

## CAPÍTULO 5

### PROBLEMA DE LA INDETERMINACIÓN EN LA CAPA SUPERFICIAL ATMOSFÉRICA

El presente capítulo aborda el problema de la indeterminación en la capa superficial atmosférica desde dos puntos de vista diferentes: la teoría de semejanza (mediante la estimación de los perfiles medios, que se denomina problema de la indeterminación de orden cero) y la parametrización de los estadísticos turbulentos (mediante la estimación de la desviación estándar del viento, que equivale al problema de la indeterminación de orden uno).

Inicialmente, en la sección 5.1, presentamos la campaña experimental SABLES-98, que es la campaña en la que nos hemos basado, principalmente, para realizar el estudio del problema de la indeterminación en la capa superficial atmosférica. A continuación, en la sección 5.2, se estiman las funciones adimensionales de los gradientes térmicos y dinámicos, que dependen del parámetro de estabilidad adimensional,  $z/L$ , y se comparan con los de la bibliografía. Además, se valida el modelo de la teoría de semejanza estimado en Vilaseca (Buenestado et al., 1999b). Y, para finalizar, en la sección 5.3, se trata el problema de la parametrización de los estadísticos turbulentos. Estimándose éstos a partir del módulo del viento y el gradiente térmico (Buenestado y Soler, 1999), comparándose el modelo con los propuestos por Hanna y Chang (1993).

#### 5.1 Campaña experimental: SABLES-98

En esta sección se describe la campaña experimental SABLES-98 (*Stable Atmospheric Boundary Layer Experiment in Spain*, Cuxart et al., 2000), que tuvo lugar en la meseta norte española, en las cercanías de Valladolid, durante el mes de septiembre de 1998.

En la campaña experimental participaron 5 grupos de investigadores pertenecientes a las siguientes instituciones: el Instituto Nacional de Meteorología, el *Departament d'Astronomia i Meteorologia de la Universitat de Barcelona*, el Laboratorio Nacional de Riso (Dinamarca), la Universidad de Sheffield (Gran Bretaña) y el *Departament de Física Aplicada de la Universitat Politècnica de Catalunya*.

El objetivo principal de la experimentación fue estudiar las características de la capa fronteriza estable nocturna en latitudes medias.

En particular, el análisis de los datos de SABLES-98, además de permitirnos evaluar algunas parametrizaciones de la teoría de semejanza, sección 5.2, y suministrar nuevas ecuaciones derivadas de la experimentación, sección 5.3, suministró conocimiento adicional de diferentes aspectos concernientes a la dinámica de la capa límite estable (Cuxart et al., 2000; Terradellas et al., 2001). Además, se han estudiado los distintos regímenes de la capa superficial nocturna (Buenestado et al., 1999c; sección 6.2) y la intermitencia de la turbulencia, sección 6.3.

A continuación se describe el área experimental y la instrumentación desplegada durante la campaña.

### • Área experimental

SABLES-98 se desarrolló entre el 10 y el 28 de septiembre de 1998, con 3 días previos de pruebas de los sistemas de exploración atmosférica, en el Centro de Investigación de la Baja Atmósfera (CIBA, 41° 49' N, 5° 70' W), que pertenece a la Universidad de Valladolid y al Instituto Nacional de Meteorología. El área experimental se había utilizado, anteriormente, para realizar otras investigaciones experimentales relacionadas con la capa fronteriza atmosférica (San José et al., 1985; Yagüe y Cano, 1994), con diferente instrumentación.

La base experimental está situada en el centro de una meseta de unos 800 km<sup>2</sup> (Montes Torozos) a una altitud de 840 metros por encima del nivel del mar, Figura 5.1. El CIBA está rodeado de praderas bastante llanas, cubiertas básicamente de pasto, y su parámetro de rugosidad,  $z_0$ , es de 1.1 cm (San José et al., 1985) y corroborado por el autor (Buenestado et al., 1999b) mediante el análisis de los perfiles de viento con estratificación indiferente.

La meseta se eleva unos 50 metros por encima de una extensa región de terreno llano y homogéneo. El CIBA está rodeado por cadenas montañosas a 100 kilómetros de distancia, aproximadamente, extendiéndose desde el sureste hasta el norte. Las corrientes katabáticas pueden generarse en el aire por el terreno montañoso. Además, dos pequeños valles fluviales se extienden, desde el noreste al suroeste de la meseta, pudiendo actuar como promotores de drenaje en condiciones estables. Hacia el oeste, el valle del Duero se extiende a través de Portugal hasta el Océano Atlántico, Figura 5.1.

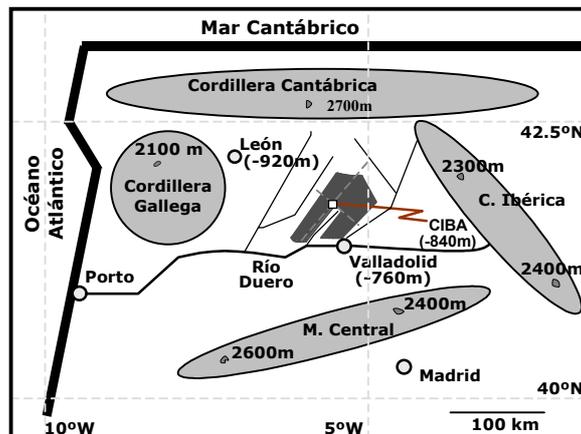


Figura 5.1 Localización del CIBA con un esquema descriptivo de la topografía. Las zonas sombreadas corresponden a las cadenas montañosas. Las líneas que cruzan el CIBA son las secciones que se representan en la Figura 5.2 (Cuxart et al., 2000).

En la Figura 5.2 se muestran los esbozos de las secciones verticales de la meseta de los Torozos; el diagrama superior representa un corte de la sección del noroeste al sureste e indica que la variación vertical del firme a través de la meseta es únicamente de 5 metros en esta dirección. El esbozo inferior ilustra un corte de la sección del noreste al suroeste. La meseta se inclina suavemente descendiendo hacia el suroeste con un gradiente de unos 30 metros en 50 kilómetros de distancia. En ambos diagramas la ubicación del CIBA se indica con un símbolo, situado cerca del centro de la meseta.

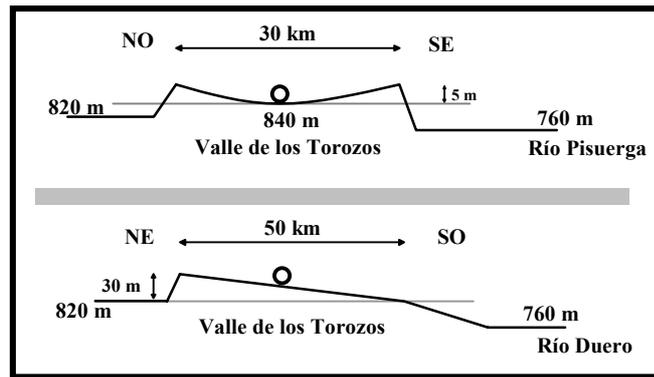


Figura 5.2 Esbozos de las secciones verticales de la meseta de los Torozos. Diagrama superior: Corte vertical en la dirección noroeste-sureste; Diagrama inferior: corte noreste-suroeste. En ambos diagramas se representa la situación del CIBA con un círculo (Cuxart et al., 2000).

### • Instrumentación

La Figura 5.3 muestra el plano de los instrumentos desplegados durante SABLES-98. A continuación se explicitan los detalles de los instrumentos utilizados:

- Una torre de 100 metros de altura equipada con instrumentos suministrados y calibrados por el Laboratorio Nacional de Risø (Figura 5.4, izquierda). Su instrumentación incluyó un conjunto vertical de 15 termocúpulas, tres anemómetros sónicos, un sensor de humedad en alta frecuencia, un sensor de infrarrojos de temperatura superficial, un radiómetro y un barómetro. Además, se dispuso de medidas en baja frecuencia del módulo del viento (a cinco niveles), de la temperatura (a tres niveles), de la dirección del viento (a tres niveles) y de la humedad (a dos niveles). Los anemómetros sónicos son Solent RS2, mientras que los otros instrumentos y sensores son productos propios del Laboratorio Nacional de Risø. Las especificaciones técnicas y los niveles de los instrumentos utilizados se muestran en la Tabla 5.1.
- Una torre de 10 metros de altura se instrumentó con el objetivo de suministrar medidas de las variables meteorológicas en la capa superficial (Figura 5.4, derecha). De esta parte del proyecto se encargó el grupo de micrometeorología de la *Universitat de Barcelona* y el Instituto Nacional de Meteorología. El equipo de baja frecuencia se usó para medir la temperatura, la humedad y la dirección y la velocidad del viento a tres niveles. La dirección y la velocidad del viento se midieron usando anemómetros de hélice y veleta (RM Young 05103) y dos anemómetros sónicos (Campbell CSAT3 y Solent 1012-R2). También, se instalaron dos radiómetros (Campbell Q-7). La temperatura y la humedad se midieron con un termistor de precisión y un sensor de humedad relativa capacitivo Väisälä (Campbell HMP35AC). Se instalaron sensores de temperatura de subsuelo (Campbell 107), sensores de humedad del subsuelo (Campbell CS615) y un fluxímetro de subsuelo (Campbell RECS HFT-3). Estos instrumentos se calibraron antes de la campaña en la sede de Campbell en Inglaterra. Las especificaciones técnicas y los niveles de estos instrumentos se muestran en la Tabla 5.2.
- Se disponía de un minisodar Doppler Sensitron. La cima del rango de exploración era de entre 200 y 400 metros de altura, dependiendo de la frecuencia de emisión, y se seleccionó una resolución de 5 metros.
- Un globo cautivo con 1 kilómetro de cable operó durante las noches con viento ligero.

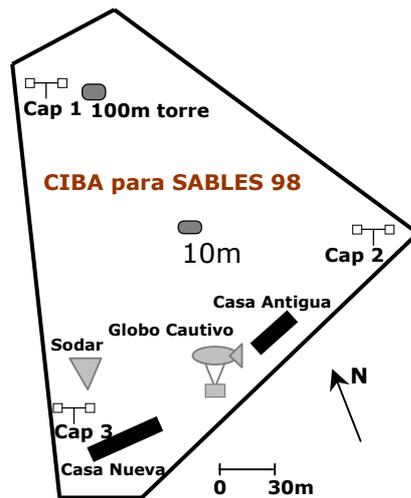


Figura 5.3 Planificación del CIBA para el proyecto SABLES-98, mostrando las posiciones relativas de los instrumentos meteorológicos. Se dispuso de 2 torres meteorológicas (de 10 y 100 metros de altura), un globo cautivo y un sodar (Cuxart et al., 2000).

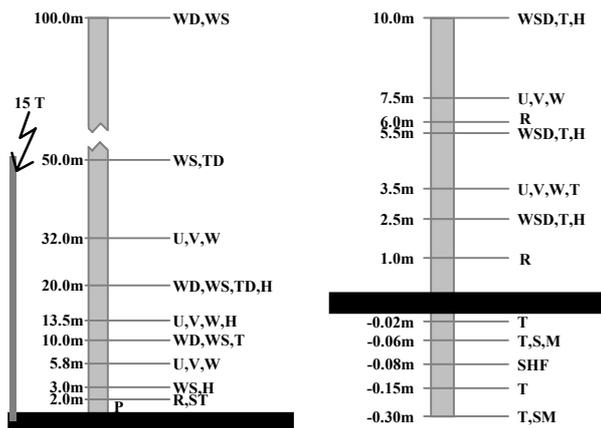


Figura 5.4 Esquema de la distribución de los instrumentos desplegados en la torre de 100 metros (izquierda) y en la de 10 metros (derecha). La línea gruesa horizontal simboliza la superficie terrestre y las siglas corresponden a WD: dirección del viento (veletas), WS: velocidad del viento (cazoletas), T: temperatura absoluta, TD: diferencias de temperatura, U,V,W: componentes del viento del anemómetro sónico, H: humedad, R: radiación, P: presión, ST: temperatura de la superficie, WSD: velocidad y dirección del viento del anemómetro de hélice, SM: humedad del subsuelo, SHF: flujo de calor del subsuelo (Cuxart et al., 2000).

