

VIENTOS FUERTES DESCENDENTES DEL SUR EN SIERRA NEVADA CON REGIMEN DE LEVANTE (EFECTOS SOBRE LA ESTACIÓN DE ESQUÍ)

Fausto Polvorinos Pascual

CM de Málaga. Delegación de AEMET en Andalucía, Ceuta y Melilla. C/ Demóstenes nº 4, 29010 MÁLAGA. faustop@inm.es.

1. Introducción

La mayor parte de Sierra Nevada suele permanecer por encima del viento de levante que sopla en capas bajas, generalmente hay una inversión por debajo de 850 hPa, casi siempre por debajo de 700 hPa (figura 1). Suelen ser días con cielos despejados y vientos flojos a moderados: muy buenos para disfrutar de las actividades deportivas de alta montaña. Pero en ocasiones se observan en la Estación de Esquí episodios de vientos del sur descendentes fuertes y muy fuertes con flujo débil observado, y previsto por los modelos, al aire libre a la altitud de las dorsales de Sierra Nevada. A veces los vientos en Sierra Nevada son más fuertes que en cualquier otro nivel de la troposfera.

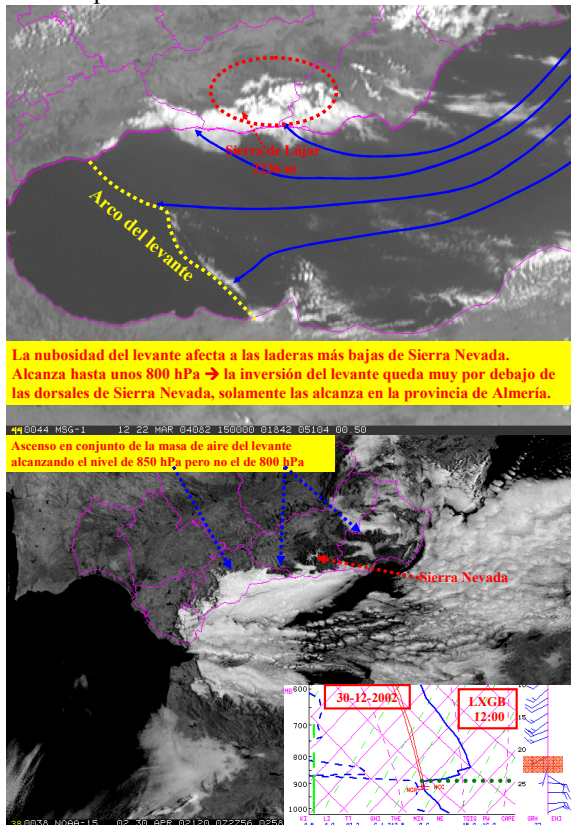


Figura 1. La estructura dendrítica de la nubosidad delata la condensación por ascenso en las laderas sur más bajas de Sierra Nevada, pero las dorsales permanecen por encima de la inversión del levante.

En la figura 1 podemos ver dos imágenes de satélite muy típicas de los regimenes de levante: la nubosidad queda muy por debajo de Sierra Nevada. El 22 de marzo de 2004 la entrada de levante va cubriendo de nubosidad todo el litoral norte del Mar de Alborán, la estructura dendrítica de la nubosidad delata la condensación por ascenso en las laderas más bajas de Sierra Nevada, pero las dorsales permanecen por encima de la inversión del levante.

El día 30 de abril de 2002 se produce un ascenso en conjunto de la masa de aire del levante por las laderas montañosas del litoral, al sur del arco montañoso malagueño llegaron a registrarse precipitaciones débiles, pero vemos como las altitudes superiores a los 1500 metros permanecen despejadas. La capa del levante queda claramente por debajo del nivel de 800 hPa. En el sondeo de Gibraltar de las 12 UTC se observa una inversión de temperaturas entre 900 y 850 hPa y un nivel crítico de viento entre 850 y 800 hPa.

La probabilidad de que en los temporales de levante se observe un nivel crítico de viento o una inversión de temperaturas es muy alta. En ocasiones el radar de Málaga detecta aceleraciones a sotavento del arco montañoso malagueño que pueden indicar la existencia de vientos descendentes del sureste fuertes o muy fuertes (figura 2).

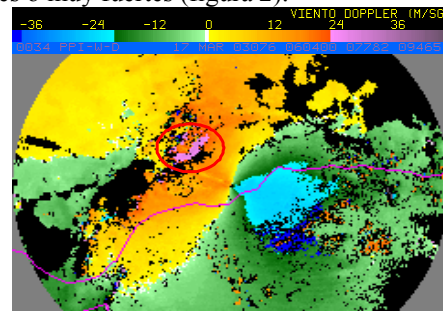


Figura 2. Aceleración de los vientos de levante a sotavento del arco montañoso malagueño, el círculo resalta velocidades superiores a 24 m/s.

La cizalladura vertical del viento, de dirección o de velocidad, puede provocar que la componente del viento perpendicular a la barrera montañosa sea muy pequeña o incluso nula por encima de Sierra Nevada (SE cerca de las dorsales de Sierra Nevada y SSW flojo arriba). Este nivel crítico formado sin necesidad de ruptura de ondas impide la propagación vertical de la energía y la refleja hacia la superficie produciendo o intensificando los vientos descendentes.

Otro factor que impide la disipación vertical de la energía es una inversión de temperaturas, de forma que situada cerca de las cimas de la cordillera contribuye a acelerar los vientos descendentes.

Para que en la Estación de Esquí de Sierra Nevada se produzca un caso de vientos fuertes del sur con régimen de levante, éste debe ser lo bastante profundo para que el ascenso por las laderas sur alcance el nivel de 700 hPa y se produzca un remonte de la cordillera, las causas pueden ser un movimiento de un sistema vaguada – dorsal, un aumento del espesor de la capa del levante por la llegada de una onda corta en altura (puede hacer

descender la presión a sotavento de la barrera, que giren los vientos en las cimas siendo más perpendiculares y estirar hacia arriba la capa del levante), por una entrada profunda de levante o inestabilidad térmica ($T_{500\text{ hPa}} - T_{850\text{ hPa}}$).

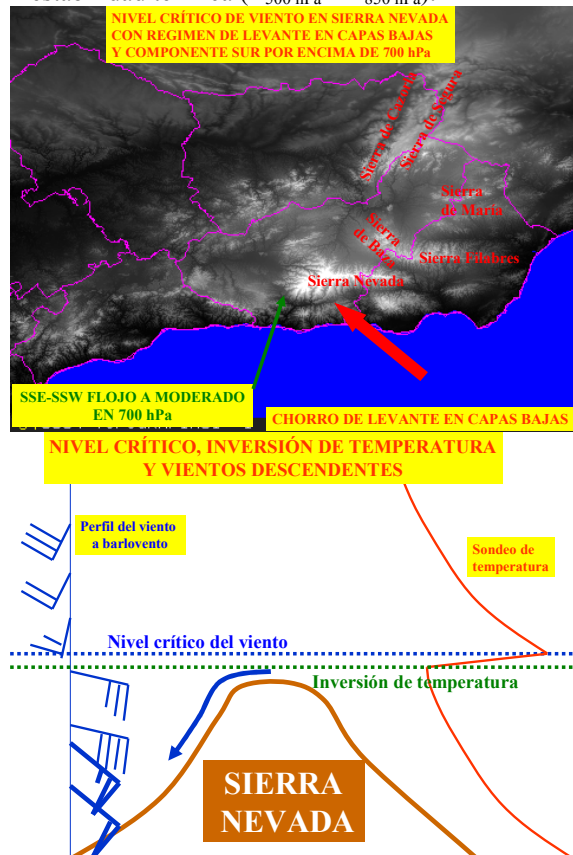


Figura 3. Modelo conceptual de vientos descendentes en Sierra Nevada con régimen de levante en el mar de Alborán.

