

# **CAPÍTULO 4**

## **ANÁLISIS MICROCLIMATOLÓGICO DE LA CAPA SUPERFICIAL ATMOSFÉRICA**

En este capítulo se analizan las variables meteorológicas medias de la capa superficial atmosférica evaluando los datos obtenidos en una torre meteorológica durante casi cuatro años. El objetivo principal ha sido observar el comportamiento de la temperatura y el viento a diferentes alturas.

### **4.1 Introducción**

La diferencia principal entre la micrometeorología y la microclimatología es el tiempo de promediado de las variables meteorológicas, tales como el viento, la temperatura, etc. Mientras que la micrometeorología centra su interés en el análisis de las fluctuaciones con promedios temporales cortos (del orden de media hora o menos) de las variables meteorológicas en la capa fronteriza atmosférica, la microclimatología estudia los promedios temporales largos de las mismas variables, interesándose por las variaciones diurnas y estacionales, así como por las tendencias a largo plazo de los parámetros meteorológicos.

En micrometeorología es frecuentemente necesario el examen detallado de la estructura del fluido y de las variables termodinámicas a pequeña escala para conseguir un mejor entendimiento de la transferencia turbulenta y de los procesos de intercambio a pequeña escala. En microclimatología los detalles de la estructura fina del fluido no son importantes, porque esos efectos se suavizan en los procesos de promediado de las variables, aunque no se pueden ignorar sus consecuencias en los términos a largo plazo.

Aparte de las mencionadas diferencias, la micrometeorología y la microclimatología tienen mucho en común, porque tratan los procesos atmosféricos que tienen lugar en la capa fronteriza atmosférica provocados por la interacción entre la superficie terrestre y la atmósfera.

Para analizar el comportamiento microclimatológico de la capa superficial atmosférica se han estudiado las diferentes variables termodinámicas a partir de los datos suministrados por una torre meteorológica ubicada en Vilaseca desde junio de 1995 hasta noviembre de 1998. La descripción de la campaña experimental se presenta en el apartado siguiente, sección 4.2. El análisis consta del estudio estadístico y espectral de la temperatura, el viento, la presión atmosférica y la radiación neta. En particular, se analiza el comportamiento de las diferentes variables de la capa superficial atmosférica según la estación del año.

Una de las aplicaciones inmediatas de este estudio podría ser la de obtener un diagnóstico de la capacidad de diluir los contaminantes en la atmósfera y suministrar diferentes parámetros que se pueden integrar en los modelos de dispersión de contaminantes específicos del área en cuestión.

## 4.2 Campaña experimental: Vilaseca 95-98

En esta sección se presenta la experiencia realizada con la torre meteorológica ubicada en la localidad de Vilaseca (41° 6' N, 1° 8' E). A continuación comentaremos brevemente su localización y su instrumentación.

### • Localización

La torre meteorológica de Vilaseca forma parte de un proyecto de investigación sobre la calidad del aire en la provincia de Tarragona, que llevan a cabo la *Generalitat de Catalunya* y la *Universitat de Barcelona* desde hace más de una década.

Uno de los problemas más serios que afecta globalmente a la sociedad actual es la contaminación atmosférica. Aunque la atmósfera tiene una gran capacidad para diluir los contaminantes, es imprescindible conocer los mecanismos de dispersión y transporte de éstos, ya que una misma emisión, dependiendo de las condiciones atmosféricas, puede pasar desapercibida o crear un peligroso episodio de contaminación. La concienciación de la sociedad, en los últimos años, se ha cristalizado en una mayor preocupación por parte de los organismos competentes en el medio ambiente. Así, en el año 1991, el *Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya*, con el fin de mejorar el conocimiento y el control de la calidad del aire en la zona del *Camp de Tarragona* instaló un Sodar-doppler, para completar las medidas existentes de la *Xarxa de Vigilancia i Prevenció de la Contaminació Atmosfèrica*. Este instrumento permite la exploración continua de la variables termodinámicas en la capa fronteriza atmosférica (Hinojosa, 2001).

El *Camp de Tarragona* es una zona en la cual la industria, sobretodo la petroquímica, ha experimentado una gran expansión, provocando una cierta intranquilidad ciudadana en relación a la calidad del aire. Como respuesta a esta problemática, desde entonces, se miden regularmente los contaminantes y se estudia la dispersión de los mismos. Con este propósito, el *Departament d'Astronomia i Meteorologia*, en particular el grupo de micrometeorología, bajo la dirección de la Dra. M<sup>a</sup> Rosa Soler, empezó un proyecto de investigación para el estudio de la dispersión de contaminantes en la capa fronteriza atmosférica. Inicialmente se utilizó únicamente el sodar y, más tarde, se complementó con una torre meteorológica y diversas campañas experimentales dotadas con diferente material. Parte del trabajo de investigación que aquí se expone se incluye dentro de este proyecto.

Desde 1995 el grupo de micrometeorología es el responsable de procesar los datos e investigar los resultados obtenidos con los diferentes sensores de la torre meteorológica, destacando que ésta ha sido la única torre meteorológica operativa en nuestro territorio durante un largo periodo de tiempo.

De entre los diferentes trabajos elaborados con la torre meteorológica destacan los siguientes:

- La microclimatología realizada para conocer las condiciones atmosféricas medias de la zona, presentada en este capítulo (Soler et al., 1998).
- La elaboración de un modelo de pronóstico de los parámetros turbulentos válido para su implementación en un modelo de tipo gaussiano para la predicción de contaminantes, (Buenestado y Soler, 1998).
- La validación de la teoría de semejanza, (Buenestado et al., 1999c), que se muestra en el quinto capítulo de esta memoria.
- La validación del Sodar-doppler, (Soler et al., 1996; Hinojosa, 2001).

La torre meteorológica está situada en Vilaseca, Tarragona, localidad cercana a la costa nordeste de España. Es un terreno rural y plano, situado a 4 kilómetros de la costa y a 13 de las montañas de la cadena prelitoral, Figura 4.1.

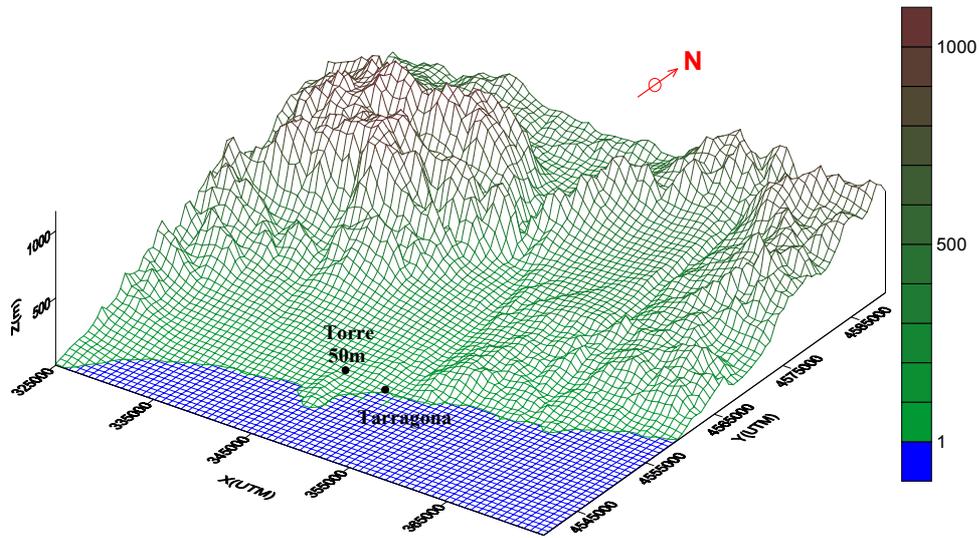


Figura 4.1 Orografía local, en coordenadas UTM (metros), de la torre meteorológica de 50 metros situada en la localidad de Vilaseca, a 4 kilómetros de la costa y a 13 kilómetros de las montañas de la cadena prelitoral. El eje Y indica la dirección Norte-Sur, el eje X señala la línea Este-Oeste y el eje Z denota la altitud en metros.

• **Instrumentación**

La torre meteorológica tiene una altura de 50 metros, su base es cuadrangular con un metro cuadrado de sección y está instrumentada en 4 niveles (5, 10, 35 y 50 metros) registrándose las medidas de la temperatura, la humedad relativa y el viento. Además, como complemento, a 0.5 metros de altura, se mide la presión atmosférica, la precipitación y la radiación neta. La Figura 4.2 muestra esquemáticamente la composición de la torre y la Tabla 4.1 especifica la instrumentación de los diferentes niveles de medida.

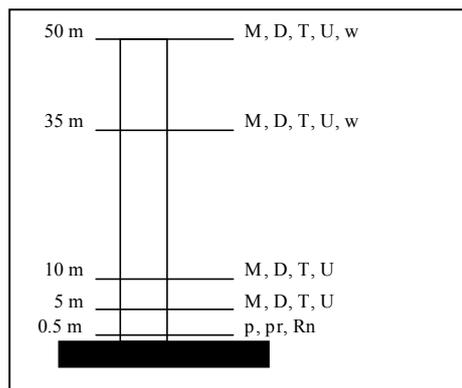


Figura 4.2 Esquema de la instrumentación de la torre meteorológica de Vilaseca. A 0.5 metros se mide la presión atmosférica (p), la precipitación (pr) y la radiación neta (Rn). A 5 y a 10 metros se mide el módulo (M) y la dirección (D) del viento, la temperatura (T) y la humedad relativa (U). A 35 y a 50 metros se mide la temperatura, la humedad relativa, el módulo, la dirección y la velocidad vertical (w) del viento.

En particular, a 35 y 50 metros la torre dispone de anemómetros sónicos que permiten medir las tres componentes del viento. La altura de estos niveles de medida se fijó para validar las medidas procedentes del sodar-doppler (Hinojosa, 2001).

La temperatura y la humedad relativa se mide con termistores que operan con una frecuencia de muestreo de 1 Hz. La dirección y el módulo del viento de los niveles inferiores (5 y 10 metros) se miden con anemómetros de hélice y veleta, con una frecuencia de muestreo de 1 Hz, mientras que en los niveles superiores se miden con anemómetros sónicos Gill 1012/S que trabajan con frecuencia de muestreo de hasta 60 Hz. Éstos suministran las medidas de las componentes del viento en ejes ortogonales almacenando datos cada segundo.

Los sensores están situados en brazos de 3 metros de longitud orientados en la dirección predominante del viento, hacia el sector NW, para que la influencia de la estructura de la torre produzca el mínimo efecto en la medida de las variables meteorológicas.

Todos los sensores suministran un voltaje analógico proporcional al valor de la variable. Las medidas obtenidas de los sensores viajan por cables hasta un convertidor que digitaliza la señal y almacena los datos en un PC Compac.

Tabla 4.1 Instrumentación desplegada en la torre meteorológica de 50 metros de Vilaseca.

Instrumento	z(m)	Frec. de muestreo (Hz)	Umbral	Precisión
Anemómetro sónico Solent	35, 50	1	15mm/s para u,v; 4mm/s para w	±3%
Anemómetro de hélice y veleta	5, 10	1	1.0 m/s	±3%
Termistor	5, 10, 35, 50	1		±0.1°C
Sensor de humedad	5, 10, 35, 50	1		±1%
Barómetro	0.5	1		±0.1hPa
Pluviómetro	0.5	1		±2mm
Radiómetro	0.5	1		±5-10%

Para garantizar la fiabilidad del sistema, los sensores se validaban sistemáticamente dos veces al año y los datos suministrados se analizaban a diario. A continuación expondremos el tratamiento de los datos que se ha aplicado para realizar el análisis microclimatológico de la capa superficial atmosférica.