La torre de 100 metros se empleó para proporcionar medidas detalladas de la turbulencia en la parte inferior de la capa fronteriza y se complementaron con los datos de la torre de 10 metros. En ambas se montaron los instrumentos meteorológicos de alta precisión para explorar los detalles turbulentos de la capa superficial atmosférica. Con la ayuda del estudio climatológico del aeropuerto de Villanubla (ubicado en la meseta de los Torozos, a 10 kilómetros al sur del CIBA), que recopila datos de 30 años (1961–90), se determinó el predominio de los vientos del sector este durante la noche en el mes de septiembre. Consecuentemente, se orientaron los instrumentos de alta frecuencia en la situación idónea, dirigidos hacia el noreste ( $50^\circ$ ), para conseguir las medidas óptimas de tales corrientes sin que sean perturbadas por la estructura de la torre ni por el propio instrumental, evitando la influencia de ambos en la estimación del flujo.

Tabla 5.1 Instrumentos de la torre de 100 metros.

Instrumento	z (metros)	Frec. de muestreo (Hz)	Umbral	Precisión
Anemómetro sónico Solent	5.8, 13.8, 32	20	15mms <sup>-1</sup> para u,v; 4mms <sup>-1</sup> para w	±3%
Veletas de viento	10, 20, 100	5	1.0 ms <sup>-1</sup>	±3%
Anemómetro de cazoleta	3, 10, 20, 50, 100	5	0.5 ms <sup>-1</sup>	±0.2ms <sup>-1</sup>
Termistor	10	1		±0.1°C
Termómetros de resistencia de Platino	10-20, 20-50	1		±0.1°C
Termocúpulas	0.22, 0.88, 2, 3.55, 5.55, 8, 10.88, 14.22, 18, 22.22, 26.88, 32, 37.55, 43.55, 50	5		±0.03°C
Barómetro	Superficie	1		±0.1 hPa
Sensor de infrarrojos (T <sub>superficie</sub> )	2	1		±0.1°C
Radiómetro	2	1		±5-10%
Higrómetro del punto de rocío	3, 20	1		±2-3%
Sensor de humedad Ophir	13.5	20		±2%

El globo cautivo suministró información de la estructura de la capa límite nocturna y se usó para detectar la evolución de sucesos relevantes, tales como el *low level jet (LLJ)* y la estratificación térmica. El minisodar se utilizó para analizar la evolución nocturna de la capa fronteriza de forma continua.

Tabla 5.2 Instrumentos de la torre de 10 metros.

Instrumento	z (metros)	Frec. de muestreo (Hz)	Umbral	Precisión
Anemómetro sónico Solent	7.5	20	15mms <sup>-1</sup> para u,v; 4mms <sup>-1</sup> para w	±3%
Anemómetro sónico Campbell	3.5	20	15mms <sup>-1</sup> para u,v; 4mms <sup>-1</sup> para w	±3%
Anemómetro de hélice (dirección)	2.5, 5.5, 10	5	1.0 ms <sup>-1</sup>	±3%
Anemómetro de hélice (velocidad)	2.5, 5.5, 10	5	0.5 ms <sup>-1</sup>	±0.2ms <sup>-1</sup>
Termistor	2.5, 5.5, 10	1		±0.1°C
Sensor de humedad	2.5, 5.5, 10	1		±2-3%
Radiómetro	1, 6	1		±5-10%
Sondas de temperatura del subsuelo	-0.02, -0.06, -0.15, -0.30	1		±0.1°C
Sensor de humedad del subsuelo	-0.06, -0.30	1	10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	±2%
Fluxímetro de subsuelo	-0.08	1		±1-5%

Después de la campaña experimental, se recopiló una base de datos con las observaciones registradas. La base de datos se compone de los estadísticos primeros y los datos brutos, después del control de calidad, capítulo 3. Para los estadísticos se han recopilado promedios de 30 minutos, que informan sobre la evolución y el comportamiento general de las diferentes variables, con un total de 852 registros, y promedios de 5 minutos, que se usan para capturar sucesos turbulentos, con 5112 registros para cada variable.

## 5.2 Relaciones de semejanza: Perfiles medios

Anteriormente, en el apartado 1.4.2, hemos presentado la teoría de semejanza. Ésta es una de las herramientas más exitosa en el análisis del flujo medio en la capa superficial atmosférica. La idea de similitud suministra una estructura sencilla para determinar distribuciones semiempíricas de las variables meteorológicas. Durante más de 60 años se ha utilizado la teoría de semejanza en la capa superficial y se han desarrollado múltiples experimentos con el objetivo de obtener las funciones adimensionales de los gradientes de las variables termodinámicas.

Recordemos que la teoría de semejanza supone que los gradientes verticales del módulo del viento,  $\partial U/\partial z$ , y de la temperatura potencial,  $\partial \Theta/\partial z$ , en una capa superficial horizontalmente homogénea, propiamente normalizados con escalas de velocidad,  $u^*$ , y

de temperatura,  $\theta_*$ , son función únicamente del parámetro de estabilidad adimensional  $z/L$ , es decir<sup>1</sup>:

$$\frac{kz}{u_*} \frac{\partial U}{\partial z} = \Phi_m(z/L) \quad (5.1)$$

$$\frac{kz}{\theta_*} \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \Phi_h(z/L) \quad (5.2)$$

donde  $\Phi_m$  y  $\Phi_h$  son las funciones que definen dicha dependencia. Se han realizado enormes esfuerzos para determinar la forma precisa de las funciones de semejanza de Monin-Obukhov, tanto analítica (Mellor, 1973; Khanta y Clayson, 1994) como empíricamente (Businger et al., 1971).

Por experimentación, a partir de la suposición de semejanza, se puede determinar la forma de las funciones de semejanza de M-O, estimando las constantes empíricas que están asociadas a la dependencia de la estabilidad con el perfil del flujo. En consecuencia, se han desarrollado muchos experimentos en la capa superficial y los resultados han suministrado alguna medida de confirmación de la teoría. Sin embargo, no ha habido consenso sobre los valores de muchas de las funciones o constantes experimentales derivadas.

De entre los numerosos experimentos realizados destacamos los estudios de Zilitinkevich y Chalikov (1968), Businger et al. (1971) y Dyer (1974). Primero, Yaglom (1977) y, posteriormente, Hogstrom (1988) compararon los resultados de estos experimentos, entre otros, y encontraron apreciables diferencias entre ellos. Concluyeron que era bastante probable que una parte considerable de la dispersión de los resultados se debía a algunos errores experimentales. También hacen constancia de la escasez de datos que verifiquen la suposición de que los flujos de calor y de momento son constantes en altura.

Así, por un lado, los datos de SABLES-98 nos permitieron estimar algunas parametrizaciones de la teoría de semejanza, suministrando nuevas funciones de semejanza derivadas de la experimentación. Por otro lado, a partir del análisis de Hogstrom (1988), comparamos los estudios de Zilitinkevich y Chalikov (1968), Businger et al. (1971) y Dyer (1974) con el realizado por el autor en SABLES-98. Además, nuestro modelo de teoría de semejanza se validó en la torre meteorológica de Vilaseca, mostrando la universalidad del mismo (Buenestado et al., 1999).

A continuación exponemos el procesado de datos que hemos realizado, después, en la sección 5.2.2, presentamos la estimación de las funciones de semejanza y la comparación con la de los autores mencionados anteriormente y, finalmente, en la sección 5.2.3, mostramos la validez universal del modelo.

### 5.2.1 Procesado de los datos

La búsqueda de nuevas funciones de semejanza, en resumen, requiere la estimación de los perfiles de viento y de temperatura, así como, el cálculo de los flujos de momento y de calor, la velocidad de rozamiento y la longitud de Obukhov en la capa superficial atmosférica. Lo que significa que se han de analizar las medidas de turbulencia y los perfiles medios simultáneamente con el objetivo de suministrar información sobre las relaciones de semejanza, tanto para el viento como para la temperatura.

<sup>1</sup> Las expresiones 5.1 y 5.2 ya aparecieron en la sección 1.4.2 en la expresión conjunta 1.21

Las medidas de la turbulencia se realizaron con los anemómetros sónicos Gill operando con una frecuencia de muestreo de 20 Hz, computándose los flujos de momento y de calor, la velocidad de rozamiento y la longitud de Obukhov a 5.8 y a 13.5 metros. Con el fin de evitar los posibles problemas de orientación en los anemómetros sónicos, se ha aplicado la corrección del ángulo en ambos niveles, sección 3.2.3.1.

La estimación de los perfiles se realizó a partir de la expresión 3.12 utilizando el método de los mínimos cuadrados con las medidas registradas en siete niveles (2, 3.5, 5.5, 8, 10.9, 14.2 y 18 metros) para la temperatura y cinco (3, 5.8, 10, 13.5 y 20 metros) para el módulo del viento. Los perfiles obtenidos se probaron, aceptando sólo aquellos que denotaban un ajuste fiable superior al 70%, sección 3.2.3.2.

Para el análisis conjunto de los datos se han exigido las siguientes condiciones:

- Los instrumentos debían funcionar adecuadamente, es decir se ha prescindido de aquellas medidas en las que alguno de los sensores no estaba operativo. Desestimando el consiguiente gradiente.
- La dirección del viento fuera favorable, es decir que las medidas no estuvieran influidas por la estructura de la torre.
- Como la teoría de semejanza supone que los flujos permanecen casi constantes en toda la capa superficial atmosférica, hemos impuesto la condición de que la variación vertical de los flujos no fuera superior al 10 % entre los dos niveles.
- Además, para minimizar el error en la estimación, se impuso un límite mínimo de turbulencia, según los criterios propuestos por Hogstrom (1988); para el análisis de  $\Phi_m$  sólo se utilizarían los registros con  $u_* \geq 0.1$  m/s y para el análisis de  $\Phi_h$  aquellos que cumplieren que  $|H| \geq 10$  W/m<sup>2</sup> y  $u_* \geq 0.1$  m/s.

Los registros empleados para este estudio fueron los correspondientes a periodos de 30 minutos. En la experimentación de SABLES-98 se registraron 852 medidas de 30 minutos de promedio para cada variable. El procesado de los datos filtró casi un 10% de los mismos, de tal manera que se recopilaron 444 situaciones de estabilidad y 327 de inestabilidad.

## 5.2.2 Variables medias y sus gradientes

Los gradientes térmicos y dinámicos se calcularon, a partir del ajuste, en los niveles correspondientes a los anemómetros sónicos.

La teoría de semejanza impone una condición de contorno al gradiente dinámico,  $\Phi_m(0) = 1$ , pero ninguna para el gradiente térmico ni explicita un valor para la constante de von Karman. En estas circunstancias, antes de evaluar los gradientes adimensionales diabáticos es necesario estimar el valor de la constante de von Karman y el del gradiente de temperatura en la neutralidad, apartado 5.2.2.1. Posteriormente, en el apartado 5.2.2.2 se estiman las funciones adimensionales y se comparan con los de la literatura.

### 5.2.2.1 Determinación de la constante de von Karman y del valor de $\Phi_h$ en la neutralidad

En este apartado explicamos la metodología que hemos empleado para estimar el valor de la constante de von Karman y el del gradiente de temperatura en la neutralidad, donde imponemos que la neutralidad se define bajo la condición de  $|z/L| \leq 0.1$ . Después se muestran los resultados obtenidos en nuestra experimentación.

#### • Metodología

El procedimiento utilizado para determinar el valor de la constante de von Karman es el siguiente:

Inicialmente se toma un valor de  $k$  comprendido dentro del rango (0.35-0.42), establecido por la literatura y ampliamente aceptado, y se calcula el gradiente  $\Phi_m$  en condiciones de casi neutralidad. Con los datos obtenidos, se estima  $\Phi_m$  en función de  $z/L$ , mediante el método de los mínimos cuadrados, suponiendo que responde a un ajuste polinómico de segundo grado, (Hogstrom, 1988). El término independiente del polinomio estimado representa al valor de  $\Phi_m$  en la neutralidad. Se concluye el proceso cuando el valor de  $k$  probado consigue que el gradiente dinámico sea 1 en la neutralidad.

La determinación del valor de  $k$  nos permite estimar el valor del gradiente térmico en la neutralidad, a partir del término independiente del ajuste polinómico de segundo grado, igual que el empleado con el gradiente dinámico.

### • Resultados

La Figura 5.5 muestra las gráficas de  $\Phi_m$  y  $\Phi_h$  en función del parámetro de estabilidad adimensional, dentro del rango de estabilidad neutral  $|z/L| \leq 0.1$ , para el valor de 0.40 de la constante de von Karman. Las curvas dibujadas en la Figura 5.5 corresponden a los ajustes por mínimos cuadrados de los datos, que se expresan en las ecuaciones 5.3 y 5.4 para el viento y la temperatura, respectivamente.