Para ciertos flujos del sureste, el aire de una capa por debajo de la inversión se ve forzado a ascender sobre las montañas acelerándose hasta las dorsales, o “pseudocresta o punto de control virtual” (Armi y Williams 1993), y produciendo vientos más fuertes al descender. El flujo descendente es poco profundo y la mezcla turbulenta en la capa descendente es capaz de establecer el gradiente adiabático del aire seco que se observa entre observatorios a diferentes altitudes.

Hay otros casos, que dejaremos para posteriores comunicaciones, en que capa del levante es tan poco profunda que es imposible que ascienda sobre la barrera de Sierra Nevada, pero el flujo de componente sur es lo suficientemente fuerte para desacoplarse del de niveles bajos. Los vientos fuertes descendentes se producen al ascender el flujo tanto por encima del aire bloqueado junto al terreno como por el ascenso sobre el mismo terreno.

2. Ascensos a barlovento y descensos a sotavento.

El 10 de enero de 1998 es un día de régimen de levante en niveles inferiores a 850 hPa (con fuerte gradiente de presión entre Palma y el Estrecho) y vientos del sur por encima de 700 hPa (figura 4).

En la figura 5 vemos los vientos observados a

diferentes altitudes de la Estación de Esquí. Este comportamiento es típico de días con vientos fuertes o muy fuertes del sureste y cielos despejados, y suele estropear muchas predicciones.

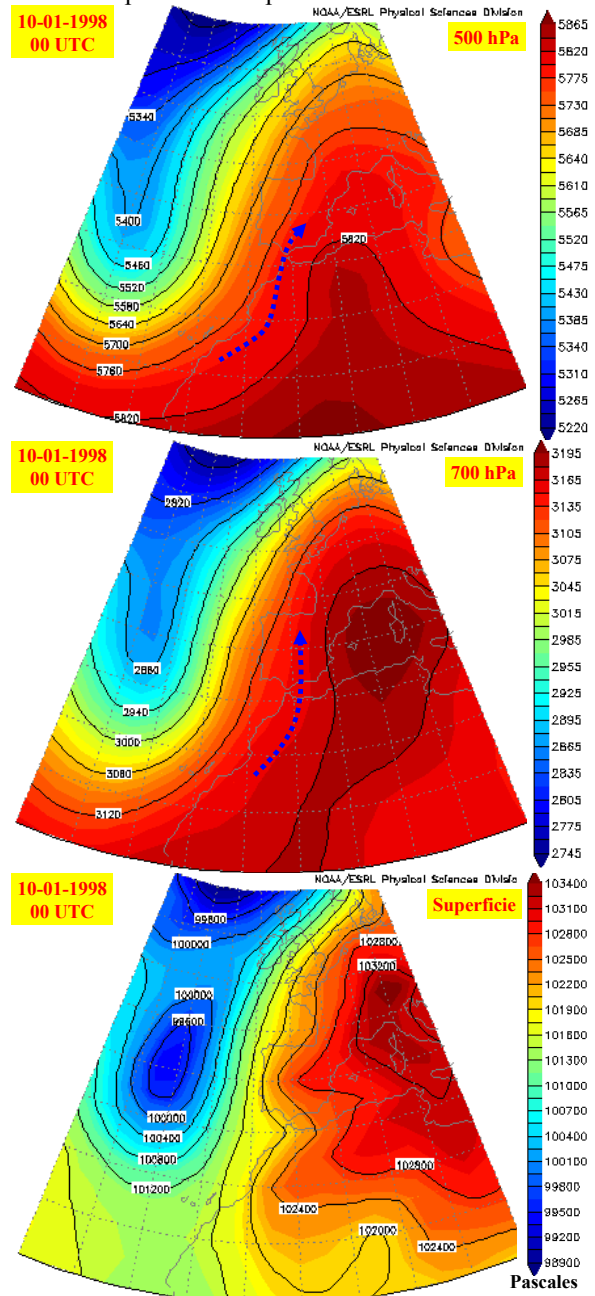


Figura 4. Análisis de 300, 500 hPa, 700 hPa y de superficie a las 0 del día 10 de enero de 1998.

La dirección del viento está comprendida entre la observada en los sondeos de Murcia en el nivel de 850 hPa (el efecto del Mar de Alborán hace que en Gibraltar sea claramente de dirección este) y la de 700 hPa. Se aprecia una clara aceleración respecto a los vientos observados al aire libre. Esta aceleración es máxima en Compresores, donde la velocidad del viento, superior a 25 m/s, es mayor que en cualquier nivel de la troposfera (el doble del viento máximo observado a 700 hPa al aire libre, solamente en el nivel de 200 hPa hay velocidades del mismo orden).

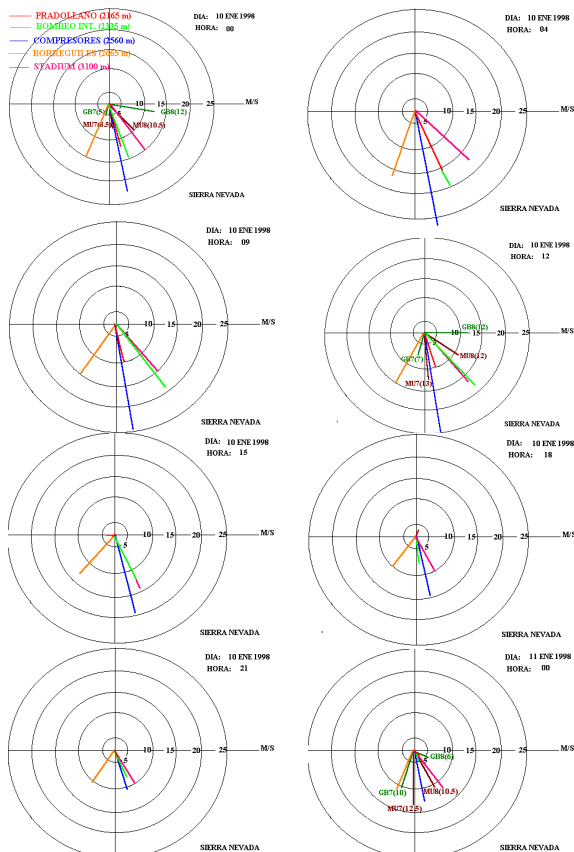


Figura 5. Las velocidades del viento en la Estación son bastante mayores que las observadas en 700 y 850 hPa en los sondeos de Gibraltar y Murcia.

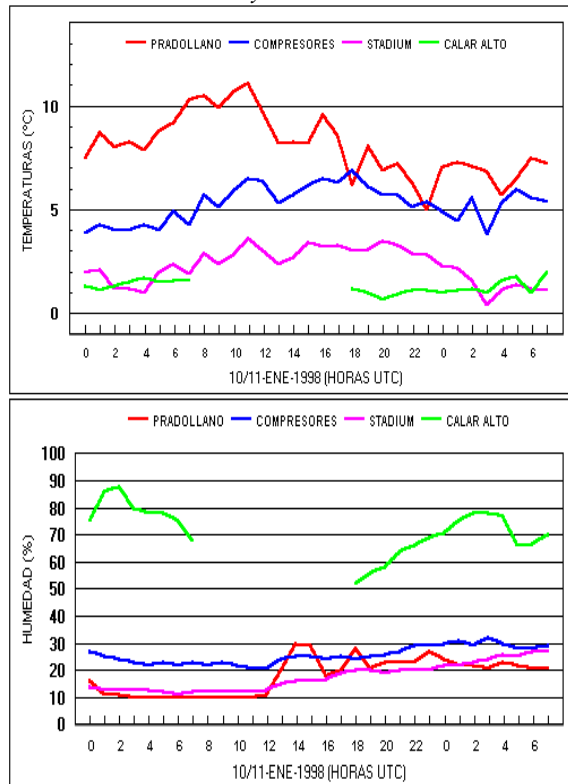


Figura 6. Gráficas de temperatura y humedad relativa del aire de los observatorios de Pradollano, Compresores y Stadium (Sierra Nevada) y de Calar Alto (Sierra de Filabres) correspondientes a los días 10 y 11 de enero de 1998.