### 4.3 Procesado de los datos

Para el análisis microclimatológico se ha dispuesto de las medidas procedentes de la torre meteorológica durante casi 4 años, desde junio de 1995 hasta noviembre de 1998. En este periodo de tiempo se han registrado 1220 días de datos en promedios de treinta minutos. El total de datos registrados para una sola variable ha sido de 58560 y en conjunto se han analizado 1229760 registros.

Durante este periodo de tiempo, tanto el sistema de adquisición como el de almacenamiento de datos han sufrido diversos problemas (cortes de corriente eléctrica, caída de un rayo, etc.). En consecuencia, las series temporales de las diferentes variables mostraban discontinuidades en el tiempo e irregularidades en sus valores, así que todas las variables meteorológicas registradas fueron validadas. Por esta razón, para realizar el análisis microclimatológico, se seleccionaron los datos, eliminando las impurezas de cada una de las variables. El filtrado de los datos provocó la exclusión de entorno al 5 % de los mismos. Además, como uno de los objetivos perseguido por el estudio microclimatológico era analizar los perfiles y la evolución diurna de la temperatura y el viento, se ha recurrido a una nueva selección de datos, prescindiendo de todas las medidas de estas variables en un tiempo determinado si alguno de los sensores del perfil fallaba o producía una irregularidad e idénticamente se ha operado si no se disponía de todos los datos de un día completo. De esta nueva selección se han tenido que eliminar entorno a un 10 % de los datos restantes.

Para desarrollar el análisis microclimatológico de la capa superficial atmosférica se ha recurrido a la estadística descriptiva y al análisis espectral.

- **Estadística descriptiva**

Una vez filtrados los datos, se ha estimado la evolución diaria de las variables meteorológicas en cada una de las estaciones del año. Con este fin, se ha calculado el valor medio de la variable de cada media hora utilizando únicamente los días completos con datos fiables. Estas mismas estimaciones se han utilizado para calcular los perfiles de las variables. Además, se han estimado la desviación típica, el sesgo<sup>1</sup> y la curtosis<sup>2</sup> de las diferentes distribuciones de probabilidad.

Con la intención de homogeneizar el estudio se han dividido las series meteorológicas según las cuatro estaciones del año. En meteorología es común dividir cada estación según la siguiente división mensual:

- Invierno: diciembre, enero y febrero
- Primavera: marzo, abril y mayo
- Verano: junio, julio y agosto
- Otoño: septiembre, octubre y noviembre

- **Análisis espectral**

Para completar el análisis microclimatológico de la capa superficial atmosférica se han estimado los espectros de potencia de las diferentes variables meteorológicas. Las técnicas de análisis espectral de las series temporales de las variables meteorológicas se han usado extensamente en muchos dominios de la meteorología y la climatología. Estas técnicas se centran en la transformada de Fourier, sección 3.3.1.

En la estimación del espectro de potencia de las señales estudiadas se ha eliminado la tendencia de las series, para que sus variaciones de amplitud fueran el objetivo real de estudio, sin enmascarse detrás de los valores absolutos de la variable.

El análisis espectral conlleva la estimación del espectro de potencia mediante la transformada de Fourier. Pero como los resultados podrían no ser suficientemente concluyentes por la naturaleza de la señal, también se ha recurrido al análisis espectral móvil (MSA) conjuntamente con la evaluación del nivel significativo real de los máximos espectrales mediante el análisis espectral móvil tipificado (MTSA), sección 3.3.1.2. En el caso de señales temporales que presentan algunas características no constantes en todo el intervalo estudiado es necesario analizar la evolución temporal del máximo espectral, porque en el supuesto de analizar exclusivamente la totalidad de la señal los máximos espectrales con duración limitada podrían permanecer ocultos o sobreestimados. Así, en base al análisis espectral móvil, Schonwiese (1987), se han estimado los espectros de potencia en ventanas temporales de cadencia y longitud constante, pudiéndose observar si las características espectrales permanecían iguales o no con el tiempo, así como la intensidad de las mismas.

No obstante, la sensibilidad del nivel significativo de ruido debe tenerse en cuenta y, por tanto, la amplitud relativa de los máximos espectrales con la señal de entrada (Rodríguez, 1995; Buenestado et al., 1998). En consecuencia, y para evitar conclusiones

---

<sup>1</sup> El sesgo es el tercer momento centrado respecto a la media de la distribución normalizado con el cubo de la desviación estándar e informa de la desviación de la distribución de probabilidad de la serie, tal que un valor positivo (negativo) del sesgo indica que la distribución está desviada a la izquierda (derecha) del valor medio.

<sup>2</sup> La curtosis es el cuarto momento centrado respecto a la media de la distribución normalizado con la cuarta potencia de la desviación estándar e informa del apuntamiento de la distribución de probabilidad de la serie, tal que valores mayores (menores) de 3 de la curtosis indica que la distribución tiene una forma más (menos) apuntada que la distribución normal.

equivocadas basadas en espectros no comparables, introducimos en el análisis espectral móvil la tipificación de los espectros, es decir el análisis espectral móvil tipificado (MTSA). De esta manera se consigue una evolución temporal de los espectros de potencia comparables entre sí, independientemente de la señal de entrada.

Para estimar el espectro mediante el análisis espectral móvil tipificado se divide el período total analizado, que comprende 500 días, en ventanas temporales de una longitud constante de 166 días, correspondiente a una tercera parte del periodo total de la serie, y una cadencia de 16 días aproximadamente, que corresponde a un 10% de la longitud de la ventana, para conseguir un 90% de solapamiento entre ventanas. Para cada ventana se estima el espectro tipificado. Los resultados se representan en un campo escalar de espectros de energía asociados, llamado escalograma. Este tipo de análisis permite apreciar los picos importantes y su evolución temporal, a lo largo de las diferentes ventanas.

#### 4.4 Análisis de la temperatura en la capa superficial

En este apartado estudiaremos la variación diurna, el perfil y el gradiente vertical, la distribución de frecuencias y el espectro de la temperatura del aire en la capa superficial.

##### 4.4.1 Variación diurna de la temperatura

La variación diurna de la temperatura potencial nos muestra la evolución media de la variable durante 24 horas. Para estimarla se calcula la temperatura potencial media en un momento determinado del día, promediando sobre todos los días completos de las series. La Figura 4.3 presenta la variación diurna media de la temperatura potencial de cada estación del año en la capa superficial para los cuatro niveles de medida. Con el fin de mostrar un mejor contraste entre las diferentes estaciones, cada gráfico de la Figura 4.3 están idénticamente escalados.

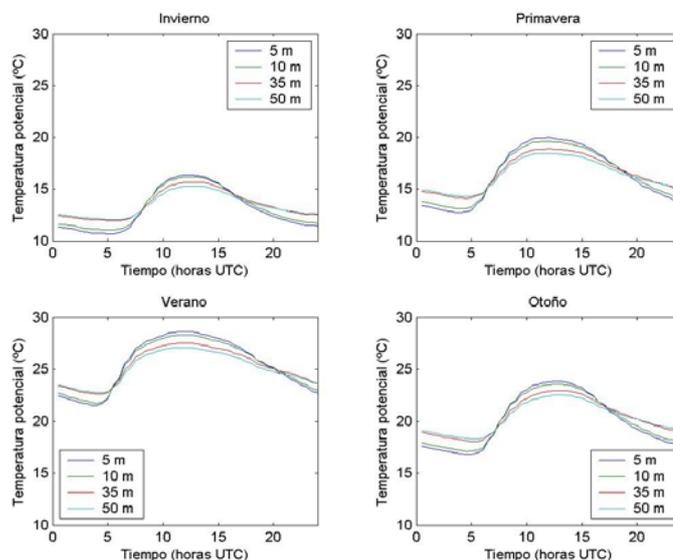


Figura 4.3 Evolución diaria media de la temperatura potencial de cada estación del año en la capa superficial atmosférica.

En las representaciones de la Figura 4.3 se observa un claro ciclo diurno, alcanzando su máximo a las 12 horas UTC y el mínimo al alba, independientemente de la estación del año. La evolución diurna de la temperatura no presenta simetría, es decir, la variación temporal, o la pendiente de la curva, no es igual en el orto que en el ocaso. Al amanecer, con la temperatura en su valor mínimo, en cualquier estrato de la capa superficial, el

calentamiento solar es más intenso que el enfriamiento del anochecer, como veremos en el siguiente apartado.

Durante el día la temperatura es más alta en las proximidades del suelo debido a la convección producida por el calentamiento terrestre al absorber radiación solar. En cambio, durante la noche la temperatura es menor en los niveles inferiores, debido al enfriamiento radiativo producido en la superficie y provocando la inversión superficial nocturna.

La inversión de radiación es especialmente importante en invierno, debido a su extensa duración, ocupando dos tercios de un día típico. En consecuencia no se aprecia un gran calentamiento de la capa superficial durante el día debido a la menor irradiancia, provocando una rápida inversión de la temperatura tras la puesta de sol. También se observa un ciclo diurno más suave, que en el resto de estaciones, indicando una menor oscilación térmica diurna.

En verano la inversión nocturna es de corta duración, la convección diurna es importante, por la alta irradiación solar y el mayor número de días despejados que se aprecian en esta estación. Además, la oscilación térmica diurna es superior a la del resto de estaciones.

Para analizar la intensidad de la inversión nocturna y la convección diurna estudiamos los perfiles y el gradiente vertical de la temperatura, que presentamos en la siguiente sección.

#### 4.4.2 Perfiles verticales de temperatura

A partir de los registros de temperatura de los cuatro niveles de la torre meteorológica se han estimado los perfiles verticales medios horarios de la temperatura potencial de cada estación del año. La Figura 4.4 muestra los resultados del estudio. Con el fin de mostrar un mejor contraste entre las diferentes estaciones, cada uno de los gráficos de la Figura 4.4 están idénticamente escalados y presentan los perfiles estimados desde las 3 hasta las 24 horas UTC, en intervalos de 3 horas.

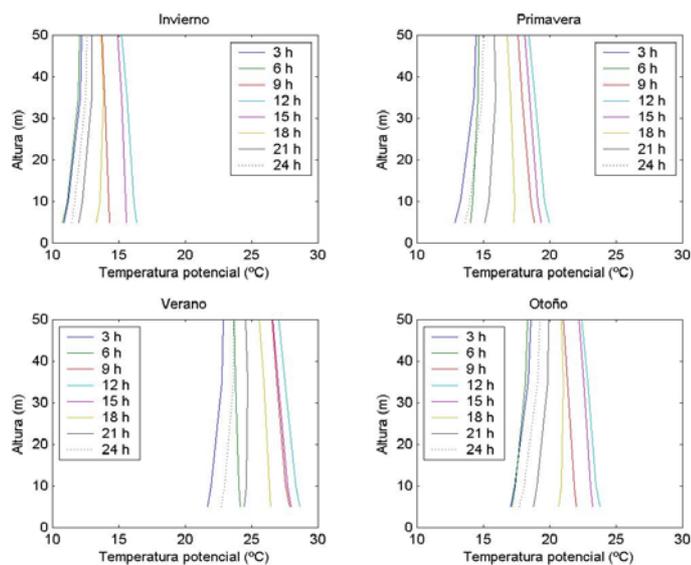


Figura 4.4 Perfiles medios de la temperatura potencial de cada estación del año en intervalos de 3 horas. La leyenda muestra las horas UTC del perfil correspondiente.