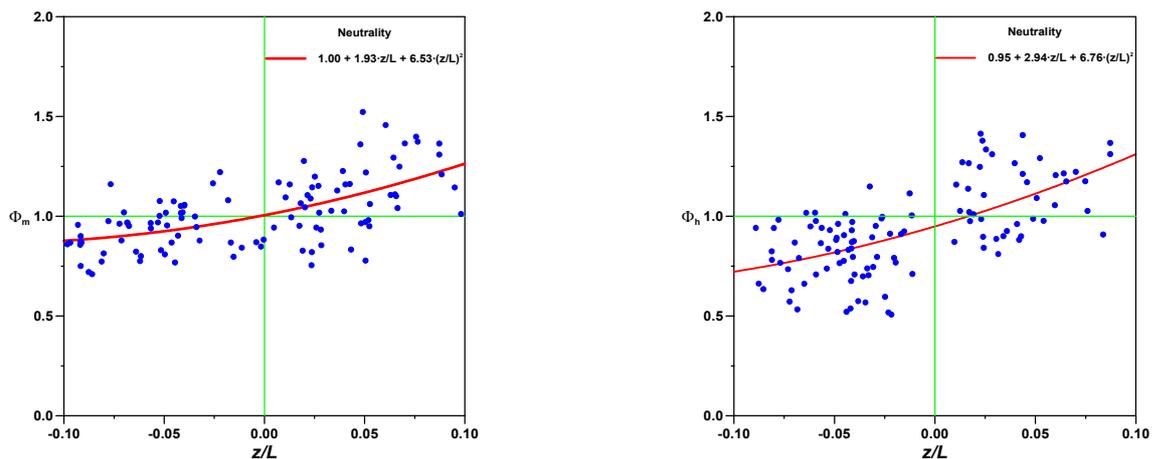


Figura 5.5 Representación de los gradientes adimensionales,  $\Phi_m$  (izquierda) y  $\Phi_h$  (derecha), frente al parámetro de estabilidad,  $z/L$ , cerca de la neutralidad, en el rango de  $|z/L| \leq 0.1$ , cuando el valor de  $k=0.40$ . Las curvas dibujadas en las gráficas representan los ajustes estimados.

Para elaborar el estudio dinámico se han utilizado 110 medidas de casi neutralidad, mientras que para el caso térmico se han evaluado 106 datos.

$$\Phi_m(z/L) = 1.00 + 1.93z/L + 6.53(z/L)^2 \quad |z/L| \leq 0.1 \quad (5.3)$$

$$\Phi_h(z/L) = 0.95 + 2.94z/L + 6.76(z/L)^2 \quad |z/L| \leq 0.1 \quad (5.4)$$

La estimación de los polinomios del ajuste sitúa al coeficiente de regresión,  $R^2$ , en 0.81 y 0.77 para el gradiente dinámico y el térmico, respectivamente.

La expresión 5.3 indica que  $\Phi_m$  vale uno en la neutralidad, como exige la teoría de semejanza y que sirve para determinar  $k$ . En consecuencia, el valor estimado de la constante de von Karman es de  $k = 0.40 \pm 0.01$ , siendo este valor equiparable al encontrado por Höglström (1985; 1988).

En cuanto al valor obtenido de  $\Phi_h$  en la neutralidad, según la expresión 5.4, es de 0.95, que también se encuentra en total concordancia con Högström (1988), a diferencia del valor de 0.74 de Businger et al. (1971), con  $k=0.35$ , y Dyer et al. (1982) con  $\Phi_h(0) = 1$  que utilizó  $k=0.40$ , pero sólo trabajó con datos en casi neutralidad de la estratificación inestable, es decir en el rango  $z/L \leq 0$ . Por otro lado, Gibson y Launder (1978) concluyeron que dicho valor en el laboratorio es de 0.93, muy próximo al valor que se ha alcanzado en nuestro estudio de campo.

### 5.2.2.2 Análisis de $\Phi_m$ y $\Phi_h$

En la teoría de semejanza, los gradientes adimensionales se estudian por separado, dependiendo del carácter de la estratificación, inestable y estable. Y, típicamente, se representan los valores medidos individualmente de  $\Phi_m$  y  $\Phi_h$  en escala logarítmica en función del parámetro de estabilidad adimensional  $z/L$ .

A continuación se explicitan las formas de las relaciones de semejanza que hemos utilizado en nuestra parametrización y, posteriormente, se presentan los resultados obtenidos en SABLES-98 y la comparación con las propuestas por Zilitinkevich y Chalikov (1968), Businger et al. (1971) y Dyer (1974), habiendo sido modificadas todas ellas para  $k=0.40$ , (Hogstrom, 1988), para que los resultados sean contrastables.

- **Formas de las relaciones de semejanza**

Las formas aceptadas, generalmente, de  $\Phi_m$  y  $\Phi_h$ , sobre la base del experimento de Kansas (EE.UU.) en 1968 (Izumi, 1971), que se diseñó para estudiar el comportamiento de la capa superficial y para analizar la validez de la hipótesis de semejanza de Monin-Obukhov (Businger et al., 1971), y otros experimentos (Kantha y Clayson, 2000), son las siguientes:

$$\Phi_m = \begin{cases} (1 - \gamma_1 z/L)^{-1/4} & z/L < 0 \text{ (inestable)} \\ 1 + \beta_1 z/L & z/L \geq 0 \text{ (estable)} \end{cases} \quad (5.5)$$

$$\Phi_h = \begin{cases} \alpha (1 - \gamma_2 z/L)^{-1/2} & z/L < 0 \text{ (inestable)} \\ \alpha + \beta_2 z/L & z/L \geq 0 \text{ (estable)} \end{cases} \quad (5.6)$$

No obstante, existen ciertas diferencias en los valores estimados de las constantes  $\alpha$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\gamma_1$  y  $\gamma_2$  en las expresiones anteriores obtenidas por varios investigadores. Las principales causas de estas diferencias son los errores inevitables de medida y las desviaciones de las condiciones ideales que supone la teoría.

- **Estratificación inestable**

En la Figura 5.6 se muestran los valores de  $\Phi_m$  y  $\Phi_h$  en función del parámetro de estabilidad  $z/L$  para la estratificación inestable. Los resultados presentan la dispersión típica de los experimentos de la turbulencia en la capa superficial atmosférica. Con la experimentación se han estimado, mediante el método de los mínimos cuadrados, los siguientes ajustes:

$$\Phi_m(z/L) = (1 - 24z/L)^{-1/4} \quad -3 < z/L \leq 0 \quad (5.7)$$

$$\Phi_h(z/L) = 0.95(1 - 13z/L)^{-1/2} \quad -3 < z/L \leq 0 \quad (5.8)$$

Los coeficientes de correlación de las estimaciones presentadas en las ecuaciones 5.7 y 5.8 son de 0.78 para el gradiente dinámico y de 0.72 para el térmico.

Las expresiones 5.7 y 5.8 se han representado en la Figura 5.6 conjuntamente con las propuestas por Zilitinkevich y Chalikov (1968), Businger et al. (1971) y Dyer (1974). En las tablas 5.3 y 5.4 se presentan las funciones de semejanza de los gradientes dinámicos y térmicos hallados por estos autores, respectivamente, y se explicitan los coeficientes de correlación obtenidos por sus funciones de semejanza en nuestro experimento.

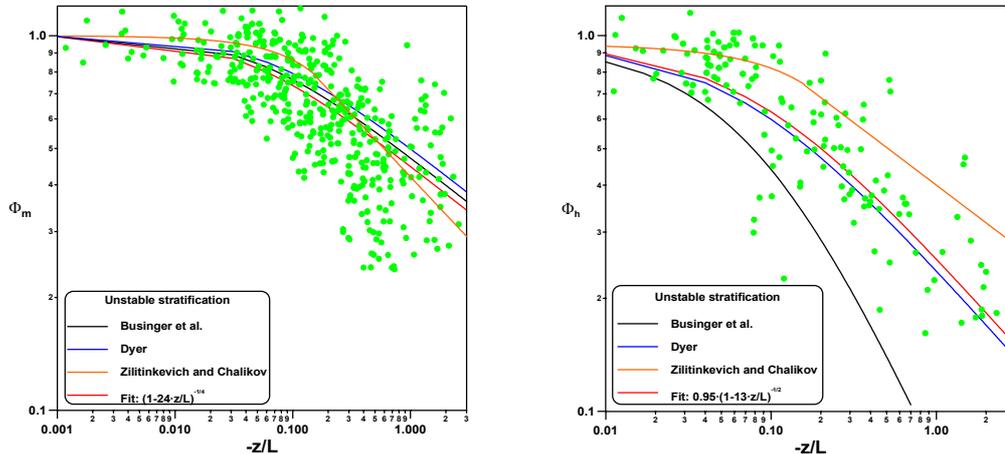


Figura 5.6 Representación log-log de los gradientes adimensionales,  $\Phi_m$  (izquierda) y  $\Phi_h$  (derecha), frente al parámetro de estabilidad,  $z/L$ , con estratificación inestable. Las curvas que aparecen en las gráficas representan los ajustes estimados y las expresiones de diferentes autores.

Tabla 5.3 Gradientes adimensionales dinámicos con estratificación inestable. El coeficiente de correlación hace referencia a la comparación de los datos de SABLES-98 con las curvas propuestas en la literatura, modificadas por Hogstrom (1988) para  $k=0.4$ .

Autor	$\Phi_m(z/L)$	$R^2$
Businger et al. (1971)	$(1 - 19.3z/L)^{-1/4} \quad z/L \leq 0$	0.65
Dyer (1974)	$(1 - 15.2z/L)^{-1/4} \quad z/L \leq 0$	0.73
Zilitinkevich y Chalikov (1968)	$\begin{cases} 1 + 1.38z/L & -0.16 \leq z/L \leq 0 \\ 0.42(-z/L)^{-1/3} & z/L \leq -0.16 \end{cases}$	0.67

Tabla 5.4 Gradientes adimensionales térmicos con estratificación inestable. El coeficiente de correlación hace referencia a la comparación de los datos de SABLES-98 con las curvas propuestas en la literatura, modificadas por Hogstrom (1988) para  $k=0.4$ .

Autor	$\Phi_h(z/L)$	$R^2$
Businger et al. (1971)	$0.95(1 - 11.6z/L)^{-1/2} \quad z/L \leq 0$	0.32
Dyer (1974)	$0.95(1 - 15.2z/L)^{-1/2} \quad z/L \leq 0$	0.67
Zilitinkevich y Chalikov (1968)	$\begin{cases} 0.95 + 1.31z/L & -0.16 \leq z/L \leq 0 \\ 0.40(-z/L)^{-1/3} & z/L \leq -0.16 \end{cases}$	0.51

Los resultados presentados en la Figura 5.6 (izquierda) y la Tabla 5.3 del gradiente adimensional dinámico muestran que los experimentos de Zilitinkevich y Chalikov (1968), Businger et al. (1971), Dyer (1974) y concuerdan sustancialmente entre sí, así como con el ajuste hallado en nuestro experimento.

Para  $\Phi_h$ , Figura 5.6 (derecha) y tabla 5.4, Dyer modificado (1974) y nuestra parametrización muestran una gran similitud y acuerdo. Mientras que para Zilitinkevich y Chalikov (1968) y Businger et al. (1971) existe un cierto desajuste respecto a los datos, la primera sobreestima los gradientes y la segunda los subestima.

• **Estratificación estable**

En la Figura 5.7 se muestran los valores estimados de  $\Phi_m$  y de  $\Phi_h$  en función del parámetro de estabilidad  $z/L$  en estratificación estable. Los resultados presentan, también, la dispersión típica de la mayoría de los experimentos de la capa superficial. Según el ajuste por mínimos cuadrados hallado se obtienen las expresiones siguientes:

$$\Phi_m(z/L) = 1 + 5.2z/L \quad 2 > z/L \geq 0 \quad (5.9)$$

$$\Phi_h(z/L) = 0.95 + 4.5z/L \quad 2 > z/L \geq 0 \quad (5.10)$$

Los coeficientes de correlación,  $R^2$ , calculados valen 0.85 y 0.82 para el gradiente dinámico y el térmico, respectivamente.

Como en el caso inestable, estas expresiones se representan en la Figura 5.7 conjuntamente con las obtenidas por los autores que se muestran en las tablas 5.5 y 5.6 para los gradientes dinámicos y térmicos, respectivamente, donde se expone el coeficiente de correlación de cada uno de ellos con los datos de SABLES-98.