La fuerza de los vientos en Sierra Nevada decae al tiempo que el levante en el Estrecho (nivel de 850 hPa), el viento al aire libre en 700 hPa y en Murcia en el nivel de 850 hPa prácticamente no varían. De las gráficas de temperatura y de humedad relativa de los distintos observatorios de la Estación de Esquí (figura 6) deducimos la existencia de una capa de aire muy bien mezclada. A las 04 UTC, momento en que se registró la mayor velocidad del viento en Compresores, el gradiente de temperatura entre Pradollano y Stadium fue de $0.81^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Cuando el viento fue fuerte en todos los observatorios el gradiente vertical de temperatura osciló entre 0.8 y $0.9^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Las gráficas de la figura 6 nos muestran que en Calar Alto la humedad es mucho mayor y la temperatura mucho menor que en Pradollano, cuando la altitud de los dos observatorios es muy parecida. Recordemos que Calar Alto está en la cima de la Sierra de Filabres (2168 metros) y Pradollano a sotavento de los vientos de componente sur.

La explicación puede ser la siguiente: los vientos en Calar durante la madrugada del día 10 son del SE, si en los sondeos de Gibraltar y de Murcia de las 0 UTC (figura 8) evolucionamos desde la base de las nubes manteniendo los gradientes verticales de temperaturas observados en sus capas saturadas (0.66°C y 0.5°C cada 100 metros de elevación) alcanzaríamos a la altitud de Calar Alto 0.7°C y 1.5°C respectivamente, la temperatura observada en Calar Alto a las 0 UTC era de 1.3°C . Parece que en la Sierra de Filabres ha habido un ascenso en conjunto de la columna del levante de, al menos, unos 75 hPa (sería una evolución temporal parecida a la espacial que existe entre Murcia y Gibraltar a las 0 UTC).

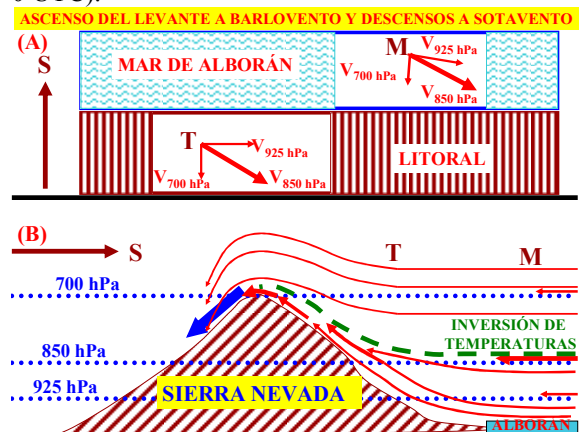


Figura 7. Esquema de vientos fuertes del sur por remonte del levante. A) Planta y B) corte vertical. El levante es lo suficientemente profundo para que la inversión de temperaturas alcance las dorsales de Sierra Nevada.

Si suponemos que ocurre lo mismo en Sierra Nevada, basta con que la columna observada en el sondeo de Murcia ascienda hasta 3300 metros (3600 en Gibraltar) para que luego por descenso adiabático se alcancen las temperaturas observadas en Pradollano y Compresores. Supuesto este ascenso las condiciones serían muy propicias para la

aparición de fuertes vientos descendentes: inversión muy cercana a la cima de la montaña (la inversión estaría unos 150 hPa más alta que las observadas en los sondeos de Murcia o Gibraltar) y capa límite de viento, de tal forma que el viento en altura decae e incluso cambia de dirección.

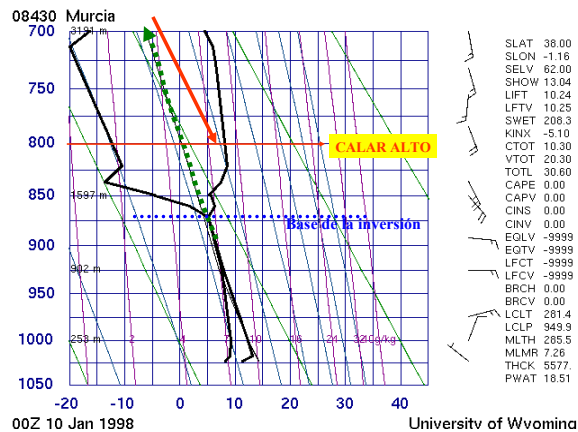
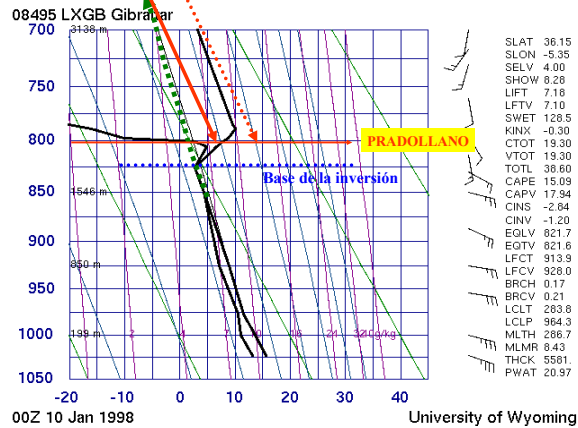


Figura 8. Ascensos húmedos (verde) seguidos de descensos secos (rojo) explican bien las temperaturas observadas a sotavento de Sierra Nevada, si solamente hubiera descendencias las temperaturas observadas a sotavento deberían ser mayores (línea roja delgada a trazos). La inversión quedaría muy cerca de la altura de las dorsales y habría un nivel crítico que explicaría los fuertes vientos observados en la estación (hasta el doble de los observados al aire libre).

En la figura 7 podemos ver un esquema de lo que ocurre cuando el levante remonta la cordillera y se producen vientos fuertes del sur en la Estación de Esquí.

3. Trayectorias y nivel crítico de viento.

El día 13 de marzo de 2003 se observaron vientos fuertes a muy fuertes del sur en gran parte de la Estación, de madrugada se alcanzaron los 90 km/h en Compresores y 68 km/h en Pradollano (figura 9). Coincidiendo con el giro del viento a dirección sur las temperaturas nocturnas interrumpen su descenso en Compresores al mismo tiempo que las humedades relativas disminuyen más todavía, en Pradollano la temperatura nocturna alcanza un máximo de 10°C coincidiendo con las rachas más fuertes del sur.