Del análisis de los perfiles de temperatura potencial se extraen los siguientes aspectos:

- Los perfiles nocturnos muestran estabilidad en todos los estratos, reflejando la inversión de radiación nocturna, como por ejemplo el perfil de las 3 horas UTC en todas las estaciones. La inversión se profundiza a lo largo de la noche hasta el amanecer.
- Los perfiles diurnos muestran inestabilidad en todos los estratos, perfiles superadiabáticos, reflejando la convección, como por ejemplo el perfil de las 12 horas UTC en todas las estaciones. La pendiente de los perfiles diurnos aumenta durante la mañana hasta llegar a su máximo a las 12 horas UTC, después se mantiene el perfil superadiabático hasta la caída de la tarde.
- Los perfiles correspondientes a las transiciones día-noche y noche-día muestran neutralidad o cambio de estratificación en altura, como por ejemplo el perfil de las 18 horas UTC en invierno y en otoño, donde se aprecia la inversión nocturna en el estrato inferior, neutralidad en el estrato intermedio e inestabilidad en el estrato superior.
- En general, en los perfiles superadiabáticos o subadiabáticos se observa que la intensidad de la estratificación disminuye con la altura.
- En contraste, los perfiles nocturnos tienen, en valor absoluto, una pendiente menor que los diurnos.

El principal interés del estudio de los perfiles de temperatura es observar como varía ésta con la altura, es decir si la temperatura aumenta o disminuye en cada uno de los estratos, estimando la estabilidad de la capa superficial atmosférica. Para analizarla es útil trabajar con el gradiente geométrico de la temperatura, ecuación 4.1. En el siguiente apartado estudiaremos el comportamiento de dicho parámetro durante el año en cada uno de los estratos de la torre meteorológica de Vilaseca.

#### • Caracterización anual del gradiente geométrico de la temperatura

La magnitud que determina la pendiente del perfil de la temperatura se denomina gradiente geométrico o vertical de la temperatura y se define como

$$\alpha = -\frac{\partial T}{\partial z} \approx -\frac{\Delta T}{\Delta z} \quad (4.1)$$

cuyas unidades se expresan en grados/hm. En el caso particular de que el perfil sea adiabático el valor del gradiente vertical de la temperatura es  $\alpha = \gamma = 0.98 \text{ }^\circ\text{C/hm} \approx 1^\circ\text{C/hm}$ . A partir de éste se determina el tipo de estabilidad de las capas:

$\alpha > \gamma$  **estratificación inestable:** indica que la temperatura potencial disminuye con la altura, que se corresponde con un perfil superadiabático, característico de los perfiles diurnos en la capa superficial.

$\alpha = \gamma$  **estratificación indiferente o neutral:** indica que el estrato es adiabático, común en las transiciones día-noche y noche-día y en situaciones de mucho viento.

$\alpha < \gamma$  **estratificación estable:** indica que la temperatura potencial aumenta con la altura, que se corresponde con un perfil subadiabático, característico de la inversión nocturna.

Una variante del gradiente térmico nos la presenta Scorer (1958) definiendo la estabilidad estática<sup>3</sup>  $S$ , que representa la fuerza por unidad de masa que actúa sobre una partícula cuya temperatura potencial  $\Theta$  difiere un  $\Delta\Theta$  respecto al entorno siendo desplazada un  $\Delta z$ , como

<sup>3</sup> Aunque hemos presentado la estabilidad estática en esta sección, no la hemos utilizado en la caracterización térmica anual. En cambio, nos hemos apoyado en  $S$  para estimar los parámetros turbulentos en la sección 5.3.

$$S = - \frac{g}{\Theta} \frac{\Delta\Theta}{\Delta z} \quad (4.2)$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad. Al igual que el gradiente térmico, la estabilidad estática también presenta un signo negativo en oposición a  $\Delta z$ . Las condiciones atmosféricas se definen estables, neutrales o inestables de acuerdo a si los valores de  $S$  son negativos, cero o positivos, respectivamente.

En esta sección se analizan los valores del gradiente geométrico de la temperatura calculados en la torre meteorológica de Vilaseca, durante el periodo 1995-98, en sus tres estratos: 5-10, 10-35 y 35-50 metros. Para cumplir este objetivo se utilizan los valores medios semihorarios del gradiente vertical de la temperatura de los tres estratos de cada día y se estima el campo escalar medio anual. Los resultados se presentan en la Figura 4.5, donde también se han representado las líneas del orto y el ocaso, para reflejar el comportamiento diurno y nocturno de  $\alpha$ . Se ha considerado conveniente escalar los tres campos con la misma graduación para enfatizar el contraste entre los estratos. Además, para la construcción de los campos escalares se ha considerado oportuno, por continuidad y para evitar el efecto frontera en la estimación, ampliar la ventana presentada.

Con la caída de la tarde los estratos inferior e intermedio muestran una rápida inversión, mientras que en el estrato superior sucede más lentamente. Durante la noche el gradiente se intensifica gradualmente, mostrando la existencia de la inversión nocturna de temperatura, llegando a su valor extremo poco antes del alba. Con la salida del sol  $\alpha$  cambia de signo, en todos los estratos, mostrando la convección, llegando al máximo del gradiente al mediodía. La estratificación es inestable favoreciendo la mezcla y la dispersión.

Los valores positivos más grandes del gradiente se observan durante las horas centrales del día en verano y los valores más negativos suceden durante las noches, poco antes del amanecer, en invierno. El rango de valores del gradiente de temperaturas oscila entre  $-10$  y  $6^\circ\text{C}/\text{hm}$  en término medio. En cambio, los valores individuales varían entre  $-60$  y  $20^\circ\text{C}/\text{hm}$  en el estrato inferior, que es el de mayor variabilidad. Cabe esperar que por debajo de los estratos estudiados, a menos de 5 metros de altura, se obtendrían intensidades aún mayores.

Otra característica destacable es que se aprecia una mayor homogeneidad durante el día que durante la noche. Las superficies concéntricas de la Figura 4.4 entre la salida y la puesta de sol son evidentes a lo largo de todo el año, mientras que por la noche existe heterogeneidad y una menor simetría de las curvas de nivel.

El segundo estrato muestra bastante similitud con el inferior. La mayor diferencia se aprecia en su menor rango de valores, oscilando entre  $-6$  y  $2^\circ\text{C}/\text{hm}$ , en término medio, como consecuencia de que el estrato se encuentra más alejado del suelo, fuente principal de la transferencia de calor entre la superficie y la atmósfera. En comparación con el estrato inferior, destaca la desaceleración del cambio de signo que sufre  $\alpha$ . Aunque los máximos también se obtienen en las horas centrales del día, cuando el sol se pone (sale) en el estrato intermedio se ralentiza el enfriamiento (calentamiento).

En el estrato superior, el comportamiento es similar al de los estratos inferiores, salvo en la hora de formación de la inversión de radiación, ya que presenta un considerable retardo respecto a los estratos inferiores, especialmente en verano. La causa física se debe, principalmente, al proceso de formación de la inversión, ya que el enfriamiento empieza por las capas de aire más cercanas al suelo, aumentando progresivamente, y no de manera inmediata. Consecuentemente, la altura de la capa de inversión de superficie evoluciona durante la noche. Por el contrario, en la transición noche-día, la inversión se rompe aceleradamente con la salida del sol, debido al predominio del calentamiento solar

sobre el enfriamiento radiativo terrestre. El rango de valores de  $\alpha$  disminuye con la altura. En el estrato superior se aprecian valores comprendidos entre  $-3$  y  $2^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ . La intensidad del gradiente geométrico depende, en gran medida, de la época del año como consecuencia de la variabilidad de la irradiancia solar incidente.

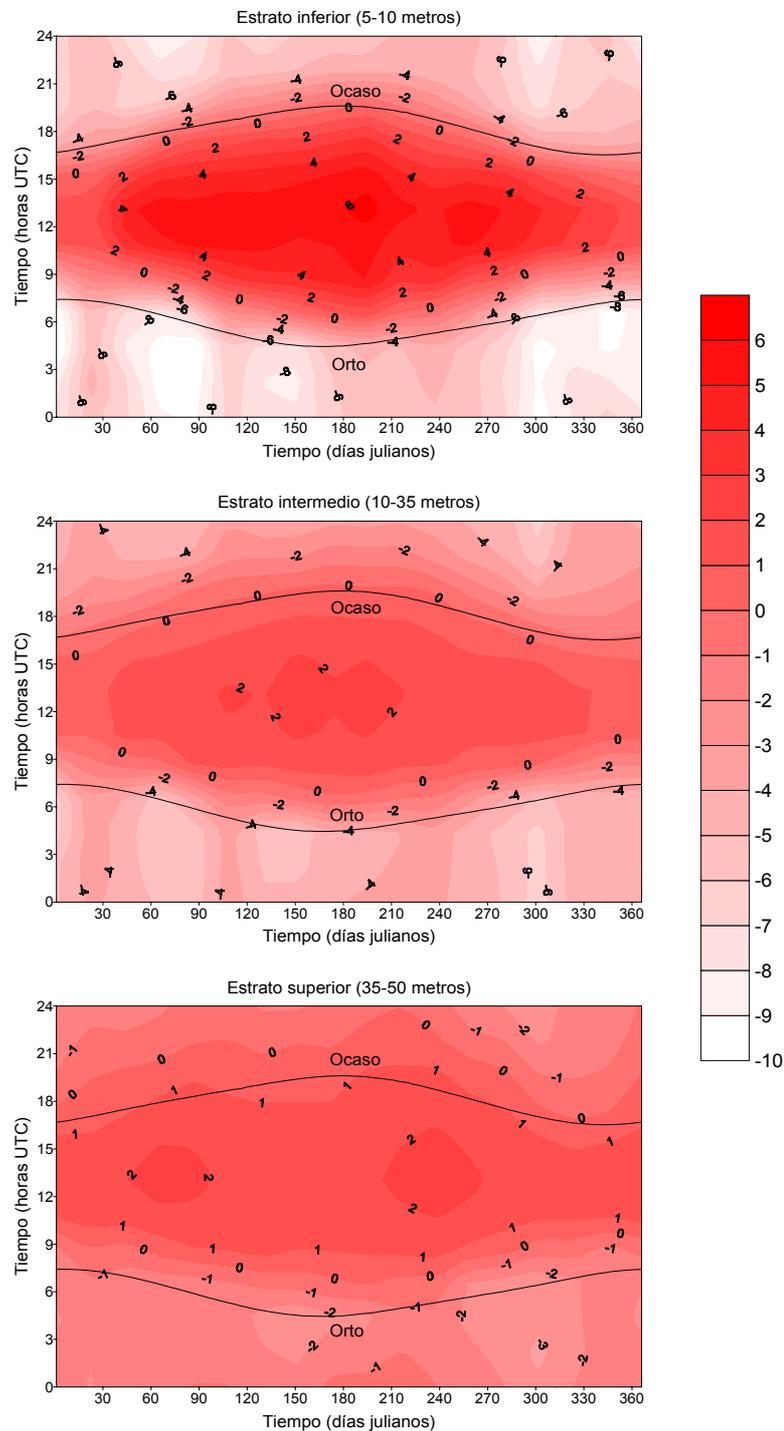


Figura 4.5 Gradiente geométrico de la temperatura de cada estrato de la capa superficial atmosférica. De arriba a abajo: estrato inferior 5-10 metros, estrato intermedio 10-35 metros, estrato superior 35-50 metros. Las líneas negras corresponden a la salida y a la puesta del sol. A la derecha se muestra la graduación de las superficies de nivel.