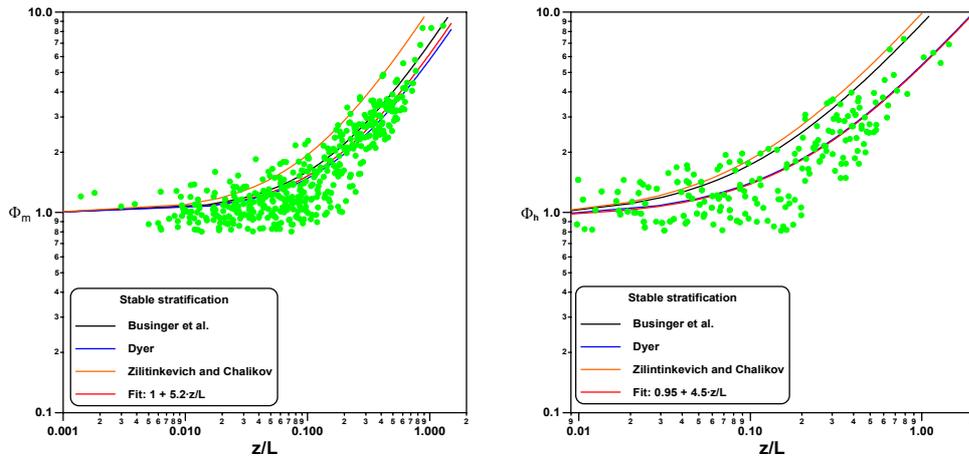


Figura 5.7 Representación log-log de los gradientes adimensionales,  $\Phi_m$  (izquierda) y  $\Phi_h$  (derecha), en función del parámetro de estabilidad,  $z/L$ , con estratificación estable. Las curvas que aparecen en las gráficas representan los ajustes estimados y las expresiones de diferentes autores.

Con estratificación estable, en  $\Phi_m$ , Figura 5.7 (izquierda) y Tabla 5.5, se aprecia como las curvas de Businger et al. (1971) y Dyer (1974) ofrecen un buen ajuste con los datos, mientras que Zilitinkevich y Chalikov (1968) presenta valores excesivamente altos.

Tabla 5.5 Gradientes adimensionales dinámicos con estratificación estable. El coeficiente de correlación hace referencia a la comparación de los datos de SABLES-98 con las curvas propuestas en la literatura, modificadas por Hogstrom (1988) para  $k=0.4$ .

Autor	$\Phi_m(z/L)$	$R^2$
Businger et al. (1971)	$1 + 6.0z/L \quad z/L \geq 0$	0.73
Dyer (1974)	$1 + 4.8z/L \quad z/L \geq 0$	0.78
Zilitinkevich y Chalikov (1968)	$1 + 9.4z/L \quad z/L \geq 0$	0.42

Tabla 5.6 Gradientes adimensionales térmicos con estratificación inestable. El coeficiente de correlación hace referencia a la comparación de los datos de SABLES-98 con las curvas propuestas en la literatura, modificadas por Hogstrom (1988) para  $k=0.4$ .

Autor	$\Phi_h(z/L)$	$R^2$
Businger et al. (1971)	$0.95 + 7.8z/L \quad z/L \geq 0$	0.54
Dyer (1974)	$0.95 + 4.5z/L \quad z/L \geq 0$	0.82
Zilitinkevich y Chalikov (1968)	$0.95 + 8.9z/L \quad z/L \geq 0$	0.36

Para  $\Phi_h$ , Figura 5.7 (derecha) y Tabla 5.6, Dyer (1974) presenta un buen ajuste, pero Zilitinkevich y Chalikov (1968) y Businger et al. (1971) sobreestiman los gradientes adimensionales.

### 5.2.3 Validación del modelo.

Una vez estimadas las funciones de semejanza con los datos de SABLES-98, pretendemos estudiar su viabilidad y su validez universal. Con este objetivo, en este apartado, presentamos el modelo de la teoría de semejanza, y su correspondiente validación, para la estimación del perfil vertical del módulo del viento y de la temperatura potencial, que además permite estimar los flujos de calor y de momento.

#### • Modelo

El modelo que propone la teoría de semejanza permite extrapolar los valores del módulo del viento y de la temperatura a diferentes alturas en diferentes regímenes, así como calcular la longitud de Obukhov,  $L$ , el parámetro adimensional,  $z/L$ , que tiene en cuenta el tipo de estabilidad, la velocidad de rozamiento,  $u_*$ , y el flujo de calor superficial,  $H_0$ , dentro de la capa superficial atmosférica (Stull, 1988; Kantha y Clayson, 2000).

La integración entre dos niveles de la expresión 5.1, relación de semejanza para el módulo del viento,  $U$ , se puede expresar como

$$U(z_2) - U(z_1) = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \frac{z_2}{z_1} + \psi_m \left( \frac{z_2}{L} \right) - \psi_m \left( \frac{z_1}{L} \right) \right] \quad (5.11)$$

donde

$$\psi_m \left( \frac{z_2}{L} \right) - \psi_m \left( \frac{z_1}{L} \right) = \int_{\frac{z_1}{L}}^{\frac{z_2}{L}} \left[ \Phi_m \left( \frac{z}{L} \right) - 1 \right] \frac{d \left( \frac{z}{L} \right)}{\frac{z}{L}} \quad (5.12)$$

y de la expresión 5.2, relación de semejanza para la temperatura potencial,  $\Theta$ , se puede representar como

$$\Theta(z_2) - \Theta(z_1) = 0.95 \frac{\theta_*}{k} \left[ \ln \frac{z_2}{z_1} + \psi_h \left( \frac{z_2}{L} \right) - \psi_h \left( \frac{z_1}{L} \right) \right] \quad (5.13)$$

donde

$$\psi_h \left( \frac{z_2}{L} \right) - \psi_h \left( \frac{z_1}{L} \right) = \int_{\frac{z_1}{L}}^{\frac{z_2}{L}} \left[ \Phi_h \left( \frac{z}{L} \right) - 1 \right] \frac{d \left( \frac{z}{L} \right)}{\frac{z}{L}} \quad (5.14)$$

siendo  $\Phi_m(\frac{z}{L})$  y  $\Phi_h(\frac{z}{L})$  los gradientes adimensionales de momento y de calor, respectivamente, y  $L$  la longitud de Obukhov<sup>2</sup> definida como

$$L = -\frac{u_*^3 \cdot \Theta}{k \cdot g \cdot \overline{(w'\theta')}_s} \quad (5.15)$$

donde  $u_*$  y  $\overline{(w'\theta')}_s$  son los flujos turbulentos de momento (velocidad de rozamiento) y de calor en la superficie, respectivamente, y  $\theta_*$  es la escala de temperatura que está definida como

$$\theta_* = \frac{\overline{(w'\theta')}_s}{u_*} \quad (5.16)$$

Para resolver las expresiones 5.11 y 5.13 es necesario conocer los valores de  $\theta_*$ ,  $u_*$  y  $L$ . Con este objetivo, a partir de dos medidas de viento y temperatura en dos niveles de la capa superficial, se inicializa el modelo suponiendo que la estratificación es indiferente. En este caso (5.11) y (5.13) se transforman en expresiones mucho más sencillas,

$$U(z_2) - U(z_1) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z_2}{z_1} \quad (5.17)$$

$$\Theta(z_2) - \Theta(z_1) = 0.95 \frac{\theta_*}{k} \ln \frac{z_2}{z_1} \quad (5.18)$$

correspondientes al perfil logarítmico típico en la neutralidad.

Las expresiones (5.17) y (5.18) permiten calcular  $u_*$  y  $\theta_*$  conociendo el módulo del viento y la temperatura potencial a dos niveles. Así, pues, y a partir de la expresión (5.16), tendremos

$$\overline{(w'\theta')}_s = u_* \theta_* \quad (5.19)$$

que permite calcular el flujo de calor en la superficie. A partir de los valores obtenidos y con ayuda de la expresión 5.15 se estima  $L$ . Con este valor inicial de  $L$  y utilizando las expresiones 5.11 y 5.13 conjuntamente con las funciones  $\Phi(\frac{z}{L})$  correspondientes, según los diferentes tipos de estratificación, usando las ecuaciones 5.7 y 5.8 en el caso inestable y las ecuaciones 5.9 y 5.10 en el estable, calcularemos el primer valor de  $u_*$ ,  $\theta_*$ ,  $\overline{(w'\theta')}_s$  y, consecuentemente, el nuevo valor de  $L$ . Continuaremos este proceso iterativo hasta que la diferencia entre dos valores consecutivos de  $L$  sea menor que un número prefijado, que en nuestro caso hemos utilizado el  $10^{-6}$  metros, atendiendo a las limitaciones informáticas del sistema que procesa los datos.

En consecuencia, el método nos permitirá calcular los valores de  $u_*$ ,  $\theta_*$ ,  $\overline{(w'\theta')}_s$  y  $L$ , según el tipo de estratificación, a partir de las medidas en dos niveles de  $U$  y  $\Theta$ , dentro de la capa superficial atmosférica. De la misma manera, el modelo pronostica la temperatura y el módulo del viento a cualquier altura de la capa superficial atmosférica. A continuación se exponen los resultados obtenidos tras la aplicación del modelo en la torre meteorológica de Vilaseca, sección 4.2.

<sup>2</sup> Ya definida en el primer capítulo de esta memoria con la numeración 1.20

## • Resultados

El objetivo es comparar los valores que toma el módulo del viento y la temperatura del aire, a diferentes niveles, a partir de la información registrada en dos niveles de la capa superficial en la torre meteorológica de Vilaseca. El motivo principal por el que se utiliza la torre de Vilaseca para validar el modelo es para enfatizar el carácter universal de éste.

Los datos de entrada del modelo son la temperatura potencial y el módulo del viento en dos niveles cercanos a la superficie, a 5 y 10 metros de altura, de la torre meteorológica de Vilaseca. Y los datos de salida son la temperatura potencial y el módulo del viento a 35 y 50 metros.

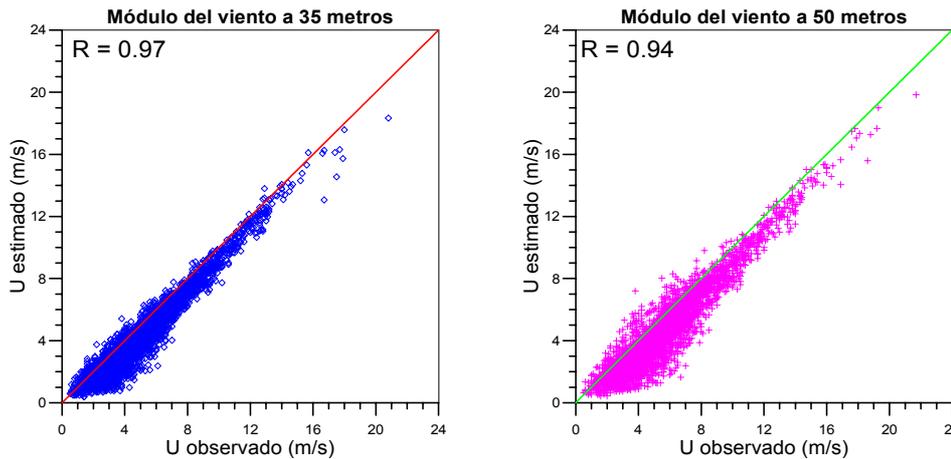


Figura 5.8 Validación del modelo de la teoría de semejanza del módulo del viento,  $U$ , a 35 metros (izquierda) y 50 metros (derecha).

A partir de las medidas de temperatura y de viento a 5 y 10 metros, el modelo estima los parámetros  $u_*$ ,  $\theta_*$ ,  $\overline{(w'\theta')_s}$  y  $L$ . Tomando la altura de 10 metros como el nivel de referencia del modelo, los parámetros mencionados permiten estimar la temperatura y el viento a 35 y 50 metros. Así, para validar el modelo se comparan estas estimaciones con las medidas registradas en los respectivos niveles. Los resultados de las comparaciones se presentan en las figuras 5.8 y 5.9. En la Figura 5.8 se expone la comparación del módulo del viento entre los valores medidos a 35 y 50 metros frente a los valores estimados mediante el modelo. Mientras que, en la Figura 5.9 se compara el modelo para la temperatura potencial.

En cada una de las gráficas de las figuras 5.8 y 5.9 se expresa el valor del coeficiente de ajuste calculado para cuantificar la calidad del modelo. Como se puede deducir, por el valor del coeficiente de correlación obtenido,  $R > 0.9$ , podemos afirmar que el ajuste es altamente fiable. En particular, para la temperatura el comportamiento es mejor que para el viento, y la estimación es mejor a 35 que a 50 metros.

La modelización anterior permite conocer los perfiles del viento y de la temperatura que son de gran utilidad en los modelos de dispersión de contaminantes.

