido a tener que acotar el desarrollo del trabajo. Por esto, se considera interesante realizar una serie de recomendaciones y propuestas de continuidad del mismo para mejorar y reforzar el conocimiento adquirido.

La Península Ibérica está caracterizada por una complejidad de situaciones sinópticas que dificulta la obtención de una clasificación de los distintos tipos unificada. Se han encontrado un gran número de propuestas en la bibliografía consultada. Por ello se ha desarrollado una aportación con una metodología más objetiva. Es recomendable seguir trabajando con la metodología de clasificación de las trayectorias aplicada, haciendo énfasis por una parte en la metodología de clasificación utilizada y por otra en las características de las trayectorias utilizadas.

Referente al algoritmo de clasificación es interesante estudiar ligeras modificaciones en la metodología de cálculo de la distancia entre trayectorias, y analizar la influencia de asignar mayor peso al destino de la trayectoria, potenciando la agrupación de trayectorias con una llegada similar. Es recomendable realizar algunos estudios sobre los resultados obtenidos si en vez de trabajar con trayectorias de un solo nivel se trabaja con variables que se constituyan como agrupaciones de trayectorias a distintos niveles, o trabajar con varias trayectorias con destinos distintos. Esto es, una con llegada en el litoral oeste de la Península, otra en el este, sur y norte. Esta aproximación puede conducir a una clasificación más similar a las clasificaciones sinópticas encontradas en la bibliografía consultada.

Referente a las características de las trayectorias se puede incidir en los datos a partir de los cuales se calculan, analizando bases de datos con mayor resolución temporal y espacial, y con un período de información más extenso. También es interesante analizar trayectorias con una longitud menor, de menos días, para poder estudiar determinados grupos como pueden ser las recirculaciones tan características de la región de trabajo. Para ello, sería recomendable también aumentar la resolución temporal de la trayectoria de 6 horas a 3 horas o menos si los datos de base lo permiten.

Por otro lado, las simulaciones con elevada resolución han puesto de manifiesto la capacidad del modelo mesoscalar para describir los fenómenos en una región de estudio tan compleja como es el AGC. Precisamente, esta complejidad orográfica dificulta el análisis en detalle de los distintos fenómenos que se desarrollan en esta región. El enfoque planteado en las descripciones no ha permitido entrar en los detalles de los distintos fenómenos, y por eso sería interesante analizar episodios concretos donde se

pueda estudiar con detenimiento y profundidad el desarrollo de dichos fenómenos. Por ejemplo, el estudio de las recirculaciones que se observan en el litoral del AGC, el desarrollo de ondas de montaña en distintas cordilleras del territorio, la simulación de roturas de las ondas y saltos hidráulicos, el desarrollo de vientos de montaña, o las canalizaciones en los valles. Estos fenómenos requieren un análisis detallado con un mayor número de medidas para poder validar su modelización.

A parte del estudio detallado de los distintos fenómenos que se han observado en las situaciones simuladas sería interesante seguir analizando otras situaciones sinópticas con características diferentes a las simuladas en el presente trabajo. Esto y la posibilidad de estudiar la repercusión de las condiciones meteorológicas asociadas a estas situaciones sobre la calidad del aire del AGC abren un amplio abanico de trabajos a desarrollar. Se ha visto que tanto las situaciones de verano con elevada insolación y desarrollo de fenómenos mesoscalares con elevada subsidencia, como las situaciones invernales con subsidencia generalizada pueden estar claramente asociadas con una degradación de la calidad del aire. Es de elevado interés también profundizar en aquellas situaciones caracterizadas por un transporte de masas de aire de largo recorrido que puedan advectar contaminantes naturales o antropogénicos de otras regiones a la región de estudio. Situaciones con intrusión de polvo sahariano o transporte de contaminantes del continente europeo hacia la Península.

Entrando en las características del propio modelo, sería recomendable profundizar en el estudio de la parametrización de la capa fronteriza para una región tan variada y compleja como es el AGC. Se ha visto que el modelo es muy sensible a esta parametrización. Actualmente se están desarrollando nuevas mejoras en parametrizaciones existentes que sería importante analizar para ver si presentan un impacto positivo en los resultados. La evolución de la capa fronteriza en las zonas costeras se debe seguir investigando con detenimiento para mejorar el comportamiento del modelo en regiones como puede ser el área de Barcelona.

La necesidad de trabajar con elevada resolución para estudiar los fenómenos que se acontecen en una región de complejidad elevada como el AGC impone un esfuerzo en afinar la caracterización del dominio de trabajo en lo que se refiere a topografía y propiedades físicas del suelo. Los resultados de los estudios de sensibilidad presentados han puesto de manifiesto la influencia de la caracterización del suelo en las simulaciones con elevada resolución. En el contexto de interacción entre la comunidad científica que estudia la obtención de las propiedades del suelo a partir de imágenes de satélite y la comunidad de modelización numérica, se debe seguir profundizando en la investigación de la influencia de una mejor caracterización del suelo en los modelos mesoscalares, y la mejor introducción de la información proporcionada por los satélites en estos modelos.