La mayor influencia del sol en su salida frente a la puesta, se aprecia en la mayor densidad de isolíneas de gradiente de temperatura del orto frente a las del ocaso. En particular, el valor de  $\alpha = 1^{\circ}\text{C}/\text{hm}$  después de la salida del sol indica el rompimiento de la inversión nocturna y la transición de estratificación estable a neutral y posteriormente a inestable, mientras que en las proximidades del ocaso indica el inicio de la formación de la inversión y, consecuentemente, la transición de estratificación inestable a estable. En el siguiente apartado vamos a estimar la hora a la que ocurren estos dos sucesos durante el año.

#### • Evolución anual de la estratificación en la capa superficial

Una de las aplicaciones del estudio de los perfiles de temperatura es determinar la altura de la capa estable nocturna, definida en la literatura por  $h$ . La importancia de esta altura se encuentra a la hora de estudiar la dispersión de contaminantes. La polución en condiciones estables es muy difícil de dispersar, debido a la restricción que provoca en los movimientos verticales. En consecuencia, con una capa estratificada estable y un aire contaminado existe la posibilidad de riesgo natural.

Un criterio para determinar esta altura es el térmico, basado en el gradiente vertical de temperaturas, siendo la altura  $h$  el nivel donde el gradiente térmico es adiabático o el perfil vertical de la temperatura potencial es prácticamente constante.

Para cada día del período 1995-98 se ha calculado la hora a la que la altura de la capa estable es superior a 50 metros, longitud máxima de la torre meteorológica. Aplicando el método de los mínimos cuadrados a los datos obtenemos un ajuste temporal que pronostica para cada día la hora en la que la inversión supera los 50 metros. Idénticamente se ha realizado la misma operación para la estratificación inestable, determinando así el momento en el que la capa de mezcla supera los 50 metros. Los resultados se presentan en la Figura 4.6, donde también hemos incluido las líneas del orto y el ocaso.

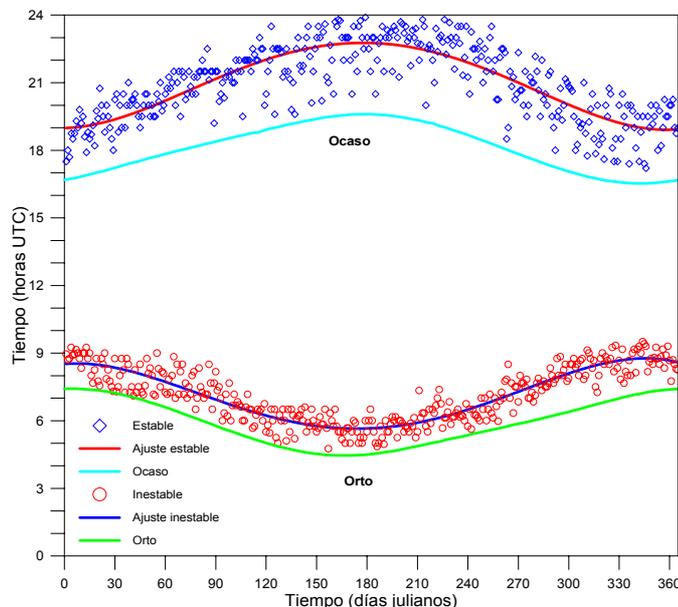


Figura 4.6 Ajuste de la hora en que la estratificación estable e inestable superan los 50 metros de altura durante el año. El eje horizontal representa el día juliano y el eje vertical la hora del día (en horas UTC).

Para el cálculo de las curvas estimadas de cambio de estratificación en la capa superficial se ha considerado conveniente un ajuste polinómico de cuarto grado. Los resultados se

muestran en las ecuaciones 4.3 y 4.4. Los coeficientes de correlación cuadrados de la regresión que regulan la bondad del ajuste valen 0.92 en la transición de estable a inestable y 0.68 en la transición inversa. Esta diferencia se apoya en el hecho de que existe una menor dispersión en el primer caso.

Ajuste para la estratificación inestable:

$$t = 8.5 + 0.6d - 3.9d^2 + 1.9d^3 - 0.2d^4 \quad (4.3)$$

Ajuste para la estratificación estable:

$$t = 19 + 0.1d + 3.8d^2 - 2.0d^3 + 0.2d^4 \quad (4.4)$$

donde  $t$  representa la hora en unidades UTC y  $d$  el día juliano. Esta variable está escalada por 0.01 para que los coeficientes de los polinomios sean mejor entendidos. Es reseñable la casi idéntica magnitud, en valor absoluto, de ambos polinomios de los coeficientes que acompañan a los términos de segundo, tercer y cuarto grado, mostrando la semejanza en la curvatura de ambos ajustes.

Los resultados muestran una mayor proximidad entre el orto y la superación de la capa en estratificación inestable. Con un desfase de entorno a una hora a lo largo del año, mientras que en la estabilidad la inversión tarda más de dos horas en consolidarse por encima de los 50 metros después del ocaso.

Además, la estratificación estable presenta una oscilación superior a la inestable. Mientras ésta se presenta casi equidistante al orto aquella varía aumentando su distancia en verano y disminuyendo en invierno con respecto al ocaso. En invierno, la altura de la capa estable, por término medio, es superior a 50 metros a las 19 horas UTC y, en cambio, en verano ocurre a las 23 horas UTC.

Estos resultados son de gran utilidad para los estudios de impacto ambiental, cuando las fuentes emisoras que se consideran son superficiales, es decir, con una altura efectiva inferior a 50 metros.

#### 4.4.3 Distribución de frecuencias de la temperatura

Para calcular la distribución de frecuencias de la temperatura se han analizado todos los datos de cada nivel por estación, recogiendo las temperaturas en intervalos de 2°C. Las gráficas de distribución de probabilidad de temperatura se presentan en la Figura 4.7 y los estadísticos en la Tabla 4.2.

Observando la Figura 4.7 se percibe una gran similitud entre los dos niveles inferiores, al igual que en los dos superiores. También se aprecia un mayor apuntamiento en las estaciones extremas, consiguiéndose en invierno y en verano los máximos de probabilidad para el valor modal correspondiente. Por el contrario, en otoño y en primavera se constata una mayor dispersión de temperaturas. Se observa que el valor modal de las distribuciones para cada una de las estaciones es casi constante en altura, con valores de 14°C en invierno, 16°C en primavera, 26°C en verano y 20°C en otoño.

En la Tabla 4.2 se presentan los principales estadísticos calculados de las diferentes distribuciones. En ella se aprecia que la dispersión disminuye con la altura en todas las estaciones. Siendo la primavera y el otoño las estaciones más variables.

El apuntamiento aumenta con la altura, salvo en otoño, donde encontramos mucha similitud en todos los niveles de la capa superficial. En general, los niveles inferiores presentan distribuciones platicúrticas, representado por un valor de la curtosis inferior a 3, mientras que los superiores son leptocúrticas, salvo en otoño. El aumento del apuntamiento de las distribuciones en altura se debe a que la oscilación térmica es mayor cuanto más cerca del suelo se encuentre el nivel de medida. En cuanto al sesgo, se aprecia un ligero desvío de las distribuciones hacia la derecha del valor medio, salvo en primavera. Las distribuciones son ligeramente sesgadas, aumentando la desviación de la distribución respecto de la media con la altura, salvo en otoño.

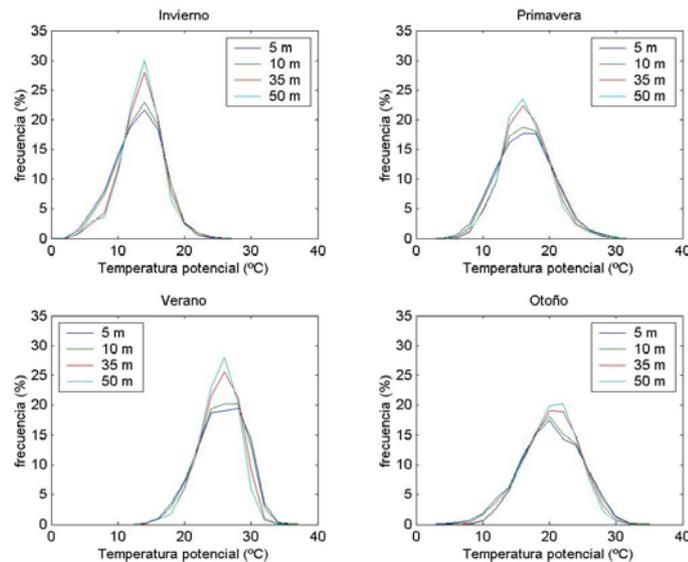


Figura 4.7 Distribución de frecuencias de la temperatura potencial de cada estación en la capa superficial atmosférica.

Tabla 4.2 Estadísticos de la temperatura potencial de la capa superficial.

Estadísticos	Altura (m)	Media (°C)	Desviación estándar (°C)	Curtosis	Sesgo
Invierno	5	13.08	3.63	2.87	-0.12
	10	13.23	3.48	2.91	-0.14
	35	13.53	3.10	3.46	-0.23
	50	13.43	3.00	3.75	-0.34
Primavera	5	16.42	4.18	2.87	0.18
	10	16.46	3.97	2.91	0.20
	35	16.54	3.54	3.11	0.24
	50	16.38	3.47	3.21	0.26
Verano	5	25.48	3.57	2.59	-0.34
	10	25.43	3.42	2.67	-0.36
	35	25.31	3.03	3.11	-0.46
	50	25.09	2.90	3.32	-0.52
Otoño	5	20.07	4.58	2.78	-0.18
	10	20.16	4.38	2.77	-0.17
	35	20.41	3.90	2.67	-0.13
	50	20.33	3.73	2.69	-0.16

#### 4.4.4 Análisis espectral de la temperatura

Para completar el análisis microclimatológico de la temperatura en la capa superficial atmosférica se ha estimado el espectro de potencia y el espectro móvil tipificado de la temperatura con el objetivo de determinar sus posibles sucesos ondulatorios. La serie de temperatura analizada corresponde a un periodo temporal que comprende desde noviembre de 1996 hasta febrero de 1998, Buenestado et al. (1998).

- **Espectro de potencia**

La Figura 4.8 muestra el periodograma obtenido al analizar la serie de la temperatura del aire. El eje vertical representa la energía espectral en decibelios y el horizontal representa la frecuencia espectral en unidades de hora<sup>-1</sup> expresada en escala logarítmica.

La Figura 4.8 revela un pico de energía relevante entorno a una frecuencia de 0.042 horas<sup>-1</sup>. Que equivale a una oscilación con un periodo de 24 horas. En la gráfica hemos indicado con un 1 sobre la curva dicho máximo espectral. Esta oscilación se corresponde con la hallada en la evolución diurna presentada en la sección 4.4.1. Este resultado representa el espectro de toda la serie explorada. Como también nos interesa comprobar si a lo largo de toda la serie el máximo de energía es relevante, a continuación estimamos el espectro móvil tipificado.

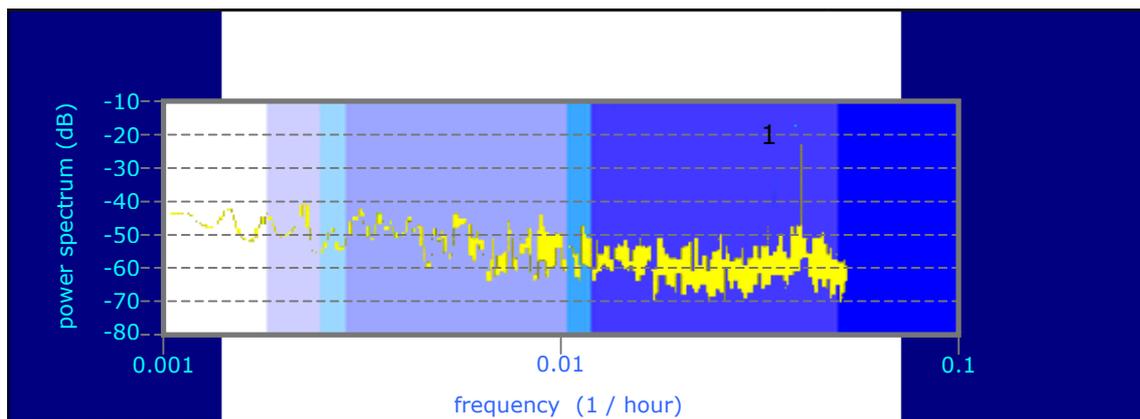


Figura 4.8 Espectro de potencia estimado de la temperatura en la capa superficial. El eje vertical representa la energía espectral expresada en decibelios y el horizontal la frecuencia de muestreo en hora<sup>-1</sup>. El número 1 sobre el espectro denota el pico más relevante e indica que existe una oscilación diurna de la temperatura.