En general, la única restricción que impone el modelo es que la altura máxima de aplicación del modelo es de unos 150 metros en el caso de estratificación inestable y alrededor de 50 metros en el caso de estratificación estable, ya que la teoría de semejanza aplicada es de capa superficial.

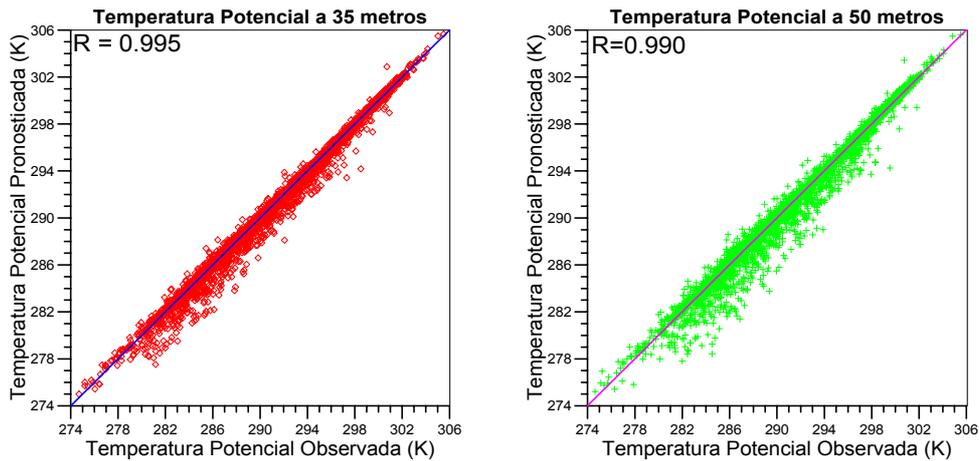


Figura 5.9 Validación del modelo de la teoría de semejanza de la temperatura potencial a 35 metros (izquierda) y 50 metros (derecha).

### 5.2.4 Conclusiones de la teoría de semejanza

Se ha sometido a revisión la teoría de semejanza en la capa superficial atmosférica durante la campaña experimental SABLES-98.

El análisis del perfil del flujo en el rango de estabilidad  $|z/L| \leq 0.1$ , estratificación neutral, sugiere un valor de la constante de von Karman de 0.40 y un valor de  $\Phi_h$  en la neutralidad de 0.95.

La experimentación, también, suministró las constantes de las funciones de semejanza del módulo del viento y la temperatura. Que se han comparado con las encontradas por Zilitinkevich y Chalikov (1968), Businger et al. (1971) y Dyer (1974), apreciándose especial concordancia con Dyer et al. (1974).

Además, se ha realizado la validación del modelo de la teoría de semejanza en la torre meteorológica de Vilaseca. Los resultados obtenidos remarcan que el modelo es una buena aproximación en la capa superficial y tiene carácter universal. En particular, el modelo se comporta mejor para la temperatura que para el módulo del viento y empeora ligeramente con la altura.

En consecuencia, la modelización expuesta nos permite conocer los flujos, los perfiles del módulo del viento y de la temperatura en la capa superficial atmosférica, que son de gran utilidad en los modelos de dispersión de contaminantes. Así que, se proponen las expresiones 5.7 y 5.8 para los gradientes dinámicos y térmicos en el caso de estratificación inestable y las 5.9 y 5.10 en la estabilidad.

### 5.3 Parametrización de los estadísticos turbulentos

En esta sección presentamos la parametrización de las desviaciones estándar de las fluctuaciones del viento transversal y vertical ( $\sigma_v$ ,  $\sigma_w$ ) en función de la velocidad del viento y la estabilidad estática realizada con los datos recogidos en SABLES-98.

- **Motivación**

Existen beneficios prácticos por conseguir correlaciones sencillas entre los valores de  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$  en función de la velocidad del viento y el gradiente vertical de temperatura. Debido

a que estas variables son fáciles de medir e incluso de estimar en la capa superficial atmosférica, como demostramos en la sección anterior.

El objetivo que pretende este modelo es estimar la turbulencia sólo con datos medios de temperatura y viento, con el consecuente ahorro de tiempo y dinero que supone. Concretamente, los motivos por los que utilizamos esta parametrización son los siguientes:

- Se utilizan estas dos variables porque sus gradientes son los generadores principales de la turbulencia térmica y dinámica.
- Los valores de las desviaciones estándar del viento generalmente se estiman usando parámetros difíciles de medir, tales como la altura de la capa de mezcla o el flujo de calor sensible (Hanna y Chang, 1993).
- En la práctica la estimación de la dispersión se basa en los esquemas de clasificación (Pasquill, 1961), que no son teóricamente satisfactorios porque suponen implícitamente que la turbulencia atmosférica ocurre en subgrupos distintos. Cuando, en realidad, la turbulencia es, en general, una función continua de las variables meteorológicas.
- La instrumentación necesaria para medir y procesar los datos relacionados con las fluctuaciones del viento, como el anemómetro sónico, es especializada y generalmente cara.

Por estas razones, en este estudio se desarrollan unas ecuaciones empíricas simples que presentan las desviaciones estándar de las fluctuaciones del viento transversal y vertical en función de dos variables fáciles de medir, la velocidad del viento y la estabilidad estática (Leahey et al., 1994; 1995) con instrumental económico operando en baja frecuencia.

La velocidad del viento,  $U$ , se emplea normalmente en la mayoría de evaluaciones del comportamiento de la atmósfera, mientras que la información disponible de los valores típicos de  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$  y su dependencia con la estabilidad estática,  $S$ , ecuación 4.2, es escasa.

El principal objetivo de este trabajo es encontrar y presentar las ecuaciones que describen el patrón de conducta entre los parámetros turbulentos, el viento y la estabilidad estática en la capa superficial atmosférica. En bien de la simplicidad, las ecuaciones usadas para describir los patrones han sido limitadas a expresiones lineales o exponenciales.

Idealmente, las fluctuaciones del viento sobre terreno llano deberían ser muy parecidas bajo las mismas condiciones meteorológicas. Pero las observaciones de la turbulencia atmosférica muestran una amplia dispersión de los valores de la desviación estándar de las fluctuaciones de viento transversal y vertical para las mismas condiciones aparentes de estratificación térmica y dinámica. La experiencia demuestra, sin embargo, que los valores de  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$  pueden variar más de un factor 2 bajo lo que parecen ser condiciones meteorológicas idénticas. Se supone que las variaciones se atribuyen a fenómenos tales como la heterogeneidad y la no estacionalidad, como la ruptura de ondas de gravedad interna (Holets y Swanson, 1988; Mahrt, 1999; Poulos et al., 2002) o por el movimiento de las estructuras coherentes en la capa fronteriza (Gao et al., 1989; Ruscher y Mahrt, 1989; Blumen et al., 2001; Cuxart et al., 2002), que no son función de los mecanismos térmicos y mecánicos generados en el suelo.

En consecuencia, se desarrollan y se validan las ecuaciones de predicción usando los valores medianos de  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$  en un esfuerzo por discernir un patrón de conducta que pueda explicarse en términos de  $U$  y  $S$ . La predicción de la dispersión atmosférica con datos medios o medianos han reunido general aceptación y éxito, (Pasquill, 1961; Briggs, 1973; Martín, 1979; Hanna et al., 1982; Pasquill y Smith, 1983). En particular, son

preferibles los valores medianos de los parámetros de la dispersión a los valores medios, porque los valores medianos dan un peso menor a los datos inusuales, que pueden ser causados por la falta de estacionalidad o por fenómenos locales.

### 5.3.1 Metodología y procesado de los datos

La información recogida de la torre de 100 metros, en SABLES-98, se utilizó para calcular los valores medios y las varianzas de las variables meteorológicas en periodos de 5 minutos. Este promedio temporal se eligió por la necesidad de evaluar los efectos de la microescala, considerándose el periodo en el que las condiciones meteorológicas pueden esperarse que se mantengan razonablemente constantes en cualquier grado de estabilidad. Así, el análisis presentado en este trabajo relaciona las medias de cinco minutos de las desviaciones estándar de las fluctuaciones del viento con el módulo del viento y el gradiente térmico.

En particular, el análisis distingue los datos según la estratificación, estabilidad ( $\Delta\theta/\Delta z \geq 0$ ) e inestabilidad ( $\Delta\theta/\Delta z \leq 0$ ). Por continuidad, ambos estudios incluyen los datos recogidos bajo condiciones neutrales, porque en el valor singular asociado ( $\Delta\theta/\Delta z = 0$ ) sus conclusiones deben ser las mismas. Es decir, en el límite, con la estabilidad estática próxima a cero (atmósfera neutral), los resultados de los trabajos estables e inestables deben coincidir. En total, el estudio realizado ha reunido unos 2300 promedios de 5 minutos en situaciones de estabilidad y unos 2200 con inestabilidad.

El presente estudio se ha realizado en la capa comprendida entre los 6 y los 32 metros de altura. Las fluctuaciones de las componentes del viento se han recogido a partir de los anemómetros sónicos situados en los niveles de 6, 13 y 32 metros. Los datos se han agrupado según la estratificación que señalaba el gradiente de la temperatura potencial media del estrato, tomando como referencia los sensores de temperatura de 6 y 32 metros. Así, los valores del gradiente térmico,  $\Delta\theta/\Delta z$ , se obtuvieron a partir de las diferencias de la temperatura media entre los dos niveles más distantes.

Las estabilidades estáticas usadas en este estudio se normalizaron respecto a su valor medio, usando el subíndice  $n$  para indicar la normalización de este parámetro. El valor medio del parámetro de estabilidad estática fue de  $-0.0015 \text{ s}^{-2}$  para condiciones estables y  $0.00065 \text{ s}^{-2}$  en situaciones inestables. Así, por ejemplo, los valores de  $S_n$  de 1.0 y 2.0 indican que las estabilidades estáticas son una y dos veces mayores, respectivamente, que el valor medio observado, siendo  $S_n$  el parámetro de estabilidad estático normalizado por el valor promedio representativo de ambas situaciones estables e inestables.

El proceso se define de la siguiente manera, Figura 5.10:

1. Dividir los datos en categorías de estratificación (estabilidad e inestabilidad).
2. Para una misma categoría de estratificación, agrupar en 10 grupos los datos según la intensidad de la estratificación (semejante  $S_n$ ).
3. Para un misma intensidad de estratificación, agrupar los datos por intensidad dinámica, es decir, por tramos según la fuerza del viento, discretizando en intervalos de 0.5 m/s.
4. Escoger las medianas de  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$  como representantes de cada uno de los tramos del punto 3, siempre y cuando el número de muestras agrupadas en dicho tramo sea superior a 5.