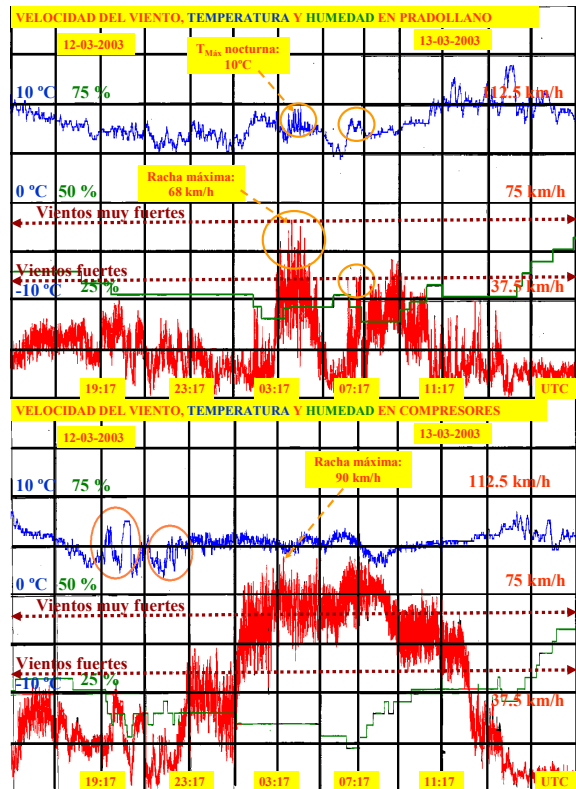


Figura 9. Datos de temperatura (°C, en azul), humedad relativa (% en verde) y velocidad del viento (km/h, en rojo) de los observatorios de Compresores y Pradollano los días 12 y 13 de marzo de 2003. Están marcados a puntos los umbrales de vientos fuertes (41 km/h) y muy fuertes (71 km/h).

Los vientos previstos por los modelos para el nivel de 700 hPa (nivel de referencia para la predicción de vientos en Sierra Nevada) no superaban los 36 km/h (vientos moderados):

DIA DE LA PASADA: 2003071
PUNTO LAT=36 LON=5 MODELO=EC12

PREVISTO PARA EL DIA 2003072 HORA 0 +12

P	Z	T	SPD	DIR	RH	MTX	MXS	THS	THE	TP	QV	TD	DVG
1024	-43	15.3	8.4	79	88	20.1	11.5	45	42	14	85	14.4	-2.5
1000	156	14.8	11.4	82	86	9.2	10.6	44	40	15	104	12.5	-6
925	817	16.9	14.6	105	85	5.9	13.2	61	41	23	87	5.1	1.8
850	1535	14.1	12.8	125	38	4.7	12	63	42	28	60	6	1.5
700	3136	2.899	7.5	153	21	2.4	8.8	53	37	33	11	-17.3	-1
500	5760	-16.9	14.9	183	10	2	2	46	40	39	3	-41.9	-1.4
300	9390	-41.7	20.3	195	53	.1	.3	52	51	51	3	-49.7	1
250	10588	-53.9						53	53	53			

PCPA CVR LCC MCC HCC SST ISOC ISOW LI IOPG
0 99 1 0 99 16.1 3489 2525 2 10.7

PREVISTO PARA EL DIA 2003072 HORA 6 +18

P	Z	T	SPD	DIR	RH	MTX	MXS	THS	THE	TP	QV	TD	DVG
1022	-43	17	7.9	75	84	10.1	12	48	43	15	80	14.3	-3.4
1000	139	15.5	10.1	79	86	9.6	11.1	45	42	16	97	13.2	-1.7
925	799	15.2	9.5	95	54	6.4	12.8	55	40	22	81	6.1	.5
850	1514	13.8	6.8	117	28	3.3	11.8	62	37	27	21	-4.2	-1
700	3133	1.899	5.3	174	34	2.1	6.3	50	38	31	11	-12.3	-3
500	5727	-17.4	15.2	172	10	2	2	45	39	39	3	-42.3	-2.2
300	9347	-44.8	22.8	195	91	.2	.2	50	50	49	5	-41.9	1.8
250	10539	-55						51	51	51			

PCPA CVR LCC MCC HCC SST ISOC ISOW LI IOPG
0 97 0 0 97 16.1 3367 2444 .9 11.2

En la figura 11.a puede verse que la predicción del modelo ECMWF es bastante buena, los vientos previstos en el punto 36 5 para los niveles de referencia son bastante parecidos a los observados en el sondeo de Gibraltar de las 0 UTC: 12 m/s a 925 hPa, 17 m/s a 850 hPa, 4 m/s a 700 hPa y 16 m/s a 500 hPa.

A las 06 UTC se aprecia en altura un sistema vaguada - dorsal (eje NNW-SSE) con flujo débil a moderado del sur sobre la Península. En superficie

se observa un fuerte gradiente de presión a lo largo del Mar de Alborán, con altas presiones relativas en el Mediterráneo más occidental y bajas relativas en el Golfo de Cádiz (figura 10). Se aprecia un fuerte contraste térmico entre 850 y 500 hPa: $T_{850} - T_{500} > 32$.

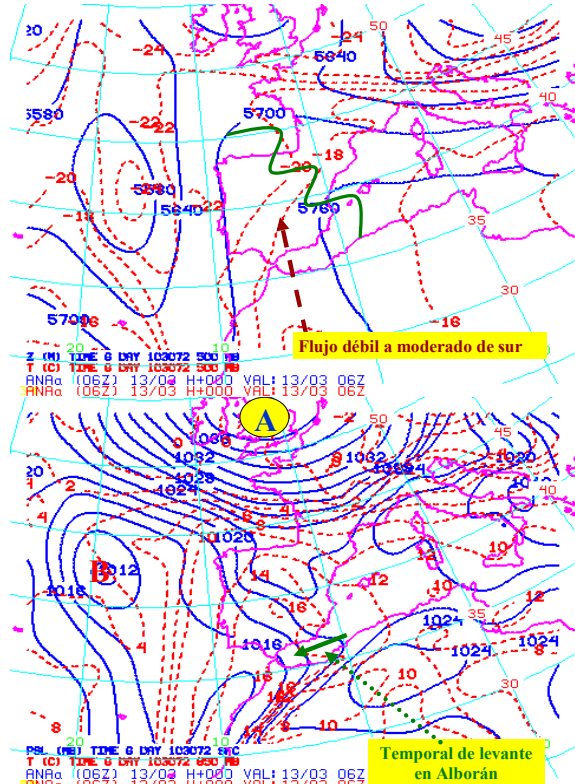


Figura 10. Análisis del HIRLAM-INM correspondientes a las 06 UTC del día 13-03-2003. Arriba, 500 hPa, los geopotenciales en líneas continuas azules y las temperaturas a trazos rojos. Abajo, niveles bajos, la presión en superficie en líneas continuas azules y las temperaturas en 850 hPa a trazos rojos.

En el sondeo de Gibraltar de las 00 UTC del 13 de marzo de 2003 (figura 11) hay dos capas totalmente agitadas y con vientos fuertes, una entre 850 y 770 hPa con una temperatura potencial de 301.6 k y un máximo de viento de 17 m/s en 850 hPa, y otra entre 566 y 500 hPa con un máximo de viento de 18 m/s en 538 hPa. Teniendo en cuenta estas capas tenemos dos posibles causas que provoquen esos vientos tan fuertes en la Estación de Esquí de Sierra Nevada:

- un descenso adiabático y aceleración del viento al descender desde 5200 m, con lo que la temperatura que deberíamos observar a la altitud de Compresores sería del orden de 10°C.
- o un ascenso ladera arriba hasta la dorsal de la montaña y un descenso posterior, los valores de temperatura que deberían observarse en este caso serían del orden de 5°C a la altitud de Compresores, muy cercanos a los observados (figura 9).