- **Análisis espectral móvil tipificado**

El análisis del espectro móvil tipificado de la temperatura del aire se muestra en la Figura 4.9. El eje horizontal representa el tiempo, donde los valores del eje indican el valor del extremo inferior de la ventana de la transformada de Fourier que se ha utilizado. El eje vertical representa la frecuencia en horas<sup>-1</sup>. El campo escalar subsiguiente corresponde a la energía espectral tipificada, capítulo 3. Recordemos que la tipificación del espectro nos permite comparar los espectros contrastando la intensidad de los picos según el número de unidades  $\sigma$ , desviación estándar, que se distancian del nivel de ruido medio de la señal,  $z=0$ . Así, los picos de energía con un nivel de confianza superior al 99% serán aquellos que disten tres veces la desviación estándar,  $z=3$  en la Figura 4.9

En la Figura 4.9 observamos el predominio, a lo largo del tiempo, del máximo espectral equivalente al periodo de un día. Este máximo aparece en todas las ventanas analizadas de la serie de la temperatura del aire. En consecuencia, la serie de temperatura muestra una clara oscilación diurna durante todo el año. La zona inferior, que también denota un pico de energía, corresponde a los lóbulos centrales de los espectros estimados, que

forman parte del aparato matemático y no son representativos de máximos espectrales. En resumen, los resultados muestran valores relativamente grandes de energía centrados en un período de un día, mientras que el resto no es significativo.

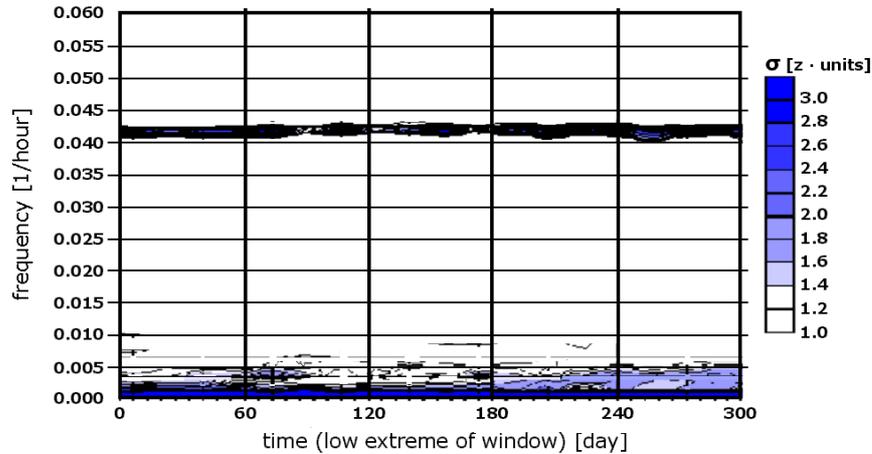


Figura 4.9 Análisis espectral móvil tipificado de la temperatura en la capa superficial. El eje horizontal representa la ventana de tiempo de la transformada de Fourier estimada, el eje vertical representa la frecuencia y las curvas de nivel son las estimaciones del espectro normalizado. Se puede apreciar un pico de energía sobresaliente del resto en todas las ventanas, con una frecuencia de  $0.042 \text{ horas}^{-1}$ , equivalente a un ciclo diario de 24 horas.

## 4.5 Análisis del viento en la capa superficial

En este apartado estudiaremos los perfiles, las variaciones diurnas, las distribuciones de frecuencia y los espectros de potencia del módulo y de la dirección del viento en la capa superficial atmosférica.

### 4.5.1 Variaciones diurnas del viento

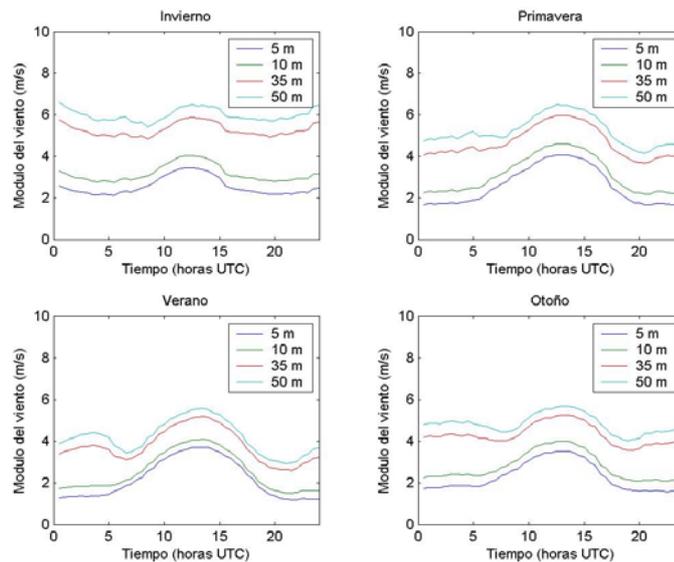


Figura 4.10 Evolución diurna típica de la velocidad del viento en la capa superficial.

La evaluación del viento presenta grandes variaciones de un día a otro, debido a los cambios en la situación sinóptica y a los procesos de mesoescala. Para entender mejor las variaciones diurnas es aconsejable realizar promedios temporales de series largas de datos (del orden de meses).

La Figura 4.10 y la Figura 4.11 muestran la evolución diurna del módulo y de la dirección media, respectivamente, de cada estación del año en la capa superficial atmosférica. En ellas se aprecia el ciclo diurno del viento.

Del análisis de la evolución diurna del módulo del viento, Figura 4.10, se extraen los siguientes aspectos:

- Existe un ciclo diurno en todos los niveles.
- Destaca la alta correlación existente entre los dos niveles inferiores y también entre los dos superiores.
- En el estrato inferior, al alba, el módulo del viento empieza a aumentar progresivamente hasta llegar a su máximo sobre las 12 horas UTC, con un valor de unos 4 m/s. Después del mediodía, cuando la convección empieza a debilitarse, el módulo del viento decrece a un ritmo superior hasta la puesta de sol. Durante la noche no existen apreciables variaciones de viento, salvo en invierno, donde se aprecia un leve máximo nocturno a las 24 horas UTC.
- En el estrato superior se aprecia un comportamiento similar durante el día, por el contrario durante la noche se puede distinguir una ligera oscilación.
- Las transiciones día-noche también se observan en altura. La velocidad del viento cerca de la superficie crece bruscamente con la salida del sol, seguido de un amplio máximo al mediodía y decrece bruscamente con la puesta de sol. El crecimiento en la intensidad de los vientos de superficie siguiendo a la ruptura de la inversión matinal se debe a la transferencia de momento más rápida y eficientemente por efecto de la turbulencia de origen convectivo.
- La oscilación diurna es mayor en el estrato inferior durante el día. Mientras que durante la noche es el estrato superior el que varía más.

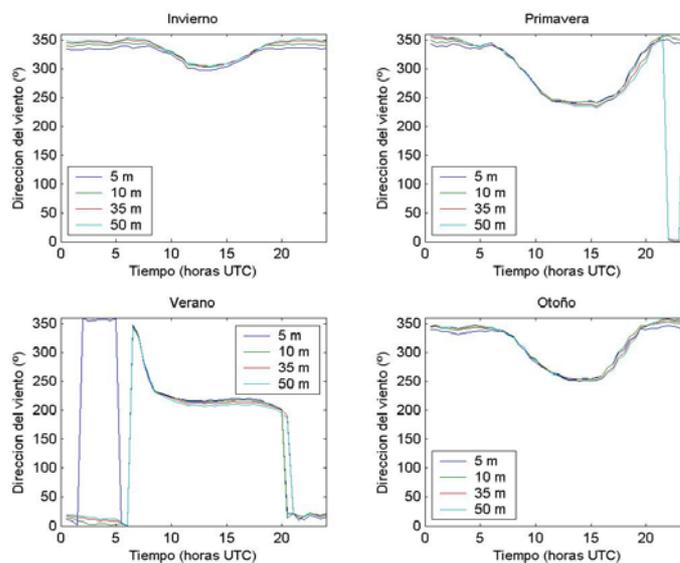


Figura 4.11 Evolución diurna típica de la dirección del viento en la capa superficial.

Del análisis de la evolución diurna de la dirección del viento, Figura 4.11, se extraen los siguientes aspectos:

- Por la noche se observa un predominio total de la componente norte para todas las estaciones y niveles. Además se aprecia que durante la noche la cizalla es ligeramente mayor que la que ocurre durante el día.

- Durante el invierno, en los niveles altos hay un considerable aumento del módulo del viento, Figura 4.10, debido a la gran influencia de los fuertes vientos procedentes del sector NW, como muestra la Figura 4.11, de carácter sinóptico. Que este aumento no quede reflejado en los niveles bajos puede ser debido al efecto de rozamiento por su proximidad al suelo.
- Excepto para el invierno, es importante destacar la presencia de la brisa marina durante las horas centrales del día, más pronunciada en verano y de forma más persistente, con una duración de más de 10 horas, coincidiendo con los resultados de Hinojosa (2001).

La evolución diurna del viento nos permite observar la existencia de cizalla en la capa superficial, para apreciar mejor dicho aspecto recurrimos a los perfiles de viento que mostramos en la siguiente sección.

#### 4.5.2 Perfiles de viento

A partir de los registros de viento de los cuatro niveles de la torre meteorológica se han estimado los perfiles verticales medios horarios del módulo y la dirección del viento de cada estación del año en Vilaseca. Para ilustrar este apartado, en las figuras 4.12 y 4.13 se presentan los perfiles medios del viento en intervalos de tres horas del módulo y la dirección, respectivamente. Con el fin de mostrar un mejor contraste entre las diferentes estaciones, cada uno de los gráficos, están idénticamente escalados, y presentan los perfiles estimados durante el día, en intervalos de 3 horas.

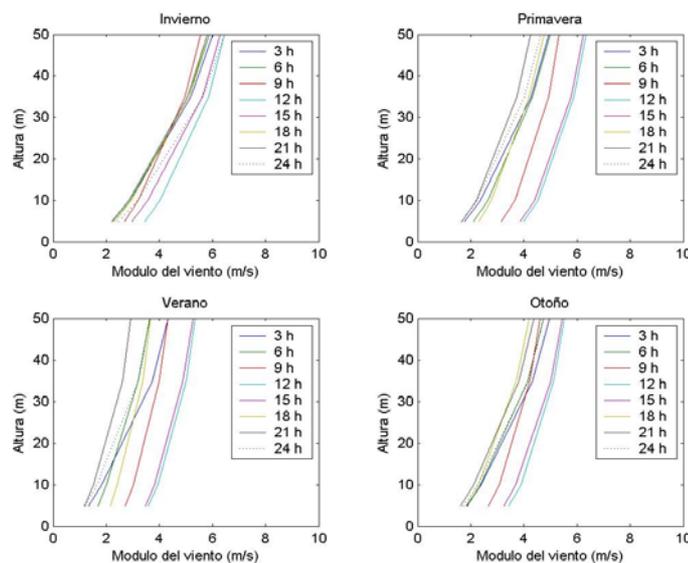


Figura 4.12 Perfiles medios del módulo del viento de cada estación del año en intervalos de 3 horas en la capa superficial atmosférica.