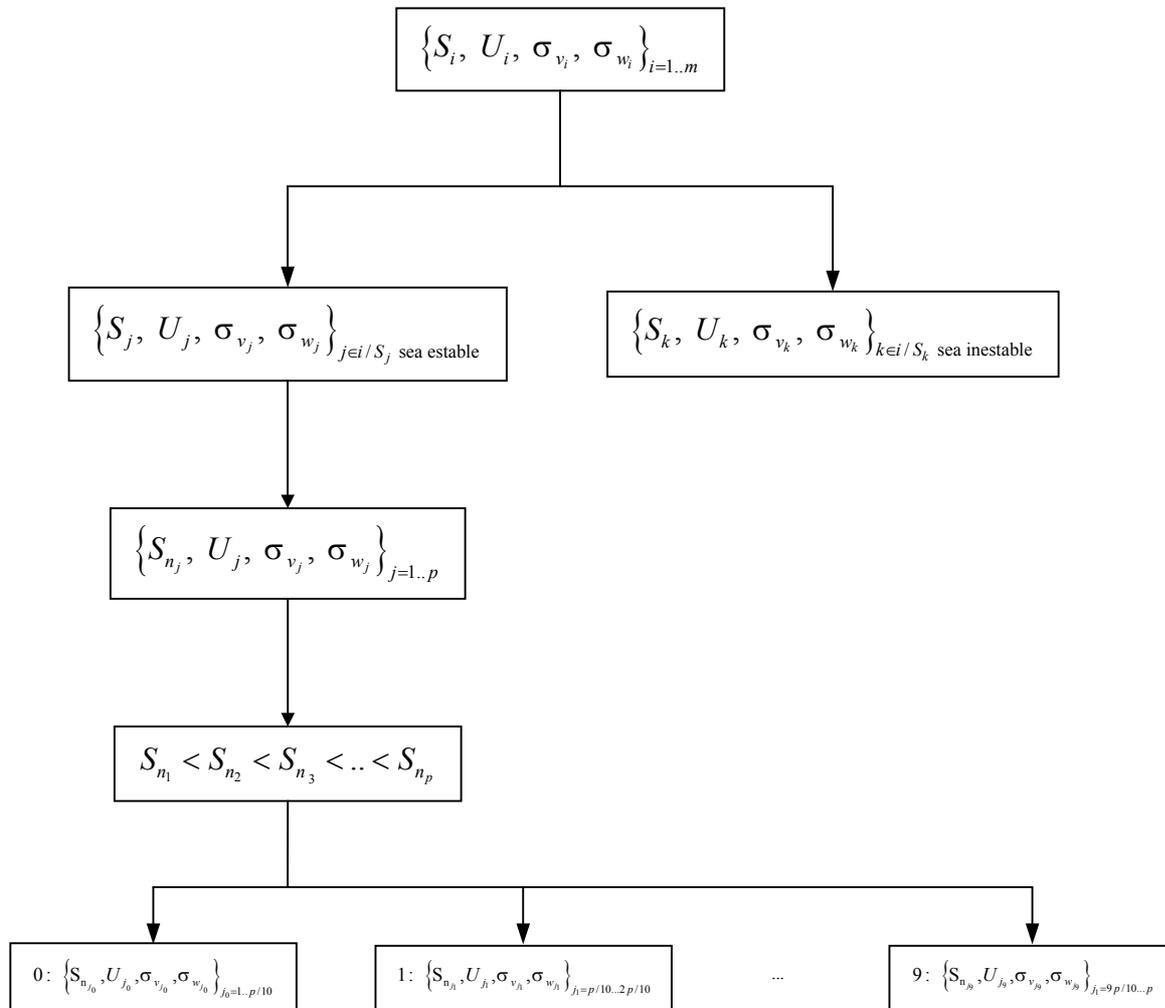


Figura 5.10 Esquema de la metodología empleada para estimar la parametrización de los parámetros turbulentos. Sólo se ha desarrollado la rama estable. El caso inestable sigue el mismo patrón que el caso estable.

Así, el método empleado para desarrollar las ecuaciones empieza por agrupar los valores calculados del viento medio,  $U$ , y las desviaciones estándar, según la estabilidad atmosférica.

Para cada tipo de estratificación, estable e inestable, se crean 10 tramos, de acuerdo con los gradientes de temperatura potencial asociados, con la intención de homogeneizar las características térmicas. Así, los valores de  $U$ ,  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$  se agrupan en un mismo grado de intensidad del gradiente térmico.

En consecuencia, para cada tramo de intensidad del gradiente térmico, dentro de la estratificación estable, tenemos unas 230 medidas, que es una décima parte de los sucesos recogidos en régimen estable. Mientras que en el caso inestable, a cada tramo le corresponden 220 medidas.

Esta fase del proceso equivale a calcular los percentiles de la serie del gradiente de temperatura, de tal manera que el primer tramo se asocia a los valores comprendidos entre los percentiles 0° y 10° del gradiente de temperatura potencial, el segundo se asocia al rango de valores entre el 10° y el 20° percentil, y así sucesivamente hasta completar toda la serie. El valor del 5° percentil del gradiente de temperatura se asignó como representante del primer tramo, el valor del 15° percentil al segundo, etc. La Tabla

5.7 presenta los valores de los percentiles de los gradientes de la temperatura potencial,  $\Delta\theta/\Delta z$ , y las estabildades estáticas asociadas,  $S_n$ .

Tabla 5.7 Valores de los percentiles del gradiente de temperatura potencial y la estabilidad estática normalizada asociada

Percentil	Estable		Inestable	
	$\Delta\theta/\Delta z$ ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ )	$S_n$	$\Delta\theta/\Delta z$ ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ )	$S_n$
5°	0.003	0.07	-0.005	0.26
15°	0.006	0.14	-0.009	0.46
25°	0.008	0.19	-0.011	0.61
35°	0.013	0.32	-0.013	0.72
45°	0.024	0.6	-0.017	0.88
55°	0.035	0.86	-0.02	1.03
65°	0.047	1.16	-0.022	1.16
75°	0.066	1.56	-0.026	1.33
85°	0.09	2.07	-0.030	1.6
95°	0.12	2.85	-0.027	1.92

El rango de valores del gradiente de temperatura en situaciones estables supera los 12°C/hm. Mientras que en condiciones de inestabilidad el máximo gradiente térmico se sitúa próximo a los 3°C/hm. Además, en la Tabla 5.7 destaca el hecho de que  $S_n$  varía dos órdenes de magnitud en situaciones estables y un orden de magnitud en el caso inestable.

En cada uno de los tramos se han ordenado los datos según el módulo del viento con la intención de obtener para cada intervalo de viento de 0.5 m/s la dispersión representativa de cada una de las componentes del viento, homogeneizando la componente dinámica, y tomando como representante de cada uno de estos tramos la mediana de la dispersión correspondiente. Así, para cada tramo de estabilidad se obtiene una serie de desviaciones según el módulo del viento asociado.

El proceso que se adoptó para designar si un tramo tenía o no representante de  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$  fue únicamente exigir la existencia de más de 5 muestras en dicho tramo. Este valor se asumió después de un análisis de las series resultantes. El número medio de muestras por tramo con representante fue de 15 muestras, en un rango de entre 5 y 24 muestras por tramo.

Finalmente, se analizan las series obtenidas y se buscan las posibles relaciones que permitan estimar la turbulencia a partir de los valores medios del módulo del viento y la estabilidad estática. En particular, para determinar las curvas y su análisis se ha tenido en cuenta que las ecuaciones han sido construidas con el requerimiento de que cuando  $S_n$  tiende a 0, en ambas estratificaciones, deben coincidir.

### 5.3.2 Resultados del análisis de datos

El estudio analiza el comportamiento de dos componentes del viento (lateral y vertical) en función del módulo del viento y la estabilidad estática. Cada una de las desviaciones estándar de las componentes del viento se ha diferenciado según la estabilidad.

Inicialmente se evalúa la componente transversal, que se corresponde con la dispersión lateral que sufre el flujo respecto de la dirección media del viento. A continuación se estudia la componente vertical, que muestra la dispersión del aire según la dirección perpendicular al plano horizontal. Para finalizar, en la sección 5.3.3, se comprueba la viabilidad del modelo que se propone en este trabajo y se compara con Hanna y Chang (1993).

### 5.3.2.1 Variaciones de $\sigma_v$ con la velocidad del viento y la estabilidad estática

Inicialmente se evalúa la componente transversal. Primero analizaremos los resultados en estratificación estable y posteriormente en estratificación inestable.

Las figuras 5.11 y 5.12 presentan, a modo de ejemplo, los gráficos de las medianas de  $\sigma_v$  para tres estabilidades estáticas diferentes en función del viento a 6 metros, en condiciones estables e inestables, respectivamente. De ellas derivamos las relaciones entre  $\sigma_v$ , la velocidad del viento y la estabilidad estática. Las comparaciones entre las  $\sigma_v$  observadas y las calculadas se evalúan en la sección 5.3.3.

Por motivos de las condiciones de frontera, hemos de tener en cuenta la tendencia, hacia la neutralidad, de la expresión estable y la inestable. En particular, se realizó un estudio previo que recogía los valores del tramo menos estable y menos inestable con viento inferior a 1 m/s y se estimó el valor medio en la frontera de 0.35 m/s para  $\sigma_v$ .

- **Condiciones estables**

La Figura 5.11 muestra las medianas de las desviaciones estándares de la componente transversal del viento,  $\sigma_v$ , para tres valores de  $S_n$  en función de la velocidad del viento a 6 metros. Por nitidez gráfica sólo se visualizan 3 de las 10 series calculadas para estimar las relaciones. En ellas se aprecian las relaciones derivadas entre  $\sigma_v$  y la velocidad del viento,  $U$ . Hemos decidido representar las clases extremas y la central para mostrar la amplitud de posibilidades, en los apartados siguientes utilizamos el mismo criterio.

Existe una correlación entre  $\sigma_v$  y  $S_n$  y se observa una relación lineal entre la  $\sigma_v$  y  $U$ , que además depende de la estabilidad estática, Figura 5.11. En consecuencia, se propone realizar un ajuste lineal para cada clase de estabilidad, que son las líneas de la gráfica 5.11, mostrando el aumento de  $\sigma_v$ . Asumiendo, por simplicidad, que, para una misma escala de estratificación  $\sigma_v$  varía linealmente con el viento, es decir, sigue una relación del tipo:

$$\sigma_v = A_v + B_v U \quad (5.20)$$

estimamos los valores de los parámetros  $A_v$  y  $B_v$  que ajustan cada una de las 10 clases de estabilidad. En la Tabla 5.8 se muestran los valores de los parámetros citados.

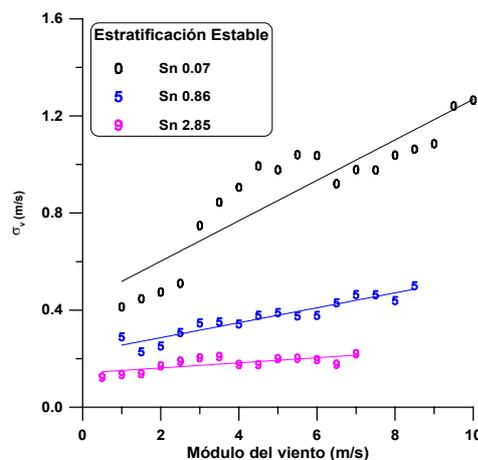


Figura 5.11 Medianas de  $\sigma_v$  en función de la velocidad del viento para tres condiciones de estabilidad estática y sus respectivos ajustes lineales.

En la Tabla 5.8 se observa que tanto los valores de  $A_v$  como los de  $B_v$  decrecen al aumentar el parámetro  $S_n$ . Para obtener la expresión general de estos parámetros se aplica el método de los mínimos cuadrados bajo la suposición de que  $A_v$  varía linealmente y  $B_v$  decrece exponencialmente respecto a la estabilidad estática, es decir,

$$A_v = 0.35 + C_1 S_n \tag{5.21}$$

$$B_v = C_2 e^{-C_3 S_n}$$

donde  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  son las constantes a determinar. Para hallar sus valores hay que recurrir a un nuevo ajuste. Obteniéndose los siguientes datos:

$$C_1 = -0.09 \text{ m/s}, C_2 = 0.08 \text{ y } C_3 = 0.83 \tag{5.22}$$

Los coeficientes de correlación de los ajustes es superior a 0.82.

Tabla 5.8 Valores de los coeficientes de la regresión en la estimación de  $\sigma_v$  con estratificación estable

$S_n$	$A_v$ (m/s)	$B_v$	$R^2$
0.07	0.43	0.08	0.83
0.14	0.33	0.07	0.85
0.19	0.31	0.07	0.90
0.32	0.31	0.06	0.89
0.6	0.26	0.05	0.92
0.86	0.23	0.04	0.90
1.16	0.22	0.03	.081
1.56	0.19	0.02	0.62
2.07	0.17	0.01	0.6
2.85	0.14	0.01	0.56

En consecuencia, la expresión general de la fluctuación lateral del viento en función de la estabilidad estática y el viento es:

$$\sigma_v = 0.35 - 0.09 S_n + 0.08 U e^{-0.83 S_n} \tag{5.23}$$

A diferencia de nuestros resultados, el análisis de datos relativo a la desviación estándar transversal de la fluctuación del viento,  $\sigma_v$ , que se recoge en la literatura, en condiciones estables, sugiere la tendencia a ser constante en un rango de viento entre 1 y 5  $\text{ms}^{-1}$ . La constante depende de condiciones tales como el promedio temporal y la topografía. Hanna (1983) observó un valor de  $\sigma_v=0.5 \text{ ms}^{-1}$  con medias horarias sobre estudios realizados en terreno llano, mientras que Leahey y Hansen (1985) y Leahey et al. (1988) obtenían un valor de  $\sigma_v=0.6 \text{ ms}^{-1}$  de su estudio en una pradera con promedios también horarios, mientras que Leahey et al. (1994) estimaban un valor constante de  $\sigma_v=0.37\text{m/s}$  con medias de 30 minutos para viento inferior a 3 m/s. Además, los valores de  $\sigma_v$  tienden a crecer linealmente con el módulo del viento cuando éste supera los 5m/s en el estudio horario y los 3m/s en el semihorario.

El motivo principal de esta discrepancia es el promedio temporal utilizado. Mientras nosotros pretendemos evaluar la turbulencia más fina posible y homogénea, los estudios mencionados en el párrafo anterior evalúan la turbulencia más basta, suavizando el comportamiento de las fluctuaciones del viento.