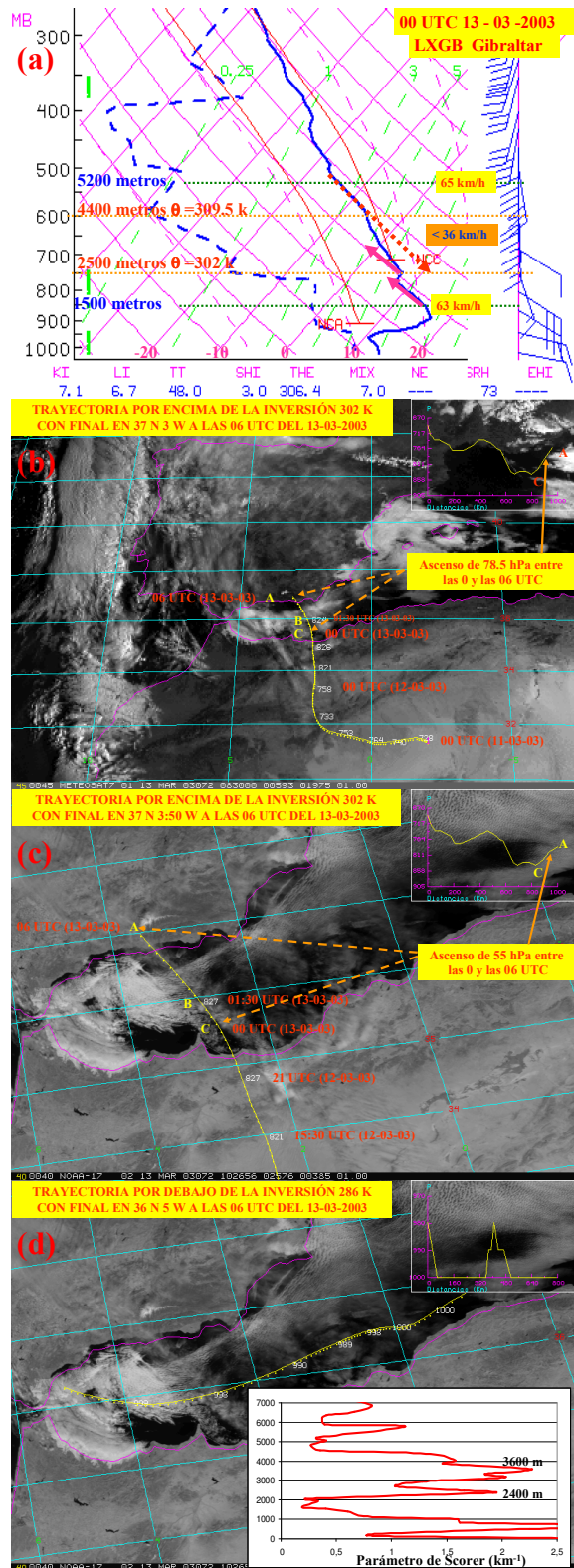


Figura 11. a) Sondeo de las 00 UTC del día 13 de marzo de 2003 de Gibraltar. b) Sobre la imagen del canal visible del satélite Meteosat de las 8:30 UTC del día 13-03-2003, trayectoria a 302 k, por encima de la inversión, entre las 0 del día 11 y las 6 del día 13 y con final en 37 N 3 W. (c) Lo mismo pero sobre la imagen del canal 2 del NOAA de las 10:26 y final en 37 N 3:50 W. (d) Lo mismo que en c) pero a 286 k, por debajo de la inversión, y final en 36 5, en la esquina derecha distribución vertical del parámetro de Scorer simplificado en Gibraltar a las 00 UTC.

En la figura 11 podemos ver las trayectorias obtenidas de los análisis del modelo HIRLAM, por encima, 302 k, y por debajo, 286 k, de la inversión del régimen de levante, entre las 0 del día 11 y las 6 del día 13 de marzo de 2003. En las dos trayectorias calculadas por encima de la inversión y con final cerca de Sierra Nevada se observan sendos ascensos de 78.5 y 55 hPa entre las 0 y las 6 UTC del día 13, en la trayectoria por debajo de la inversión no se observan estos ascensos. Sobre el sondeo de las 0 he pintado dos flechas gruesas rosas aplicando ascensos del orden de los observados en el modelo HIRLAM a los niveles de 2500 (con temperatura potencial de 302 k) y de 1500 metros.

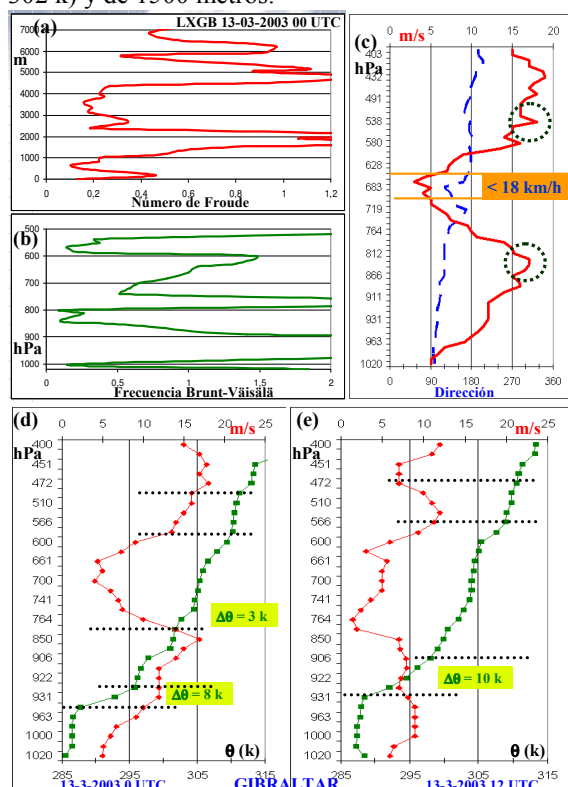


Figura 12. Datos obtenidos del sondeo de Gibraltar de las 0 del día 13 de marzo de 2003: a) variación del número de Froude con la altura, b) variación de la frecuencia de Brunt-Väisälä con la altura, c) variación de la dirección (azul a trazos) y de la velocidad del viento (rojo), a puntos máximos de viento por encima y por debajo del nivel crítico de 670 hPa (3473 metros), d) variación de la temperatura potencial y de la velocidad del viento, e) como en d) pero para el sondeo de las 12 UTC.

En el sondeo de Gibraltar de las 0 (figura 12.a) se observa un número de Froude medio los primeros 4000 metros de 0.5, pero también se ve que por encima de la capa de levante pegada al suelo (escalón de 8k de la temperatura potencial), el flujo y la termodinámica constituyen un estrato de unos 1000 metros de espesor con un gran número de Froude (pequeñas frecuencias B-V y fuertes vientos), por tanto el aire puede ascender fácilmente sobre el relieve abrupto. La fuerte cizalladura vertical del viento (la velocidad mínima se observa al aire libre entre 700 y 660 hPa -3000 y 3600

metros-) y la pequeña inversión (salto de 3k de la temperatura potencial) que coronan esta capa contribuyen a la aceleración descendente del viento que cruza la montaña. La variación vertical del parámetro de Scorer simplificado detecta sendas discontinuidades que favorecen los vientos descendentes (figura 11.d). Las rachas máximas observadas en Compresores son casi un 50% más fuertes que el viento máximo observado en la capa del levante, al aire libre solamente se encuentran vientos de este orden a unos 200 hPa en los sondeos de Gibraltar.