Del análisis de los perfiles del módulo del viento, Figura 4.12, se pueden extraer los siguientes aspectos:

- En la capa superficial atmosférica el módulo del viento aumenta con la altura. Así, la cizalla es mayor en las proximidades del suelo, como indica la pendiente de los perfiles. Por este motivo, la literatura presenta ajustes semilogarítmicos para estimar el comportamiento del módulo del viento con la altura (Hogstrom, 1988; Stull, 2000).
- La pendiente de los perfiles nocturnos es ligeramente inferior a las presentadas por los diurnos, debido a la convección térmica.

- En primavera, verano y otoño se aprecian mejor las diferencias entre los perfiles diurnos y los nocturnos. El invierno es la estación del año que presenta una mayor cizalla en el módulo, con fuertes vientos en los niveles superiores y débiles en la superficie. Existiendo una gran similitud entre los perfiles diurnos y los nocturnos.
- Cuando los perfiles diurnos y los nocturnos son muy similares en magnitud se pone de manifiesto la influencia de las condiciones a gran escala. En consecuencia, las estaciones que registran más dicha influencia son el otoño y el invierno. Por el contrario, primavera y verano reflejan mayormente la influencia de carácter mesoescálico.
- El estudio de los perfiles neutrales de la torre meteorológica nos permitió estimar el parámetro de rugosidad aerodinámico, encontrando un valor aproximado de 0.02 metros en el área experimental. La metodología utilizada para estimar dicho valor se basa en la selección de todos los perfiles de viento en situaciones de neutralidad, que se asume que tienen un perfil logarítmico, calculando para cada uno de ellos la altura en la que el viento se anula. La media del conjunto obtenido corresponde al parámetro de rugosidad dinámico.

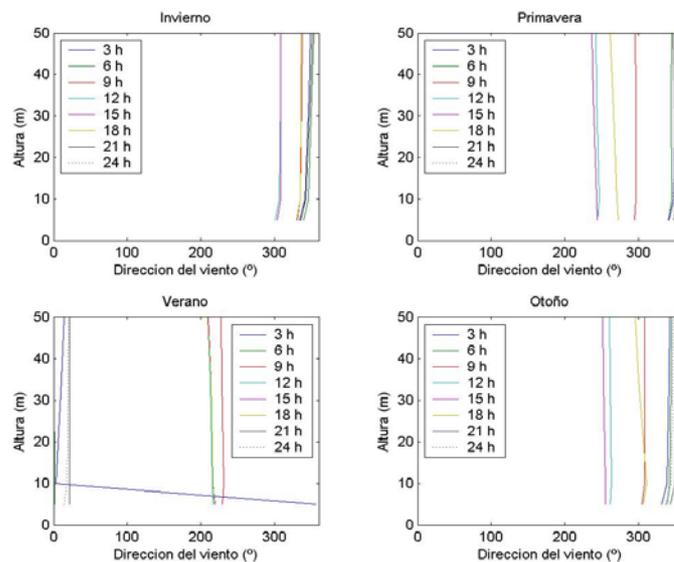


Figura 4.13 Perfiles medios de la dirección del viento de cada estación del año en intervalos de 3 horas.

Del análisis de los perfiles de la dirección del viento, Figura 4.13, se pueden extraer los siguientes aspectos:

- En general, la dirección del viento presenta una gran invarianza en altura, a excepción de una ligera desviación en el estrato inferior, provocada por la rugosidad superficial.
- En invierno se aprecia que la dirección predominante es del NW, tanto de día como de noche, indicando el predominio de las situaciones sinópticas.
- Existe una gran similitud en el compartimiento de los perfiles en primavera y en otoño, durante el día predomina el sector Oeste, que es el resultado de la presencia de brisa, sector SW, compuesta con las situaciones de poniente, del sector NW. Mientras que por la noche domina el sector N-NW.
- En verano se aprecia marcadamente las diferencias entre los perfiles diurnos y nocturnos, dominando las situaciones de mesoescala. Situándose los diurnos en el sector SW, que refleja la influencia de la brisa marina, y los nocturnos en el sector NE, que muestra la presencia de terrales y vientos orográficos.

- Por la noche, el viento es predominantemente del Norte, con una leve componente del Oeste en todas las estaciones, excepto en verano, que muestra cierta componente del Este. En cambio, durante el día se distinguen 3 direcciones, según la estación en estudio. Así, en invierno, el viento medio diario procede del Noroeste, en verano del Suroeste y en primavera y otoño del Oeste. Como vemos, existe una alta correlación entre el número de horas de sol y la componente Sur del viento.

En esta sección se ha analizado el viento medio de la capa superficial, para complementarlo estudiamos la distribución de frecuencias que presentamos en la siguiente sección.

### 4.5.3 Distribución de frecuencias del viento

En esta sección analizaremos la distribución de frecuencias del módulo del viento y la rosa de viento.

- **Módulo del viento**

En la Figura 4.14 presentamos las distribuciones de frecuencia del módulo del viento en la capa superficial atmosférica de cada estación del año en intervalos de 0.5 m/s. La Tabla 4.3 muestra los estadísticos resultantes de cada distribución.

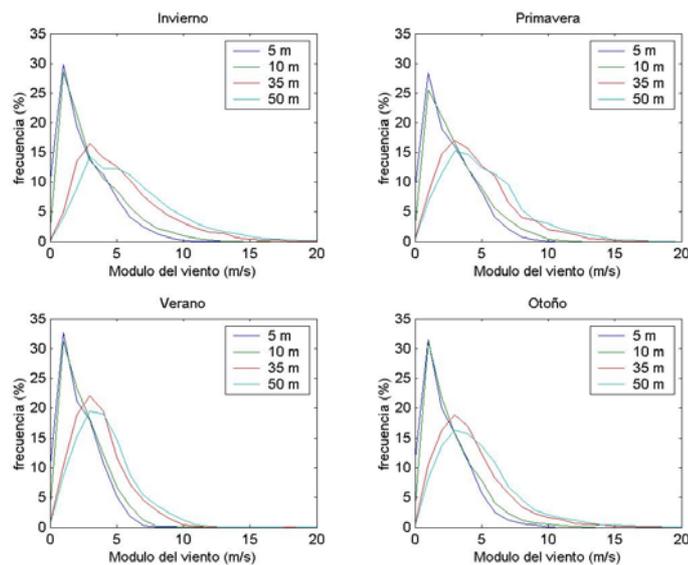


Figura 4.14 Distribución de frecuencias del módulo del viento de cada estación en la capa superficial atmosférica.

Según observamos en la Tabla 4.3 la media del módulo del viento aumenta con la altura, al igual que ocurre con la moda en la Figura 4.14. Los valores de la desviación estándar también muestran una mayor dispersión en los niveles superiores que en los inferiores. Todas las distribuciones son leptocurticas, altamente apuntadas en comparación con una distribución normal y sesgadas hacia la izquierda respecto del valor medio, según nos indican los valores que toman la curtosis y el sesgo, respectivamente.

El módulo del viento, para medidas de viento medio y series largas, se rige por la distribución de Weibull, que se define por un parámetro de escala,  $b$ , y otro de forma,  $a$ . Así, la función de densidad de probabilidad para el módulo del viento  $x$  es la siguiente:

$$f(x) = ab^{-a} x^{a-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{b}\right)^a\right] \quad (4.5)$$

El parámetro de escala está relacionado con la media de la distribución. Consecuentemente, éste es una medida de centralización y en la capa superficial aumenta con la altura. El parámetro de forma está relacionado con el apuntamiento de la distribución. Cuanto mayor es el parámetro de forma más apuntada es la distribución en estudio. En la Tabla 4.3 se aprecia que el apuntamiento disminuye con la altura.

Los datos obtenidos de los parámetros característicos de la distribución de Weibull, nos sugiere la existencia de una relación de dependencia en la capa superficial. Es decir, si se representan ambos parámetros en función de la altura se aprecia una ligadura. La estimación de ésta permitiría optimizar los diseños previos y el abaratamiento de costes en la toma de decisiones sobre la posibilidad de construir un parque eólico en una zona determinada.

Tabla 4.3 Estadísticos del módulo del viento en la capa superficial

Estadísticos	Altura (m)	Media (m/s)	Desviación estándar (m/s)	Curtosis	Sesgo	Parámetro de forma Weibull	Parámetro de escala Weibull
Invierno	5	2.55	1.95	3.90	1.09	0.25	1.34
	10	3.17	2.32	4.43	1.26	0.16	1.46
	35	5.28	3.12	4.52	1.15	0.04	1.80
	50	5.99	3.42	4.19	1.03	0.03	1.86
Primavera	5	2.57	1.80	3.14	0.84	0.22	1.45
	10	3.11	2.08	3.81	1.06	0.14	1.58
	35	4.66	2.70	4.10	1.04	0.05	1.83
	50	5.21	2.98	4.04	1.00	0.04	1.84
Verano	5	2.18	1.47	3.75	0.90	0.26	1.53
	10	2.53	1.60	4.71	1.09	0.17	1.67
	35	3.77	2.01	6.22	1.17	0.06	1.98
	50	4.17	2.21	6.04	1.14	0.05	1.99
Otoño	5	2.29	1.69	4.26	1.12	0.27	1.40
	10	2.76	1.99	5.18	1.37	0.19	1.49
	35	4.31	2.65	5.77	1.40	0.06	1.73
	50	4.82	2.90	5.44	1.32	0.05	1.77

#### • Rosa de viento

La representación gráfica de la rosa de viento es idónea para caracterizar el viento. Es una distribución de probabilidad bidimensional que contempla las variables módulo y dirección del viento al unísono, representando la dirección en sectores y el módulo en intervalos de intensidad. Para realizar el análisis de la distribución de frecuencias del viento en la capa superficial atmosférica se ha dividido;

- la dirección en 16 sectores: N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSW, W, WNW, NW y NNW
- el módulo en 6 intervalos: 0-1, 1-3, 3-5, 5-7, 7-10 y más de 10 m/s

En este estudio se ha construido la rosa de viento correspondiente al período 1995-98 para cada estación y nivel de la torre meteorológica de Vilaseca, como se muestra en las figuras 4.15, 4.16 y 4.17. Para elegir los intervalos representativos del módulo del viento se ha considerado el estudio previo de la distribución del módulo del viento, apartado anterior. La dirección del viento se dibuja sobre un círculo, representado por barras de probabilidad para cada sector y el viento se gradúa en una gama de colores que representa la intensidad del módulo.

El estudio lo hemos dividido en dos partes, primero se han analizado las rosas de viento anuales de todos los niveles y, posteriormente, se han evaluado las estacionales.

### Rosas de viento anuales

En este apartado presentamos, Figura 4.15, el estudio anual del viento de los 4 niveles de la torre meteorológica de Vilaseca.