• **Condiciones inestables**

La Figura 5.12 presenta las medianas de  $\sigma_v$  para tres valores diferentes de la estabilidad estática en función de la velocidad del viento a 6 metros de altura con inestabilidad.

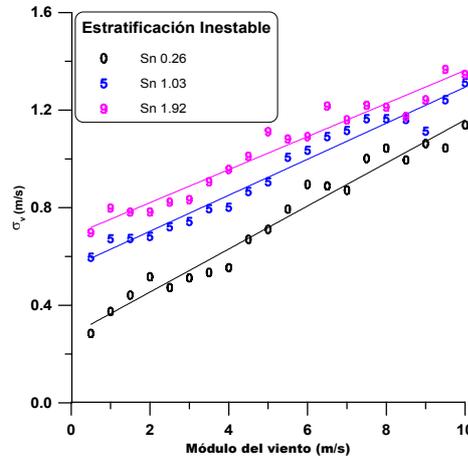


Figura 5.12 Medianas de  $\sigma_v$  en función de la velocidad del viento para tres condiciones de inestabilidad estática y sus respectivos ajustes lineales.

Como en el caso anterior, suponemos que  $\sigma_v$  para cada clase de estratificación inestable varía linealmente con el viento. Los valores de los ajustes lineales se muestran en la Tabla 5.9, donde se observa que  $A_v$  aumenta con la estabilidad estática, mientras que  $B_v$  disminuye al crecer la estabilidad.

Atendiendo a la condición de contorno y utilizando el mismo procedimiento que en el apartado anterior, ecuaciones 5.20 y 5.21, obtenemos la siguiente expresión

$$\sigma_v = 0.35 + 0.3S_n + 0.08Ue^{-0.14S_n} \tag{5.24}$$

Consecuentemente, la ecuación anterior se recomienda para la estimación de  $\sigma_v$  en condiciones inestables. A diferencia de Leahy et al. (1995) que supone que el comportamiento es constante para cada estabilidad estática para viento inferior a 3m/s y para vientos superiores aumenta linealmente.

Tabla 5.9 Valores de los coeficientes de la regresión en la estimación de  $\sigma_v$  con estratificación inestable.

$S_n$	$A_v$ (m/s)	$B_v$	$R^2$
0.26	0.31	0.088	0.97
0.46	0.46	0.080	0.96
0.61	0.49	0.072	0.97
0.72	0.52	0.075	0.95
0.88	0.54	0.070	0.97
1.03	0.56	0.074	0.97
1.16	0.60	0.071	0.96
1.33	0.65	0.065	0.95
1.6	0.67	0.067	0.94
1.92	0.69	0.068	0.95

**5.3.2.2 Variaciones de  $\sigma_w$  con la velocidad del viento y la estabilidad estática**

Procediendo de forma análoga, la componente vertical también la hemos estudiado diferenciando la estratificación, estable e inestable. Así, las figuras 5.13 y 5.14 presentan, a modo de ejemplo, los gráficos de las medianas de  $\sigma_w$  para tres

estabilidades estáticas diferentes en función del viento registrado a 6 metros de altura, en condiciones estables e inestables, respectivamente. De ellas derivamos las relaciones entre  $\sigma_w$ , la velocidad del viento y la estabilidad estática. Las comparaciones entre las  $\sigma_w$  observadas y las calculadas se evalúan en la sección 5.3.3.

Por las condiciones de frontera hemos de tener en cuenta el comportamiento de  $\sigma_w$  en la neutralidad. En particular, se realizó un estudio previo que recogía los valores del tramo menos estable y el menos inestable con viento inferior a 1 m/s y se estimó el valor medio en la frontera de 0.16 m/s para  $\sigma_w$ .

• **Condiciones estables**

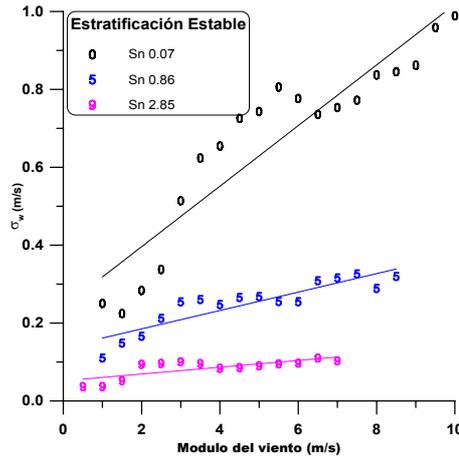


Figura 5.13 Medianas de  $\sigma_w$  en función de la velocidad del viento para tres condiciones de estabilidad estática y sus respectivos ajustes lineales.

En la Figura 5.13 representamos las medianas de  $\sigma_w$  para 3 valores de  $S_n$  en función de la velocidad del viento a 6 metros. Obtenemos relaciones lineales con el viento para cada estabilidad estática. En la Tabla 5.10 se presentan los resultados obtenidos en el ajuste por mínimos cuadrados, donde observamos que los valores de  $A_w$  y  $B_w$  tienden a decrecer cuando aumenta la estabilidad y el coeficiente de correlación es alto para todas las clases, salvo para la extrema. Se asume que  $A_w$  varía linealmente y  $B_w$  decrece exponencialmente con el crecimiento de la estabilidad.

Tabla 5.10 Valores de los coeficientes de la regresión de la estimación de  $\sigma_w$  con estratificación estable

$S_n$	$A_w$ (m/s)	$B_w$	$R^2$
0.07	0.24	0.078	0.86
0.14	0.17	0.062	0.88
0.19	0.15	0.07	0.87
0.32	0.14	0.054	0.85
0.6	0.12	0.043	0.89
0.86	0.14	0.024	0.81
1.16	0.09	0.027	0.75
1.56	0.07	0.024	0.61
2.07	0.07	0.013	0.65
2.85	0.05	0.008	0.58

Por similitud con el caso estable de  $\sigma_v$  aquí se utiliza el mismo método, ecuaciones 5.20 y 5.21, para hallar una expresión genérica que estime  $\sigma_w$  en la estabilidad. Obteniéndose como resultado la siguiente expresión:

$$\sigma_w = 0.16 - 0.02S_n + 0.07Ue^{-0.8S_n} \tag{5.25}$$

Otros trabajos (por ejemplo Pasquill y Smith, 1983; Leahey et al., 1988, 1994) muestran que  $\sigma_w$ , bajo condiciones estables, tiende a variar directamente con el módulo de la velocidad;  $\sigma_w = B_w U$ , donde  $B_w$  es la constante de proporcionalidad. Los valores típicos de  $B_w$  se sitúan entre 0.06 y 0.14m/s, para praderas y áreas al pie de una colina, respectivamente. Al igual que en el caso de la componente lateral del viento, los resultados de los autores mencionados anteriormente y los nuestros son diferentes porque hemos utilizado un promedio temporal muy inferior a los expuestos por ellos.

• **Condiciones inestables**

En la Figura 5.14 representamos las medianas de  $\sigma_w$  para 3 valores de  $S_n$  en función de la velocidad del viento a 6 metros y se muestran sus relaciones lineales con el viento. La Figura 5.14 ilustra la forma en la que  $\sigma_w$  crece con la velocidad del viento. Además se aprecia que  $\sigma_w$  tiende a un valor máximo de entorno a los 0.8 m/s cuando el viento aumenta. En la Tabla 5.11 se presentan los valores pertenecientes a los ajustes lineales estimados. Siguiendo el mismo proceso que hemos empleado con la dispersión lateral y atendiendo a que los valores  $A_w$  aumentan cuando lo hace  $S_n$  mientras que  $B_w$  decrece. La ecuación siguiente se propone para estimar  $\sigma_w$  con estratificación inestable

$$\sigma_w = 0.16 + 0.16S_n + 0.05Ue^{-0.18S_n} \tag{ 5.26 }$$

y el coeficiente de correlación se sitúa entorno al 0.95.

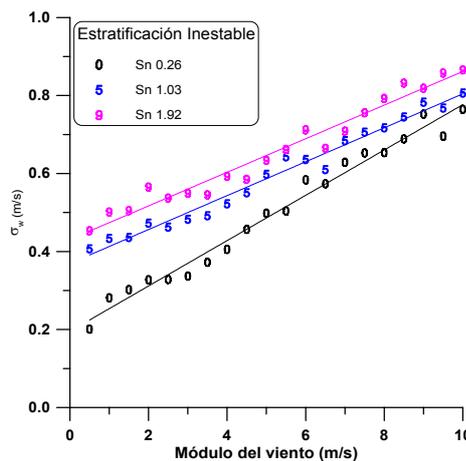


Figura 5.14 Medianas de  $\sigma_w$  en función de la velocidad del viento para tres condiciones de inestabilidad estática y sus respectivos ajustes lineales.

Tabla 5.11 Valores de los coeficientes de la regresión de la estimación de  $\sigma_w$  con estratificación inestable

$S_n$	$A_w$ (m/s)	$B_w$	$R^2$
0.26	0.19	0.058	0.97
0.46	0.24	0.046	0.95
0.61	0.26	0.045	0.94
0.72	0.27	0.044	0.96
0.88	0.30	0.042	0.97
1.03	0.37	0.043	0.98
1.16	0.35	0.040	0.95
1.33	0.39	0.039	0.98
1.6	0.41	0.038	0.97
1.92	0.44	0.041	0.96

### 5.3.2.3 Resumen de resultados

Las ecuaciones que proponemos para estimar los valores de las desviaciones estándares de las componentes transversal y vertical del viento ( $\sigma_v$ ,  $\sigma_w$ ) en función del módulo del viento a 6 metros de altura,  $U$ , y la estabilidad estática normalizada según el tipo de estratificación en el estrato comprendido entre los 6 y los 32 metros,  $S_n$ , en la capa superficial atmosférica se muestran en la Tabla 5.12.

Los resultados presentan una gran similitud entre las exponenciales de  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$  con la estratificación, indicando una variación del mismo orden.

Tabla 5.12 Resumen de resultados de la parametrización de  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$ .

	<b>Estable</b>	<b>Inestable</b>
$\sigma_v$	$0.35 - 0.09S_n + 0.08Ue^{-0.83S_n}$	$0.35 + 0.3S_n + 0.08Ue^{-0.14S_n}$
$\sigma_w$	$0.16 - 0.02S_n + 0.07Ue^{-0.8S_n}$	$0.16 + 0.16S_n + 0.05Ue^{-0.18S_n}$

### 5.3.3 Análisis comparativo

Una vez conseguido nuestro objetivo parametrizando dos de las componentes turbulentas, ahora queremos validar nuestro modelo, comparándolo con el propuesto por Hanna y Chang (1993). Así, en este estudio se comparan las componentes de la energía turbulenta calculadas por dos métodos diferentes. La parametrización de  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$  propuesta en la sección previa se ha comparado con la propuesta por Hanna y Chang (1993); las componentes turbulentas de energía se parametrizan como una función de la velocidad de fricción, la velocidad convectiva (expresión 5.27) y la longitud de Obukhov, como repasaremos a continuación.

#### 5.3.3.1 Estimación de las componentes turbulentas de energía $\sigma_v$ y $\sigma_w$ mediante parámetros turbulentos ( $u_*$ , $w_*$ , $z/L$ )

Los parámetros turbulentos considerados en esta sección son la velocidad de fricción  $u_*$ , el parámetro de estabilidad  $z/L$  y la velocidad convectiva  $w_*$ , que recordemos es un parámetro que indica el grado de convección de la capa límite y se puede expresar como

$$w_* = \left( \frac{g z_i}{\Theta} \overline{w'\theta'} \right)^{1/3} \quad (5.27)$$

donde  $z_i$  es la altura de la capa límite convectiva.

Para condiciones inestables,  $z/L < 0$ , cerca de la superficie, se utilizan las fórmulas de Panofsky et al. (1977) y Hicks (1985)

$$\sigma_v = \sqrt{4u_*^2 + 0.35w_*^2} \quad 0 \leq z/z_i < 1.0 \quad (5.28)$$

$$\sigma_w = \begin{cases} u_* \sqrt{1.44 + 2.9(-z/L)^{2/3}} & z/z_i > 0.1 \\ \sqrt{1.44u_*^2 + 0.35w_*^2} & 0.1 < z/z_i < 1.0 \end{cases} \quad (5.29)$$

Para calcular la velocidad convectiva y la altura de la capa frontera convectiva se estiman las observaciones del globo sonda o aplicando el método de Weill, Carson y Holzworth utilizando el Sodar Doppler (Hinojosa, 2001).