En el sondeo de las 12 UTC de Gibraltar se observa una nueva oleada de levante junto al suelo, en la figura 12.e vemos como las líneas a puntos que marcan la base y tope de la inversión están más altas, la temperatura potencial de la capa aumenta 1k, la inversión se refuerza y la velocidad del viento aumenta por debajo de la base de la inversión. Por encima del nivel de 950 hPa las temperaturas potenciales bajan y desaparece la capa de levante asociada al máximo de viento en 850 hPa, la capa agitada con máximo de viento cercana a 500 hPa todavía se puede reconocer. Los vientos amainaron claramente a lo largo de la mañana en la Estación, lo que concuerda con la idea de que fueron provocados por la capa de levante asociada al máximo de viento.

4. Características del flujo incidente

El día 19 de diciembre de 2007 Coincidiendo con un temporal de levante en el Mar de Alborán, hay datos de vientos superiores a los 30 kt a las 7 UTC (figura 13), se observaron vientos fuertes en la Estación de Esquí: hay momentos en los que la velocidad del viento medio del SE supera los 70 km/h y las rachas 95 km/h.

En Calar Alto (790 hPa) los vientos observados son muy parecidos a los del sondeo de Murcia, el viento fluye del este y apenas se aprecia aceleración al pasar por la cumbre de la Sierra de Filabres (figura 13). Hasta las 5 UTC del día 19, la velocidad del viento en el IRAM (observatorio astronómico situado a unos 2860 m en la Loma de Dilar) es del mismo orden que la del observatorio astronómico de Calar Alto, no superándose los 10 m/s, a partir de esta hora el viento pasa al segundo cuadrante y arreceja (figuras 13 y 14). Entre las 12 UTC del día 18 y las 0 UTC del 19 de diciembre de 2007 se observa en los sondeos de Murcia (figura 14), un aumento del espesor de la capa con vientos de levante (unos 150 hPa) y de la velocidad del viento. La capa en la que el parámetro de Scorer varía bruscamente sube 100 hPa (figura 14), observándose a las 0 UTC entre los 2650 y los 2800 metros una inversión de temperatura y un nivel crítico de viento. Lo normal es que al sur de Sierra Nevada suceda algo parecido y que con un pequeño ascenso adicional por las laderas el nivel de la inversión de temperaturas alcance las dorsales de la cordillera (unos 700 hPa).

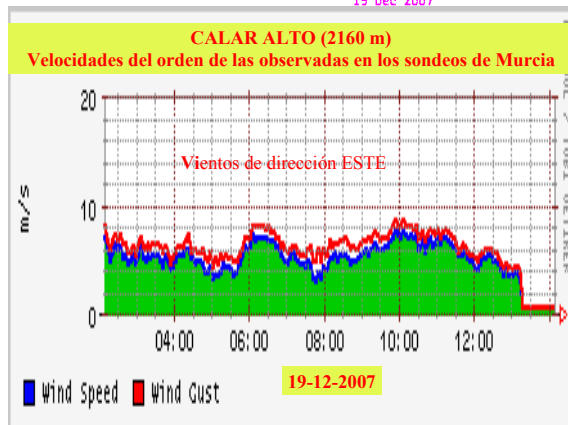
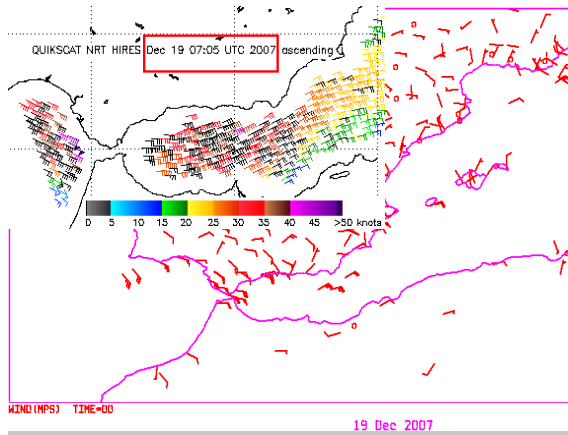


Figura 13. Análisis de vientos de superficie a las 0 UTC del 19 de diciembre de 2007 y datos de las 7 (quickscat). Vientos observados en Calar Alto.

En la figura 15 se aprecia como los aumentos de los gradientes de presión entre las Baleares y Palos y el Estrecho de Gibraltar provocan que arrecie el levante en superficie, al tiempo que aumenta la velocidad del viento del SE en 850 hPa sobre el Mar de Alborán y su litoral.

En los cortes verticales del mar de Alborán y Sierra Nevada a lo largo del meridiano 3° W correspondientes al modelo ONR3 (figura 16), se observa que entre las 12 del día 18 y las 6 UTC del día 19 de diciembre de 2007 el máximo del viento de levante queda por debajo del nivel de 925 hPa, justamente al pie de Sierra Nevada -el relieve contribuye a la aceleración del flujo-, y arrecia de 22 a 38 kt, también se aprecia un aumento de la profundidad de la capa del levante, de modo que aumenta la velocidad del viento del SE en el nivel de 850 hPa y el nivel del viento crítico sube hasta cerca de 700 hPa. En el Mar de Alborán el viento se ha ido acelerando y la capa del levante se ha hecho cada vez más profunda a lo largo de la noche, en el sur de Sierra Nevada el espesor será probablemente mayor que el observado en los sondeos de Gibraltar y de Murcia, y aunque la cordillera desvía el flujo del levante hacia su izquierda el aire ascendente termina superando la barrera montañosa, el efecto Bernoulli es reforzado por una inversión situada justamente sobre la línea de las dorsales y el aire se acelera al descender a sotavento.

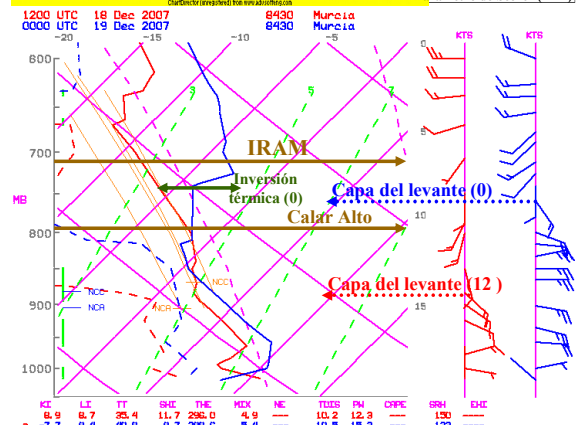
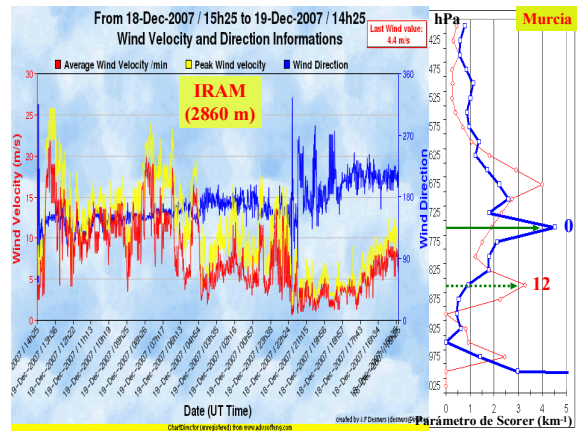


Figura 14. Vientos observados en el IRAM y perfil vertical del parámetro de Scorer simplificado a las 12 del 18 y las 0 del día 19 en Murcia. Sondeos de Murcia de las 12 del día 18 y de las 0 del 19 de diciembre de 2007. Las líneas horizontales indican los niveles de los dos observatorios astronómicos (unos 790 y 720 hPa), de la base de la inversión térmica a las 0 y de los topes de los estratos con vientos de levante.

