

SIMULACIÓN DE LAS GRANDES ESCALAS DE FLUJO TURBULENTO SOBRE UNA COLINA DE SUAVE PENDIENTE

César A. Aguirre^{a,b}, José María Martínez Fayó^a, Armando B. Brizuela^{b,c} y Marcelo Fabián Moyano

^aFacultad Regional Paraná-Universidad Tecnológica Nacional, Almafuerite 1033,
3100 Paraná, Entre Ríos, Argentina, cesar.aguirre.a@gmail.com,
<http://www.frp.utn.edu.ar>

^bCentro de Investigaciones Científicas, CICyTTP-CONICET,
Materi y España, s/n, Diamante, Entre Ríos, Argentina,
<http://www.cicytpp.org.ar>

^cCátedra de Climatología Agrícola, FCA-UNER, Ruta 11 Km 10 Oro Verde,
CC N° 24, 3100 Paraná, Entre Ríos, Argentina, armando.brizuela@gmail.com,
<http://www.cicytpp.org.ar/climatologiafca>

Palabras Clave: Simulación de Grandes Escalas, turbulencia, colina.

Resumen. El estudio de los fenómenos de la turbulencia del viento es de importancia primordial para el dimensionado de líneas de transporte y distribución eléctrica, de la dispersión de especies químicas en la capa límite atmosférica, en el transporte de partículas sólidas, etc. En el caso del dimensionado de líneas eléctricas de media y alta tensión, las normas de la Asociación Electrotécnica Argentina (AEA) prevén la posibilidad de utilizar parámetros de carga producida por eventos meteorológicos en los que interviene el conocimiento de las características de viento utilizando el método probabilístico. Este método requiere contar con mediciones de viento durante grandes períodos de tiempo. Existen numerosos trabajos referidos al estudio de vientos extremos en la República Argentina basados en las estadísticas meteorológicas provenientes de las estaciones de medición de organismos oficiales. Sin embargo, estas estaciones de medición están muy dispersas geográficamente y existe cierta incertidumbre en la utilización de estos métodos, sobre todo en los casos de relieve complejo, ya que las estadísticas de viento son confeccionadas utilizando el valor de velocidad media en zonas de terreno llano. Este trabajo muestra la utilización de las técnicas de *Simulación de las Grandes Escalas* como un aporte al estudio del problema, desde un punto de vista más dinámico, utilizando métodos numéricos de simulación de la turbulencia con ayuda de la mecánica de fluidos computacional. Se describen brevemente las ecuaciones y aproximaciones utilizadas para la resolución de las ecuaciones de *Navier-Stokes* y los resultados de la simulación de la dinámica del flujo turbulento sobre una colina de débil pendiente, objeto de estudio en las experiencias de medición en túnel de viento realizadas por [Gong and Ibbetson, 1989](#). Si bien este caso de estudio no presenta las características propias de los fenómenos meteorológicos de tormentas severas, presenta un caso de validación del código interesante ya que se cuenta con los perfiles de viento medio y sus fluctuaciones en diferentes posiciones respecto del obstáculo orográfico lo que permitirá detectar el grado de aproximación de los resultados del código e identificar los aspectos que deben mejorarse con miras a su utilización en la simulación de fenómenos de vientos extremos en el futuro.

