

UNIVERSITAT DE BARCELONA

Departament d'Astronomia i Meteorologia

# Análisis y Caracterización de la Capa Superficial Atmosférica

Memoria presentada por  
**Pablo Buenestado Caballero**  
para optar al grado de  
Doctor en Ciencias Físicas  
Barcelona, septiembre de 2003



Programa de Doctorado d'Astronomia i Meteorologia

Bienio 1995-1997

Memoria presentada por **Pablo Buenestado Caballero** para  
optar al grado de Doctor en Ciencias Físicas

Directora

Dra. Maria Rosa Soler Duffour



# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1 FUNDAMENTOS DEL ESTUDIO DE LA CAPA SUPERFICIAL ATMOSFÉRICA .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Alcance de la micrometeorología .....</b>	<b>5</b>
1.1.1 Capa fronteriza atmosférica .....	5
1.1.2 Capa superficial atmosférica.....	7
<b>1.2 Fundamentos de la turbulencia .....</b>	<b>7</b>
1.2.1 Fluidos viscosos .....	8
1.2.2 Características generales de la turbulencia.....	9
<b>1.3 Ecuaciones del movimiento.....</b>	<b>10</b>
<b>1.4 Teorías semiempíricas de la turbulencia.....</b>	<b>16</b>
1.4.1 Teoría del transporte del gradiente.....	17
1.4.2 Análisis dimensional y teoría de semejanza.....	19
<b>2 TÉCNICAS DE EXPLORACIÓN DE LA CAPA SUPERFICIAL ATMOSFÉRICA.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Introducción.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2 Medidas .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3 Sensores.....</b>	<b>26</b>
2.3.1 Sensores de medida directa .....	26
2.3.1.1 Sensores para medidas de perfiles.....	27
2.3.1.2 Sensores para medidas de turbulencia.....	28
2.3.2 Sensores remotos para la capa fronteriza .....	29
<b>2.4 Plataformas .....</b>	<b>29</b>
2.4.1 Medidas en torre meteorológica.....	29
2.4.2 Medidas con globo y aviones.....	30
2.4.3 Sistema de almacenamiento de datos.....	31
<b>3 PROCESADO DE DATOS EN LA CAPA SUPERFICIAL ATMOSFÉRICA.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 Introducción.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2 Análisis temporal.....</b>	<b>33</b>
3.2.1 Estadísticos de los promedios temporales.....	33
3.2.2 Control de calidad .....	34
3.2.2.1 Eliminación de datos espurios o picos .....	34
3.2.2.2 Eliminación de ruido .....	35
3.2.3 Medición en torres y mástiles .....	35
3.2.3.1 Corrección del ángulo .....	35
3.2.3.2 Estimación de los perfiles .....	37
<b>3.3 Análisis espectral.....</b>	<b>37</b>
3.3.1 Análisis de Fourier.....	37