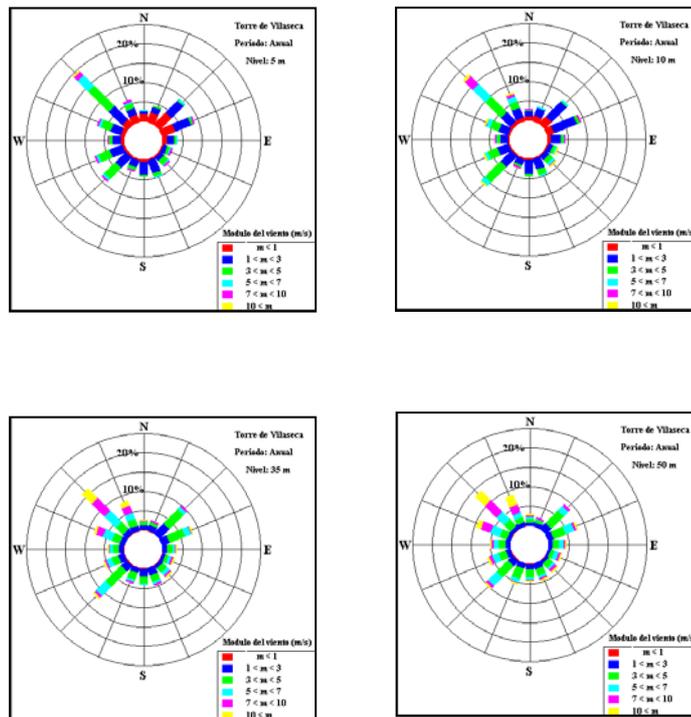


Figura 4.15 Rosas de viento representativas de todo el periodo analizado para cada nivel de medida.

Del análisis de las rosas de viento anuales, figura 4.15, se pueden extraer los siguientes aspectos:

- Se aprecian tres direcciones predominantes: NW, SW y NE. Destacando especialmente la primera, que corresponde a los vientos de poniente de escala sinóptica. Mientras que los otros dos sectores están relacionados con el ciclo diario de mesoescala, tal y como comprobaremos más adelante.
- El módulo del viento fuerte lo provoca el poniente, el débil procede del terral y el moderado refleja la brisa marina.

Al igual que en los estudios precedentes, la Figura 4.15 nos continúa mostrando una alta correlación entre los dos niveles inferiores y los dos superiores. Por este motivo en adelante evaluaremos las rosas de viento del nivel de 10 metros como representante del estrato inferior y el de 50 metros del superior.

En general, se puede caracterizar el viento en la capa superficial según las direcciones dominantes y la intensidad del viento:

- SW, que corresponde a la brisa marina con vientos moderados,
- NE, que corresponde a situaciones de viento orográfico de magnitud moderada y al terral con vientos débiles,
- NW, que corresponde a las situaciones sinópticas de poniente con vientos fuertes.

Para completar el análisis anual de las rosas de viento en las figuras 4.16 y 4.17 presentamos las rosas de viento nocturnas y diurnas, respectivamente, de los niveles de referencia definidos anteriormente. Para discriminar los datos nocturnos de los diurnos se han utilizado las horas de salida y puesta de sol del anuario de San Fernando (1995-98).

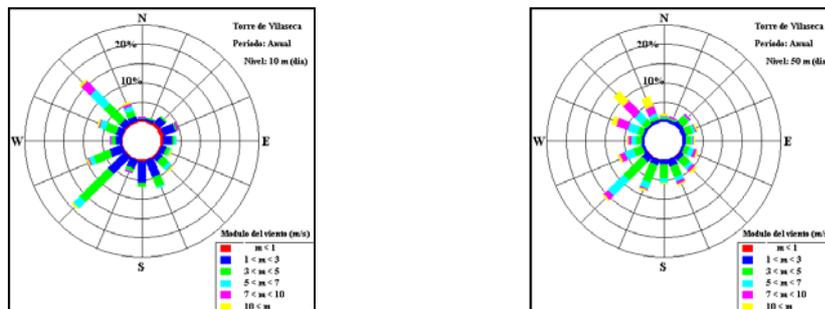


Figura 4.16 Rosas de viento representativas de todo el periodo diurno para los niveles de 10 metros (izquierda) y 50 metros (derecha).

Durante el día, Figura 4.16, destacan dos sectores, la brisa y el poniente, predominando la primera sobre el segundo. Ahora bien, los vientos fuertes proceden de poniente mientras que la brisa se caracteriza por los vientos moderados. Durante la noche, Figura 4.17, también aparece el poniente, con viento fuerte, y el viento orográfico del NE, de magnitud moderada, y el terral con viento débil.

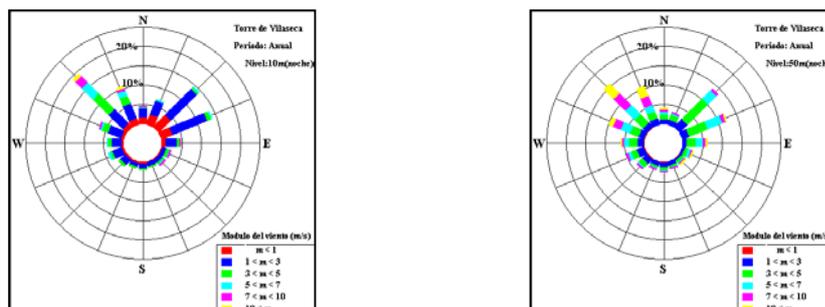


Figura 4.17 Rosas de viento representativas de todo el periodo nocturno para los niveles de 10 metros (izquierda) y 50 metros (derecha).

Destaca la casi nula probabilidad de ocurrencia de vientos del sur por la noche y del norte durante el día. Comparando el comportamiento diurno y el nocturno se aprecia la gran independencia temporal de los ponientes, apareciendo en ambos análisis con idéntico porcentaje e intensidad.

### Rosas de viento estacionales

En el anexo se muestra el estudio de las rosas de viento de cada estación del año que se ha realizado distinguiendo el comportamiento diurno del nocturno, con el objetivo de localizar los sectores predominantes de cada período.

En resumen, del análisis de las rosas de viento de las diferentes estaciones del año se pueden resaltar los siguientes aspectos:

- Durante el día se observa que el sector NW es el que tiene una mayor presencia y persistencia, en todas las estaciones, salvo en verano. El sector de la brisa, SW, es el más probable en verano, y muy importante en primavera y otoño, pero sin presencia en invierno. En cuanto al módulo, los vientos fuertes provienen de poniente, mientras que los moderados pertenecen a la brisa.
- Por la noche, se observan dos sectores característicos, NW y NE. El primero refleja las situaciones sinópticas de poniente y el segundo las situaciones mesoescales provocadas por los terrales, típicos de las noches en las localidades costeras, y el viento orográfico procedente del *Vall del Francolí*.
- Mientras que el viento del sector NE se presenta en todas las estaciones casi por igual, los ponientes se aprecian más en invierno, primavera y otoño.
- En referencia al módulo del viento, los fuertes corresponden a las situaciones de poniente y los débiles al viento orográfico del NE.

Los resultados obtenidos en este análisis coinciden con los expuestos por Hinojosa (2001).

#### **4.5.4 Análisis espectral del viento**

Los resultados derivados del análisis espectral del viento son similares a los de la temperatura potencial, presentados en la sección 4.4.4. Apreciándose un ciclo diurno tanto para el módulo como para la dirección del viento, en concordancia con el estudio sobre las variaciones diurnas de la sección 4.5.1.

Para analizar la persistencia del pico de energía en toda la serie de viento se ha analizado el espectro móvil tipificado. El viento muestra un ciclo diurno en todo el periodo explorado, pero la intensidad de éste y su persistencia no es tan importante como ocurría con la temperatura.

### **4.6 Presión atmosférica**

El análisis de la presión atmosférica consta de los siguientes apartados: El estudio de la distribución de frecuencias, la evolución diurna y el análisis espectral. La representación gráfica del análisis de las frecuencias y la evolución diurna se presenta por estaciones.

#### **4.6.1 Distribución de frecuencias de la presión atmosférica**

Para realizar el análisis de la distribución de frecuencias de la presión atmosférica se han analizado los datos de cada estación del año, agrupándolos en intervalos de 5 hPa. Los resultados se presentan en la Figura 4.18.

De las representaciones de la distribución de frecuencias, Figura 4.18, se observa que la presión atmosférica se comporta como una distribución altamente simétrica en casi todas las estaciones del año. El verano presenta una dispersión pequeña con unos máximos muy destacados, centrados entorno a los 1018 hPa. Por el contrario, en el resto de estaciones aparece una gran dispersión, provocando el aplanamiento de la curva de frecuencias. Todas las distribuciones están centradas en el mismo intervalo.

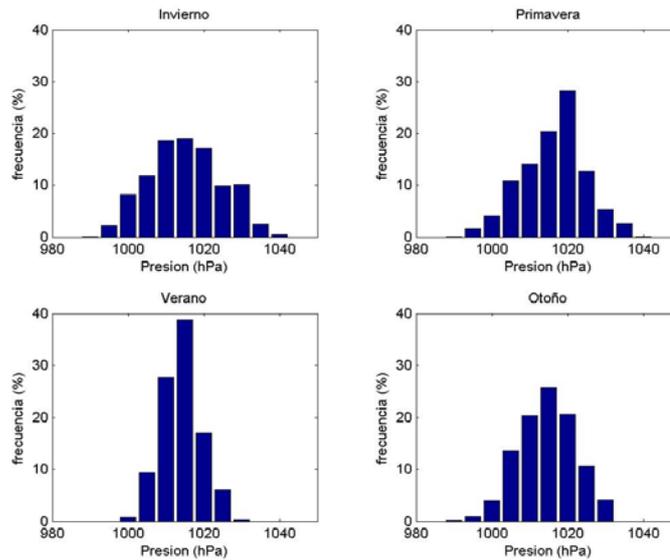


Figura 4.18 Distribución de frecuencias de la presión atmosférica de las diferentes estaciones del año.

#### 4.6.2 Evolución diurna de la presión atmosférica

Para calcular la evolución diurna de la presión atmosférica en cada estación, se han analizado todos los datos de treinta minutos de la presión atmosférica de cada estación y se ha realizado la media aritmética de cada una de las semihoras. Los resultados se presentan en la Figura 4.19.

La evolución diurna de la presión atmosférica muestra una variación semidiurna, dos oscilaciones diarias. En general, muestra picos de presión durante la mañana y al principio de la noche, y presenta mínimos durante la tarde y al final de la noche. La variación oscila alrededor de 1 hPa a cada banda de su valor medio en todas las estaciones. Siendo mayor durante el día que por la noche. Así, el mayor máximo y el menor mínimo sucede dentro del rango diurno.

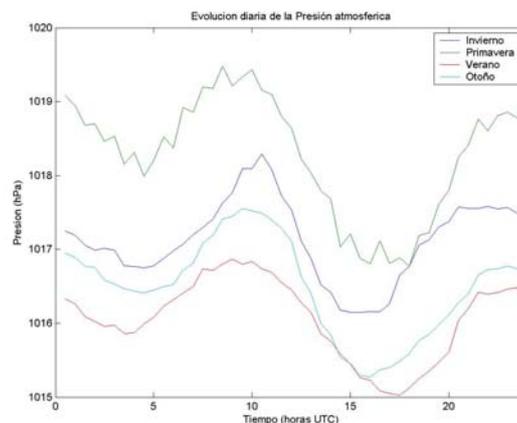


Figura 4.19 Evolución media diurna de la presión atmosférica de cada estación del año.

En meteorología se ajustan diariamente las observaciones de la presión para eliminar el efecto de, la llamada, marea atmosférica, que está asociada a la gravitación solar y lunar y al calentamiento solar, de tal manera que existe una gran correlación entre la evolución diurna de la temperatura, la radiación neta y la presión atmosférica. La marea no es aparente en latitudes superiores a los 60°. La marea atmosférica es una onda de

gravedad interna con una frecuencia medía de 12 horas. En la Figura 4.19 se observa este comportamiento en cada una de las estaciones. En invierno transcurren 6 horas entre el primer máximo del día y el siguiente mínimo de presión atmosférica, mientras que en verano pasan muchas más horas, 10, debido al calentamiento solar. En primavera y otoño pasan unas 8 horas entre el máximo y el mínimo de presión diurno.