Para condiciones estables,  $z/L > 0$ , cerca del suelo, se usa una modificación de las relaciones lineales sugeridas por Panofsky et al. (1977) :

$$\sigma_v = \max(0.5, 2u_*) \quad (5.30)$$

$$\sigma_w = 1.2u_* \quad (5.31)$$

### 5.3.3.2 Resultados

En esta sección presentamos los resultados obtenidos al comparar los dos modelos turbulentos. Empezamos mostrando los resultados del modelo según los parámetros turbulentos y terminamos mostrando nuestro modelo dependiente de la velocidad del viento y la estratificación térmica.

- **Probando  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$  en base a los parámetros turbulentos ( $u_*$ ,  $w_*$ ,  $z/L$ )**

Las observaciones de la turbulencia lateral,  $\sigma_v$ , y la vertical,  $\sigma_w$ , medidas a 6, 13 y 32 metros se representan frente a las mismas variables estimadas en condiciones estables por las ecuaciones 5.30 y 5.31, respectivamente. Los resultados se muestran en la Figura 5.15 (izquierda) para  $\sigma_v$  y en la Figura 5.15 (derecha) para  $\sigma_w$ .

En la Figura 5.15 se observa que, en general, los valores observados son mayores que los valores estimados en condiciones estables, tanto para  $\sigma_v$  como para  $\sigma_w$ . En global, los valores de la turbulencia son infraestimados.

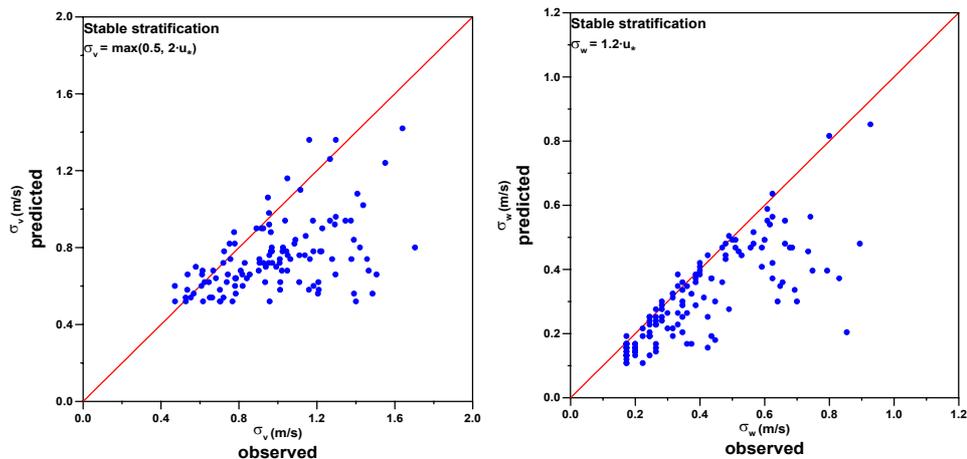


Figura 5.15 Comparación entre los valores calculados en base a los parámetros turbulentos y los observados de  $\sigma_v$  (izquierda) y  $\sigma_w$  (derecha) en situación de estabilidad.

Para condiciones inestables, se utilizan las ecuaciones 5.28 y 5.29. La segunda expresión de la ecuación 5.29 no se utiliza en este trabajo, porque la condición ( $0.1 < z/z_i < 1.0$ ) no se cumple en la capa superficial atmosférica. Es decir, los sensores de este estudio siempre se encuentran a una altura menor de la limitación inferior que marca la condición.

Los resultados de las componentes  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$  en la inestabilidad se ilustran en la Figura 5.16. En ambos estudios se aprecia que no solamente para  $\sigma_v$  sino también para  $\sigma_w$  los valores observados son menores que los predcidos, pues existe una tendencia hacia la sobreestimación en condiciones inestables, especialmente para la componente  $\sigma_v$ .

La incertidumbre en los valores de  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$  varía desde un 6% para la componente  $\sigma_w$  en condiciones inestables hasta un 30% para  $\sigma_v$  en condiciones estables.

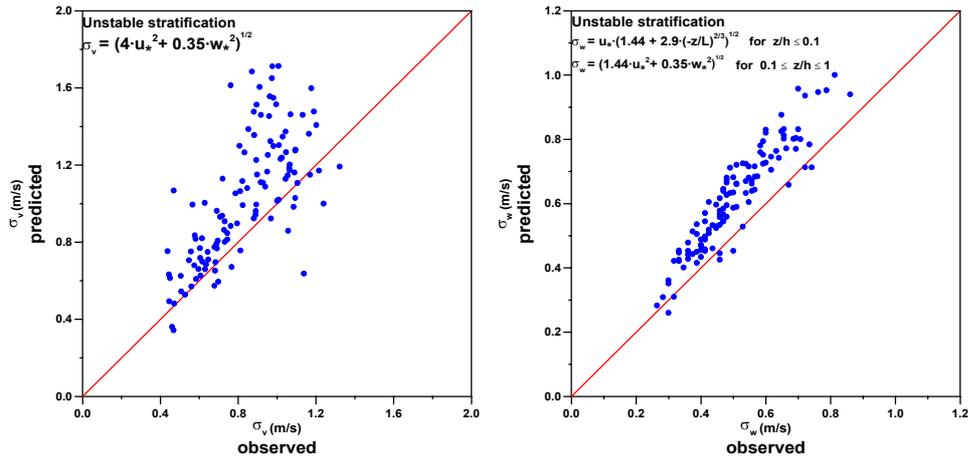


Figura 5.16 Comparación entre los valores calculados en base a los parámetros turbulentos y los observados de  $\sigma_v$  (izquierda) y  $\sigma_w$  (derecha) en situación de inestabilidad, donde  $h=z_i$ .

• **Estimando  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$  mediante la velocidad del viento y la estabilidad estática**

El procedimiento usado en este caso es igual al aplicado en la sección previa. Las observaciones de la turbulencia lateral,  $\sigma_v$ , y la turbulencia vertical,  $\sigma_w$ , medidas a 6, 13 y 32 metros se representan frente a las mismas variables estimadas en condiciones estables e inestables según el modelo hallado en la sección anterior, sin tener en cuenta las medidas utilizadas directamente en la parametrización, es decir, prescindiendo de aquellos valores que se utilizaron en la estimación del modelo aquí empleado.

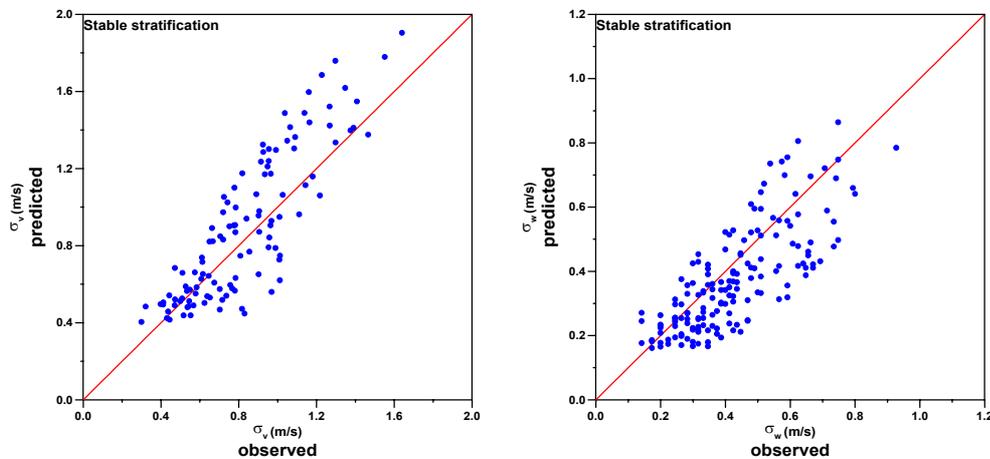


Figura 5.17 Comparación entre los valores observados y los calculados en base a  $U$  y  $S_n$  de  $\sigma_v$  (izquierda) y  $\sigma_w$  (derecha) en condiciones de estabilidad.

Para condiciones estables se utilizan las ecuaciones 5.23 y 5.25 para las componentes  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$ , respectivamente. Los resultados se ponen de manifiesto en la Figura 5.17 (izquierda) para  $\sigma_v$  y en la Figura 5.17 (derecha) para  $\sigma_w$ . En ambos casos la dispersión de puntos es inferior a la encontrada en el apartado anterior. El coeficiente de correlación es superior a 0.8 para las dos componentes.

Para condiciones inestables se utilizan las ecuaciones 5.24 y 5.26 para las componentes  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$ , respectivamente, y los resultados se muestran en la Figura 5.18. Igual que en la estabilidad, la dispersión de puntos es la característica principal, pero ahora la dispersión es menor con un acuerdo mejor, con coeficientes de correlación superiores a 0.85.

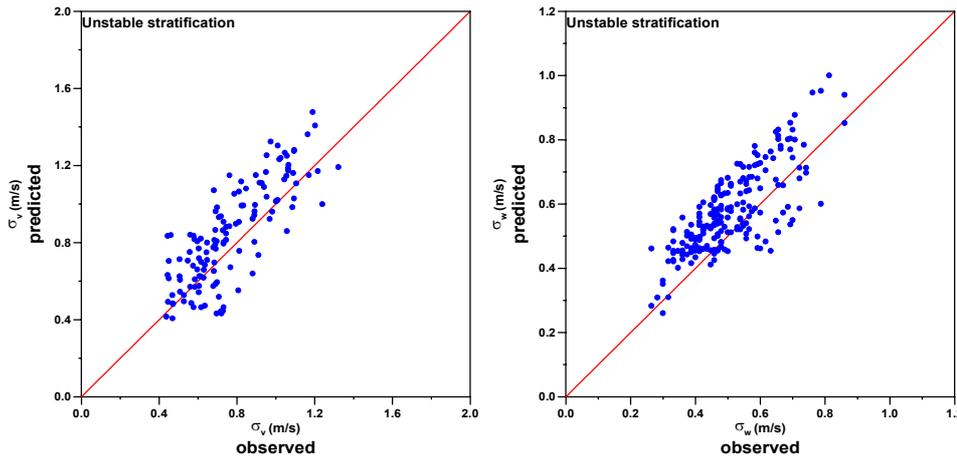


Figura 5.18 Comparación entre los valores calculados en base a  $U$  y a  $S_n$  y los observados de  $\sigma_v$  (izquierda) y  $\sigma_w$  (derecha) en situación de inestabilidad.

Si se comparan estos últimos resultados con aquellos encontrados usando los parámetros de la turbulencia, la correlación entre los valores observados y los estimados de  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$  es bastante buena y la incertidumbre en su pronóstico es menor.

### 5.3.4 Conclusiones a la parametrización de los estadísticos turbulentos

El análisis de los datos de  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$  recogidos sobre suelo llano en SABLES-98 han mostrado un patrón predecible en función de la estabilidad estática y la velocidad del viento. La Tabla 5.12 recoge los resultados obtenidos en la estimación, siendo los coeficientes de correlación, uno a uno, entre los datos estimados y los observados superiores a 0.80.

Del análisis comparativo de las componentes  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$ , medidas y calculadas usando diferentes parametrizaciones, se puede concluir que la parametrización presentada estima favorablemente  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$ , mientras que la parametrización de Hanna y Chang (1993) subestima en la estabilidad y sobreestima en la inestabilidad ligeramente. Entendemos que la razón de esta discrepancia se debe a la universalidad de la parametrización según los parámetros turbulentos frente al carácter local de nuestro estudio.

La información de este estudio permite la estimación de los parámetros ( $\sigma_v/U$  y  $\sigma_w/U$ ) para ser utilizados en un modelo de dispersión de un penacho en un amplio rango de condiciones de viento y estabilidad. Los procesos de estimación dependen de variables atmosféricas medidas fácilmente ( $U$ ,  $S$ ), mientras que otros modelos requieren el conocimiento de parámetros turbulentos de la capa fronteriza difíciles de determinar, tales como el flujo de calor sensible, la velocidad de fricción, la altura de la capa de mezcla, las componentes de la energía turbulenta o la altura de la capa de mezcla.

Cabe destacar que los valores de la estabilidad estática usados en este estudio han sido normalizados por los valores medios de la estabilidad estática observados en el área bajo condiciones atmosféricas estables e inestables. Es, sin embargo, un simple objeto de ajuste de las ecuaciones y gráficos presentados en este trabajo para cualquier otro factor de normalización deseado. Por esta razón la selección del factor de normalización no restringe la aplicación general de los presentes resultados.

El éxito de la parametrización ideada en este capítulo nos conduce a pensar en estimar otros parámetros turbulentos de manera similar.