## II

3.3.1.1	Definición de la transformada de Fourier .....	37
3.3.1.2	Métodos de análisis basados en la transformada de Fourier .....	38
3.3.2	Análisis Wavelet .....	39
3.3.2.1	Fundamentos wavelet .....	39
3.3.2.2	Transformada wavelet continua .....	40
3.3.2.3	Transformada wavelet discreta .....	42
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS MICROCLIMATOLÓGICO DE LA CAPA SUPERFICIAL ATMOSFÉRICA .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>47</b>
<b>4.2</b>	<b>Campaña experimental: Vilaseca 95-98 .....</b>	<b>48</b>
<b>4.3</b>	<b>Procesado de los datos .....</b>	<b>50</b>
<b>4.4</b>	<b>Análisis de la temperatura en la capa superficial .....</b>	<b>52</b>
4.4.1	Variación diurna de la temperatura .....	52
4.4.2	Perfiles verticales de temperatura .....	53
4.4.3	Distribución de frecuencias de la temperatura .....	58
4.4.4	Análisis espectral de la temperatura .....	60
<b>4.5</b>	<b>Análisis del viento en la capa superficial atmosférica .....</b>	<b>61</b>
4.5.1	Variaciones diurnas del viento .....	61
4.5.2	Perfiles de viento .....	63
4.5.3	Distribución de frecuencias del viento .....	65
4.5.4	Análisis espectral del viento .....	69
<b>4.6</b>	<b>Presión atmosférica .....</b>	<b>69</b>
4.6.1	Distribución de frecuencias de la presión atmosférica .....	69
4.6.2	Evolución diurna de la presión atmosférica .....	70
4.6.3	Análisis espectral de la presión atmosférica .....	71
<b>4.7</b>	<b>Radiación neta .....</b>	<b>72</b>
4.7.1	Distribución de frecuencias de la radiación neta .....	72
4.7.2	Evolución diurna de la radiación neta .....	73
4.7.3	Análisis espectral de la radiación neta .....	73
<b>4.8</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>73</b>
<b>5</b>	<b>PROBLEMA DE LA INDETERMINACIÓN EN LA CAPA SUPERFICIAL ATMOSFÉRICA .....</b>	<b>75</b>
<b>5.1</b>	<b>Campaña experimental: SABLES-98 .....</b>	<b>75</b>
<b>5.2</b>	<b>Relaciones de semejanza: Perfiles medios .....</b>	<b>79</b>
5.2.1	Procesado de los datos .....	80
5.2.2	Variables medias y sus gradientes .....	81
5.2.2.1	Determinación de la constante de von Karman y del valor de $\Phi_h$ en la neutralidad .....	81
5.2.2.2	Análisis de $\Phi_m$ y $\Phi_h$ .....	83
5.2.3	Validación del modelo .....	86
5.2.4	Conclusiones de la teoría de semejanza .....	89
<b>5.3</b>	<b>Parametrización de los estadísticos turbulentos .....</b>	<b>89</b>
5.3.1	Metodología y procesado de los datos .....	91
5.3.2	Resultados del análisis de datos .....	93
5.3.2.1	Variaciones de $\sigma_v$ con la velocidad del viento y la estabilidad estática .....	94
5.3.2.2	Variaciones de $\sigma_w$ con la velocidad del viento y la estabilidad estática .....	96
5.3.2.3	Resumen de resultados .....	99
5.3.3	Análisis comparativo .....	99

5.3.3.1	Estimación de $\sigma_v$ y $\sigma_w$ mediante parámetros turbulentos ( $u^*$ , $w^*$ , $z/L$ ).....	99
5.3.3.2	Resultados .....	100
5.3.4	Conclusiones a la parametrización de los estadísticos turbulentos .....	102
<b>6</b>	<b>ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LA CAPA SUPERFICIAL NOCTURNA .....</b>	<b>103</b>
<b>6.1</b>	<b>Características principales de la capa fronteriza nocturna .....</b>	<b>103</b>
<b>6.2</b>	<b>Regímenes de la Capa Superficial Nocturna.....</b>	<b>106</b>
6.2.1	Detalles experimentales y análisis de datos .....	106
6.2.2	Análisis del flujo de calor en función de $z/L$ .....	107
6.2.3	Análisis de las variables turbulentas en la estabilidad .....	109
<b>6.3</b>	<b>Intermitencia en la NBL .....</b>	<b>113</b>
<b>6.4</b>	<b>Campaña experimental: CASES-99 .....</b>	<b>115</b>
<b>6.5</b>	<b>Análisis del flujo de drenaje .....</b>	<b>118</b>
6.5.1	Instrumentación en el barranco .....	119
6.5.2	Observaciones de los flujos de drenaje .....	120
6.5.2.1	Análisis medio.....	121
6.5.2.2	Análisis de la turbulencia .....	125
6.5.3	Balance termodinámico.....	128
6.5.4	Relaciones de la turbulencia .....	130
<b>6.6</b>	<b>Detección de ondas en la NBL .....</b>	<b>132</b>
6.6.1	Sucesos ondulatorios de Kelvin-Helmholtz en la NBL.....	132
6.6.2	Ondas de Kelvin-Helmholtz en CASES-99 .....	133
6.6.2.1	Datos experimentales .....	135
6.6.2.2	Análisis de Fourier .....	135
6.6.2.3	Análisis Wavelet .....	137
<b>6.7</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>138</b>
6.7.1	Conclusiones de los regímenes de la NBL e intermitencia .....	138
6.7.2	Conclusiones del flujo de drenaje .....	139
6.7.3	Conclusiones de ondas KH .....	139
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>141</b>
<b>7.1</b>	<b>Conclusiones generales.....</b>	<b>141</b>
<b>7.2</b>	<b>Horizonte futuro.....</b>	<b>143</b>
<b>ANEXO.....</b>		<b>145</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>149</b>