1 INTRODUCCIÓN

Los estudios relacionados con los fenómenos de flujo turbulento en la capa límite atmosférica adquieren una importancia fundamental a la hora de proyectar un emplazamiento industrial, definir normas de control de calidad del aire, realizar estudios de impacto ambiental, determinar el grado de erosión eólica o los riesgos a que son expuestas las zonas urbanas lindantes con área desérticas y el diseño líneas de transmisión de energía eléctrica que suelen ser sometidas a vibraciones extremas debido al desarrollo de tormentas severas en combinación con el relieve, entre otras aplicaciones. En el caso del dimensionado de líneas eléctricas de media y alta tensión, las normas de la Asociación Electrotécnica Argentina (AEA, 2006) prevén la posibilidad de utilizar parámetros de carga producida por eventos meteorológicos en los que interviene el conocimiento de las características de viento utilizando el método probabilístico. Este método requiere contar con mediciones de viento durante grandes períodos de tiempo. La fiabilidad real en el diseño es muy sensible a la precisión con la cual se han suministrado los datos requeridos para su cálculo y los parámetros utilizados, a pesar de que las fórmulas de base que permiten obtener las cargas debidas al viento son bien conocidas (ASCE, 1991). Existen numerosos trabajos referidos al estudio de las características del viento en la República Argentina basados en las estadísticas meteorológicas provenientes de las estaciones de medición de organismos oficiales (Brizuela, 1982; Barros y Estevan, 1983; Barros, 1986; Brizuela y Aiello, 1988; Brizuela y Aguirre, 1989a; b; Brizuela y Aguirre, 1990; Aguirre y Brizuela, 1992; Aguirre y Brizuela, 1996) y en el exterior (Justus, 1978; Mikhail, 1981; OLADE, 1980; WMO 1981). Sin embargo, estas estaciones de medición están muy dispersas geográficamente y existe cierta incertidumbre en la utilización de estos métodos, sobre todo en los casos de relieve complejo, ya que las estadísticas de viento son confeccionadas utilizando el valor de velocidad media en zonas de terreno llano. Otras investigaciones estuvieron dedicadas a la comprensión de los fenómenos meteorológicos severos como las tormentas, líneas de inestabilidad o tornados. Algunos de ellos fueron realizados en el país (Lichtenstein y Schwarzkopf, 1970; Schwarzkopf y Rosso, 1989; Schwarzkopf y Rosso, 1993) y también en el exterior (Dyer, 1986; Fujita, 1971; Fujita y Pearson, 1973; Fujita, 1985). La relación entre estos fenómenos y los efectos inducidos en las líneas de transmisión de energía eléctrica ha sido la preocupación de numerosos investigadores con el fin de aportar elementos que permitan una menor incertidumbre en su diseño y construcción (Ross et al., 2000; Letchford y Hawes, 2000; Letscher et al., 2002; Lilien et al., 2004; Bjerkan et al., 2004) y de grupos de trabajo de carácter nacional (INTI, 1984) e internacional (Groupe d'Action 22.11.04, 2001). Estos trabajos ponen de relieve la importancia de estudios detallados en escala espacial y temporal de estos fenómenos con el fin de obtener parámetros más precisos al momento de diseñar las líneas de transmisión de energía eléctrica. Los investigadores concuerdan en la importancia de contar con una descripción de los fenómenos de la turbulencia del viento tridimensional para estudiar en forma detallada estos eventos. En tal sentido, han sido desarrolladas en las últimas décadas las técnicas de Simulación de Grandes Escalas de la turbulencia (SGE) que permiten resolver las ecuaciones de la mecánica de fluidos para las grandes escalas de movimiento. Estas técnicas permitieron obtener resultados de la dinámica de las grandes escalas del flujo bajo condiciones de geometría compleja (Dudhia, 1993; Schiestel, 1993; Akselvoll and Moin, 1995; Wang and Moin, 2002), en flujos denominados “*de canal*” desarrollados en túneles de viento, donde se estudian las condiciones que imponen las paredes sólidas (Kreplin and Eckleman, 1979; Moin and Kim, 1982; Bardina et al., 1983; Piomelli et al., 1989; Bagwell et al., 1993; Balaras et al., 1996; Baggett, 1997; Cabot, 1997; Baggett et al., 1997; Cabot and Moin, 2000) y en los que pueden encontrarse en la capa límite atmosférica (Mason, 1989; Schmidt and Schumann, 1989; Esmaili and Piomelli, 1993; Xue et al., 2000). Sin embargo, es conveniente antes de la utilización de un código de simulación, realizar validaciones del mismo considerando diferentes condiciones del flujo de

aire y efectos que producen el relieve o la interacción con los elementos presentes en la superficie. La tarea de validación puede realizarse con ayuda de experiencias de medición realizadas en túneles de viento considerando distintos tipos de relieve y diversas características de la superficie del suelo (Fackrell and Robins, 1982; Arya et al. 1987; Gong and Ibbetson, 1989 y Zegadi et al. 1994). El presente trabajo muestra la utilización de las técnicas de SGE para obtener una descripción detallada de las características del flujo de viento simulando la experiencia de Gong and Ibbetson (1989). Si bien este caso de estudio no presenta las características propias de los fenómenos meteorológicos de tormentas severas, presenta un caso de validación del código interesante ya que se cuenta con los perfiles de viento medio y sus fluctuaciones en diferentes posiciones respecto del obstáculo orográfico. Esto último permitirá detectar el grado de aproximación de los resultados del código e identificar los aspectos que deben mejorarse con miras a su utilización en la simulación de fenómenos de vientos extremos en el futuro.