En la cima de la Sierra de Filabres el viento es del mismo orden al observado al aire libre (figuras 13 y 14), para Filabres la capa de levante que observamos en Murcia a las 0 UTC tiene un número de Froude medio de 1 (lo que explica la velocidad en la cumbre, la teoría hidráulica dice que la velocidad sería mayor si el flujo fuera subcrítico).

El sondeo más cercano a Sierra Nevada es uno de Málaga en el que se observa un máximo de 33 kt del SE en el nivel de 850 hPa a las 9 UTC del día 19, no serían de extrañar vientos del mismo orden en este nivel a barlovento de Sierra Nevada, en Gibraltar y en Murcia son del E y más flojos. Suponiendo para el flujo incidente sobre Sierra Nevada un gradiente vertical de temperaturas intermedio al observado en Murcia y Gibraltar a las 0 UTC, y vientos del orden de los observados en el corte vertical del modelo ONR3, obtendríamos un número de Froude de 0.8. Aplicada la fórmula de Hunt y Snyder para una colina y flujos estables o neutrales (condiciones muy discutibles para los flujos del SE en el caso de Sierra Nevada):

$$H_s = h (1 - F_r)$$

obtenemos el valor de 1080 metros de altitud a partir del que el viento remontaría una barrera como Sierra Nevada.

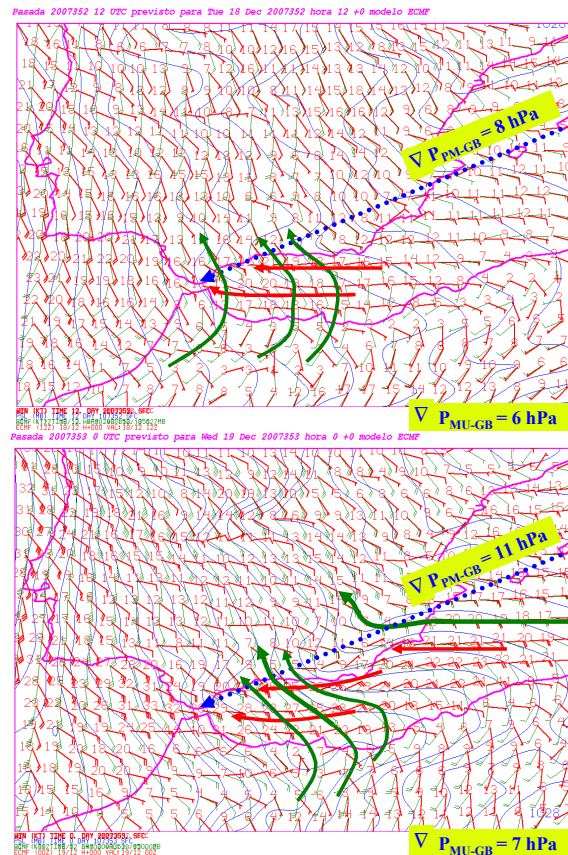


Figura 15. Análisis del ECMF de las 12 UTC del día 18 de diciembre de 2007 y de las 0 UTC del día 19 de diciembre de 2007: isobaras a nivel del mar en azul, vientos en 850 hPa (verde) y superficie (rojo), las líneas rojas indican el flujo en superficie, las líneas verdes en 850 hPa, en recuadros amarillos las diferencias de presión entre Palma de Mallorca y Gibraltar y entre Murcia y Gibraltar.

Los sondeos de las 0 UTC del 19 de Murcia y de Gibraltar son bastante diferentes (figura 17), no solamente por la canalización orográfica claramente observada en Gibraltar. La capa del levante, de temperatura potencial muy parecida (solamente 1 k de diferencia), sobrevuela los 500 metros en Murcia y está pegada al suelo en Gibraltar, de los sondeos parece deducirse un descenso de la capa del levante hacia el mar de Alborán o un desacople nocturno en capas bajas en Murcia. En ambos se observa el mínimo de velocidad del viento al aire libre cerca del nivel de las dorsales de Sierra Nevada (estratos cercanos a 700 hPa con velocidades inferiores a 18 y 25 km/h).

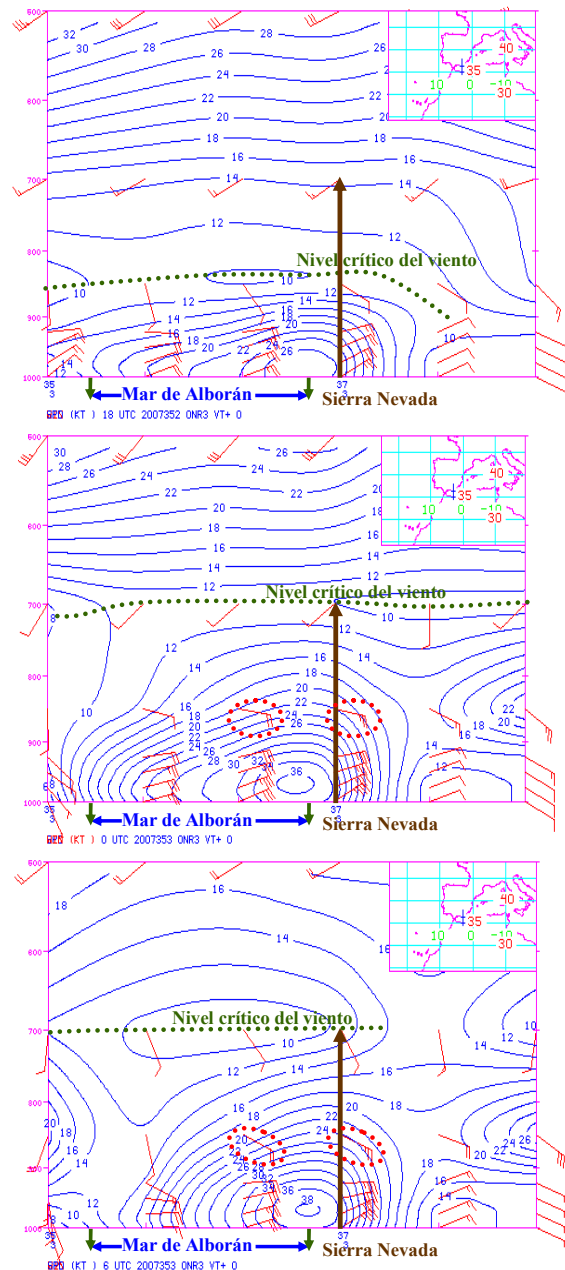


Figura 16. Cortes verticales de vientos y velocidad del viento (las líneas azules son las isotacas en nudos) entre los puntos 35N 3W y 38N 3W de los análisis del modelo ONR3 entre las 18 UTC del día 18 y las 6 UTC del día 19 de diciembre de 2007, a puntos nivel crítico del viento.