### 4.6.3 Análisis espectral de la presión atmosférica

Para completar el análisis microclimatológico de la presión atmosférica en la capa superficial se ha estimado el espectro de potencia y el espectro móvil tipificado de la presión atmosférica. La construcción de ambos análisis se ha expuesto en la sección correspondiente a la temperatura, pero, en este caso, además se ha aplicado un desplazamiento vertical de la señal para que sus variaciones de amplitud sean el objeto de estudio real y no se oculten detrás de los valores absolutos de la variable. Si no el espectro sería insensible a variaciones de presión del 0.1 %, Buenestado et al. (1998).

- **Espectro de potencia**

La Figura 4.20 muestra el espectro de potencia de la presión del aire, presentando un pico relevante centrado en un período de 12 horas, como indica la etiqueta que hay sobre la curva, y otro etiquetado con un 1 en correspondencia con la variación diurna estudiada anteriormente.

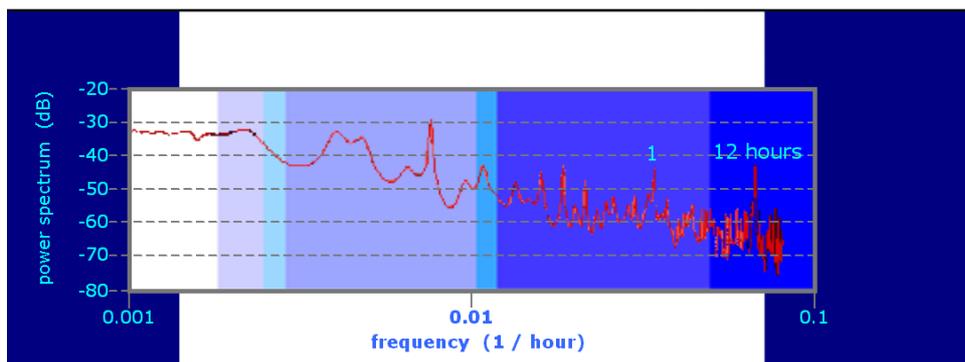


Figura 4.20 Espectro de potencia de la presión atmosférica. El valor 1 que aparece sobre la curva representa a la periodicidad de un día, mientras que el otro símbolo indica el pico de las 12 horas de periodo.

- **Espectro móvil tipificado**

Los resultados del espectro móvil tipificado se exponen en la Figura 4.21. El análisis del campo escalar de la presión atmosférica, exhibe valores relativamente grandes de energía centrados para un período de 12 horas, así como para las 24 horas. En este caso, los picos de energía aparecen y desaparecen a lo largo del tiempo, mostrando periodos de tiempo en los que la variación diurna de la presión no es siempre cíclica.

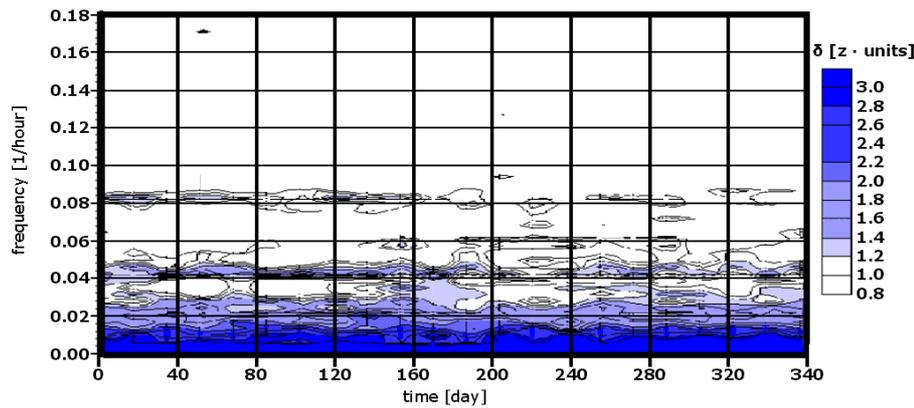


Figura 4.21 Análisis espectral móvil tipificado de la presión atmosférica. En la ilustración se puede apreciar como los máximos de la Figura 4.20 en las frecuencias de 0.08 y 0.04 no permanecen constantes a lo largo del periodo analizado. Además la intensidad de éstos no es muy alta.

## 4.7 Radiación neta

El balance radiativo de una superficie se mide por medio de la variable denominada radiación neta, que es la diferencia entre las sumas de la radiación de onda corta y de onda larga que llegan y salen de la superficie terrestre. El análisis consta de los siguientes puntos: el estudio de la distribución de frecuencias, la evolución diurna y el análisis espectral de la radiación neta media. La representación gráfica del análisis de las frecuencias y la evolución diurna se presenta por estaciones.

### 4.7.1 Distribución de frecuencias de la radiación neta

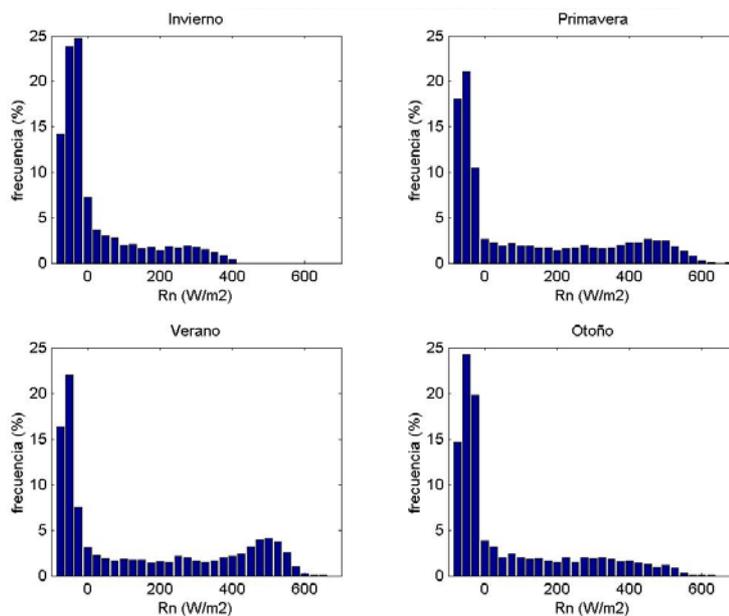


Figura 4.22 Distribución de frecuencias de la radiación neta para cada estación del año.

Para realizar el análisis de frecuencias de la radiación neta se han evaluado todos los datos de cada estación y se han agrupado en intervalos de  $25 \text{ Wm}^{-2}$ . Los resultados del análisis de frecuencias de la radiación neta se presentan en la figura 4.22.

La distribución de frecuencias de la radiación neta es asimétrica para las cuatro estaciones del año. Ésta presenta valores (positivos) altos durante el día y una gran dispersión y valores (negativos) menores en valor absoluto durante la noche con menos dispersión.

En invierno predomina el carácter nocturno con un pico superior al resto de las estaciones, radiación nocturna, que decae suavemente hacia los valores positivos de radiación neta, radiación solar. En primavera y verano se obtienen distribuciones con dos picos, uno significativo para la noche y otro más suave para el día. En otoño encontramos una distribución más parecida a la del invierno pero la radiación diurna presenta valores mucho mayores.

#### 4.7.2 Evolución diurna de la radiación neta

Para calcular la evolución diurna de la radiación neta de cada estación se han analizado todos los datos de radiación de cada semihora de cada estación y se ha realizado la media para cada una de ellas. Los resultados se presentan en la Figura 4.23.

Con este tipo de representaciones podemos apreciar el ciclo diurno medio de la radiación neta. Por norma general, la radiación neta durante un día claro presenta un máximo importante a las 12 horas UTC. En invierno se aprecia el menor máximo y en verano el mayor, con una diferencia de unos  $300 \text{ Wm}^{-2}$  entre ambos. En primavera se observa un máximo superior al de otoño. Además, en invierno aparecen más de 14 horas de valores de radiación neta negativos, correspondientes a la noche, mientras que en verano apenas se contabilizan 9 horas nocturnas en promedio.

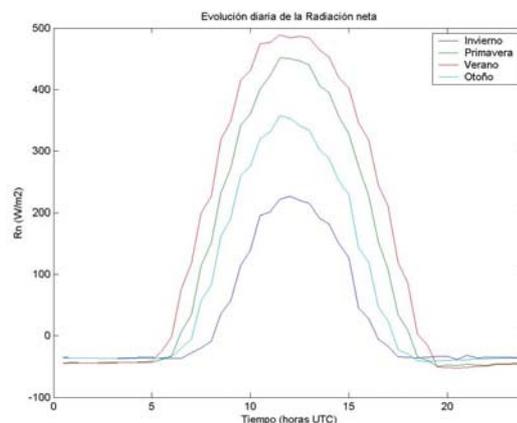


Figura 4.23 Evolución media diurna de la radiación neta para cada estación del año.

#### 4.7.3 Análisis espectral de la radiación neta

Al igual que sucede con la temperatura y el viento, la radiación neta también presenta un ciclo diurno con el análisis espectral realizado.

### 4.8 Conclusiones

El análisis estadístico realizado con los datos proporcionados por la torre meteorológica, desde 1995 hasta 1998, tiene un valor climatológico importante. El análisis microclimatológico ayuda a caracterizar el comportamiento medio de las variables de la capa superficial atmosférica. Además, la torre meteorológica y el Sodar Doppler, fueron los únicos instrumentos que suministraban, durante dicho periodo y de forma continua en Cataluña, información de la variación vertical de las principales variables meteorológicas.

En particular, la torre meteorológica es un complemento esencial en la modelización de la dispersión de contaminantes. Así, el análisis estacional de las variables termodinámicas de la capa superficial atmosférica permite evaluar la capacidad dispersiva y, en consecuencia, la calidad del aire de la zona en estudio.

El análisis térmico nos ha mostrado la evolución anual del gradiente térmico, resaltando la homogeneización diurna frente a las irregularidades nocturnas.

El estudio de la distribución del viento es aconsejable realizarlo para la dirección y la velocidad conjuntamente, mediante la rosa de viento. Concretamente, a fin de entender y caracterizar los fenómenos meteorológicos resultantes, es recomendable diferenciar el análisis diurno del nocturno. En este sentido, nos ha mostrado la presencia de vientos sinópticos, la brisa y el viento orográfico. Además, el análisis de las distribuciones de frecuencia del módulo refleja una ligadura entre los diferentes niveles de los parámetros Weibull, que es un aspecto interesante para la instalación de un parque eólico.

El análisis de la presión atmosférica nos ha enseñado la marea atmosférica de nuestras latitudes. Mientras que del estudio de la radiación neta destaca la variación estacional.

En general, las variables analizadas presentan un carácter cíclico, al igual que sucede con la capa fronteriza atmosférica. Todas las variables estudiadas presentan una variación diurna similar, a excepción de la presión atmosférica. Además, el estudio muestra la variación estacional de las variables meteorológicas.

El Análisis espectral Móvil tipificado (MTSA) es un buen método objetivo para comparar espectros de potencia y estudiar la evolución temporal del máximo espectral en climatología. El MTSA permite observar si las características espectrales permanecen durante todo el tiempo explorado y si sufre variaciones en el tiempo y la frecuencia. Este tipo de análisis ayuda a detectar los sucesos ondulatorios y a evaluar su evolución. Todos los espectros analizados, excepto el de presión, muestran un máximo bien definido de energía espectral centrado en un período diario.