Aunque las condiciones al sur de Sierra Nevada serán distintas, cada sondeo representa el flujo en capas bajas en el lugar en que se ha hecho, vemos dos tipos diferentes de flujos que pueden provocar una aceleración del viento a sotavento:

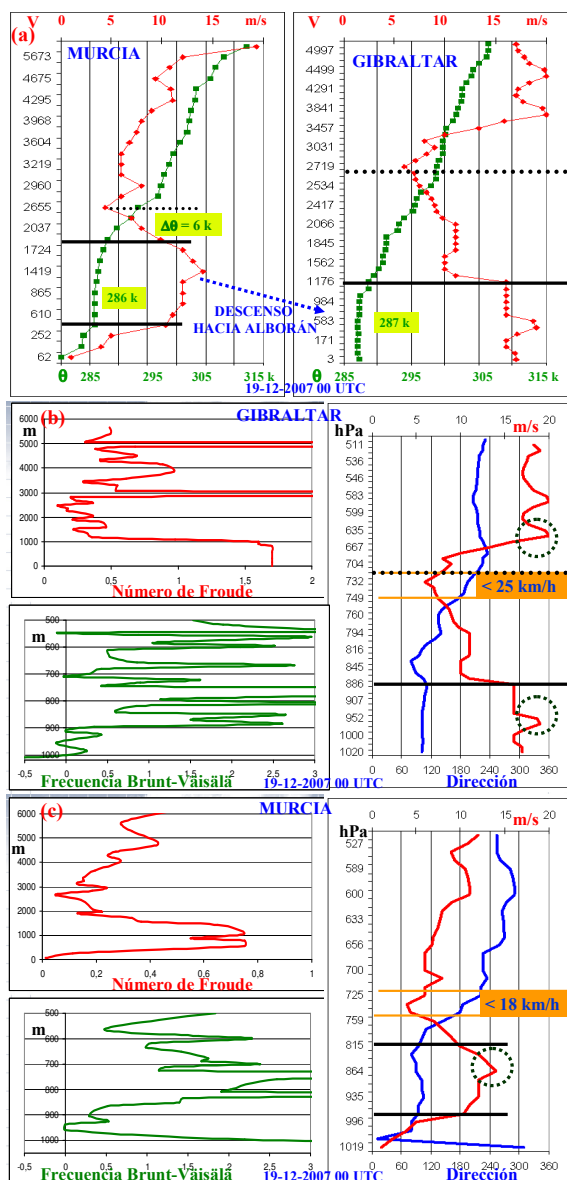


Figura 17. a) Perfiles verticales de temperatura potencial (cuadros) y velocidad del viento (rombos) en Murcia y Gibraltar. b) y c) Perfiles verticales del número de Froude, de la frecuencia Brunt-Väisälä y de la dirección y velocidad del viento deducidos de los sondeos de las 0 UTC del 19 de diciembre de 2007 en Murcia y Gibraltar. Las líneas gruesas negras marcan la capa del levante, las de puntos de Gibraltar los límites superiores de la posible capa que incide sobre Sierra Nevada.

- el de Murcia es un sondeo con dos capas (figuras 17 a y c), la capa que remontaría la cordillera con una temperatura potencial de 286 k está taponada por una capa estable encima en la que hay un salto de 6 k en la temperatura potencial (según Colson 1954 y Brinkmann 1974 en el caso de vientos descendentes el perfil de temperatura corriente arriba muestra una inversión o una capa de gran estabilidad cerca del tope de la montaña). Las dorsales de Sierra Nevada harían de compuerta (punto de control) en la que el flujo pasa de ser subcrítico a supercrítico.

- En el sondeo de Gibraltar se observa una capa de levante con temperatura potencial de 287 k y otra por encima en la que la temperatura potencial aumenta con la altura hasta una discontinuidad de 3k que coincide con el mínimo de viento (figuras 17 a y b). Teniendo en cuenta que corriente arriba, al sur de Sierra Nevada, el flujo es del sureste en 850 hPa (análisis y cortes verticales de las figuras 15 y 16) y que al ir ascendiendo va rolando anticiclónicamente hacia al sur y disminuyendo hasta el nivel crítico, y que hacia niveles inferiores es cada vez más del este y más fuerte, se puede imaginar incidiendo sobre Sierra Nevada un tipo de columna móvil con estructura de flujo self-similar: una distribución parabólica de la velocidad normal a la cordillera (componente sur) y un aumento continuo de la temperatura potencial en la capa, esta columna estaría limitada por arriba y por abajo por sendas capas muy bien mezcladas, casi isentrópicas (figura 18).

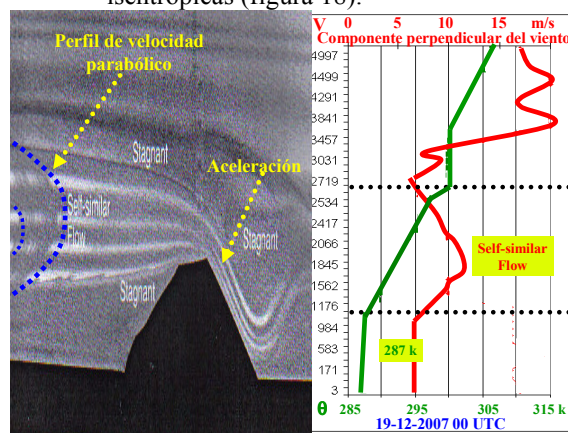


Figura 18. Cambio de un flujo con perfil de velocidad parabólico en las cercanías de un obstáculo y aceleración al descender a sotavento (blanco y negro), y perfil de θ y V del flujo corriente arriba de Sierra Nevada. Las líneas de puntos son los límites de la posible capa que incide sobre Sierra Nevada.

El sondeo de Murcia se adapta al tipo de foëhn poco profundo más conocido: con una capa inestable o indiferente taponada por otra más estable arriba. Según el sondeo de Gibraltar podemos hacer la hipótesis de que el flujo que produce los vientos descendentes es uno del tipo de la solución self-similar de Wood (1968). Por encima de la capa del levante (hasta unos 1000 metros) incide sobre Sierra Nevada otra capa, con un máximo de viento perpendicular a las dorsales entre 850 y 800 hPa, y un mínimo cercano a 700 hPa (nivel crítico de viento). En ambos casos tenemos aire ascendente por las laderas sur de Sierra Nevada con efecto de Bernoulli reforzado por una inversión justamente sobre la línea de dorsales. Puede haber una aceleración del flujo sin necesidad de rupturas de ondas.

Bibliografía:

- Armi, L.y Mayr G.J. Continuously stratified flows across an Alpine crest with a pass: Shallow and deep föhn. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **133**: 459-477 (2007).
- Brinkmann, W.A.R., 1974. Strong downslope winds at Boulder, Colorado, *Mon. Wea. Rew.*, **102**, 596-602.
- Barry; Roger R.. Mountain weather and climate. Routledge Physical Environment Series.
- Baines, Peter G. Topographic effects in stratified flows. Cambridge University Press.
- Hunt, J.C.R y Snyder, W.H., 1980. Experiments on stably and neutrally stratified flow over a model three-dimensional hill, *J. Fluid Mech.*, **96**, 671-704.
- Long, R. R., 1953: Some aspects of the flow of stratified fluids I, A theoretical investigation. *Tellus*, **5**, 42-58.
- Long, R. R., 1954: Some aspects of the flow of stratified fluids II. Experiments with a two-fluid system. *Tellus*, **6**, 97-115.
- Polvorinos Pascual, Fausto. Estudios sobre Sierra Nevada, *Vientos del sur por el Este*. http://mijas.inm.es/~gpv/trabajos_cursos/trabajos/sierra_nevada/SUR%20POR%20EL%20ESTE.pdf
- Polvorinos Pascual, Fausto. Aproximación desordenada a la observación y vigilancia con imágenes de satélite. *Nubosidad orográfica*. http://mijas.inm.es/~gpv/trabajos_cursos/msg_aplicaciones_gp/nubosidad_orografica.pdf
- Prandtl, L. 1942. Führer durch die Strömungsl. Fiedr. Vieweg & Sonh: Braunschweig Germany.
- Prandtl, L. 1952. Essentials of fluid mechanics with applications to hydraulics, aeronautics, meteorology and other subjets. Blackie and Son: London, UK.
- Wood, IR. 1965. Selective withdrawal from a stably stratified fluid. *J. Fluid Mech.* **32**: 209-223.