2 LA SIMULACIÓN DE LAS GRANDES ESCALAS (SGE)

El código de Simulación de las Grandes Escalas de la turbulencia, orientado a las aplicaciones en la capa límite atmosférica, es el modelo de meso-escala de tipo no-hidroestático quasi-compresible denominado ARPS versión 4.5.2 (Advanced Regional Prediction System) desarrollado por el CAPS (Center of Analysis and Prediction Storm) de la Universidad de Oklahoma (USA). Este modelo ha sido diseñado específicamente para el seguimiento y descripción de tormentas, posee sub-modelos de flujo de calor y vapor de agua, formación de nubes y precipitación. Para ello, tiene en cuenta la orografía y cobertura del terreno como así también las condiciones iniciales tanto del suelo como del estado de la atmósfera. Aguirre (2005) y Aguirre (2006) realizaron algunas modificaciones al mismo introduciendo la opción de cálculo para el coeficiente de Smagorinsky (Smagorinsky, 1963) siguiendo la técnica de Germano et al. (1991) que mejora notablemente los resultados de la simulación en la zona de la capa límite adyacente al suelo. Seguidamente se mostrarán las ecuaciones principales y las aproximaciones consideradas en el código SGE. Los detalles concernientes al esquema numérico utilizado pueden encontrarse en Xue et al. (1995), Xue et al. (2000).

2.1 Las ecuaciones del modelo

Las magnitudes calculadas para describir la dinámica del flujo turbulento son las tres componentes del campo de velocidades considerando una terna de ejes ortogonales cartesianos $Oxyz$. De esta forma, el estado inicial de estas magnitudes es descompuesta en un valor base (\bar{u}_i) que resulta del cálculo de su valor medio considerando planos horizontales paralelos al terreno, y una fluctuación alrededor de este valor medio (u'_i). Posteriormente, se aplica un filtro *pasa bajo* (u_i^\oplus) para obtener las grandes escalas del campo de velocidades. De la misma forma, se consideran las magnitudes escalares como la temperatura potencial (θ), la relación de mezcla del vapor de agua (q_v) y del agua en sus estados líquido y sólido (q_{li}), la presión total (P) y la densidad del aire (ρ).

Las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimientos son obtenidas considerando las hipótesis de invariancia temporal del estado base para todas las magnitudes y la relación hidrostática sólo para el estado base de la presión (modelo quasi-compresible). De esta forma las ecuaciones del modelo filtradas son las siguientes:

$$\frac{\partial \tilde{u}_j^\oplus}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i^\oplus}{\partial t} + \frac{\partial(\tilde{u}_i^\oplus u_j^\oplus)}{\partial x_j} = \bar{\rho} g_i B^\oplus - \left(\frac{\partial p'}{\partial x_i} \right)^\oplus + 2 \epsilon_{ijk} \Omega_j \tilde{u}_k^\oplus - \frac{\partial \tilde{R}_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i^\oplus}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j^\oplus}{\partial x_i} \right) \right) \quad (2)$$

donde B es la magnitud que considera los efectos de *boyancia* debido a fluctuaciones de la densidad del aire, R_{ij} es el tensor de *Reynolds de sub-malla*, Ω es el valor de la velocidad angular de la tierra y ν es la viscosidad cinemática del aire a presión normal. El tilde utilizado en las magnitudes indica que éstas han sido ponderadas por el valor base de la densidad del aire que es considerada invariante temporal y dependiente sólo de la altura sobre el terreno ($\bar{u}_i = \bar{\rho} u_i$) mientras que el símbolo $(.)^\oplus$ indica que se ha aplicado un filtro *pasa bajo*.

La ecuación de la fluctuación (3) de la presión es resuelta a partir de la ecuación de conservación de la masa (1) y de la ecuación de estado de los gases perfectos considerando la humedad del aire (Klemp and Wilhelmson, 1978):

$$\left(\frac{\partial p'}{\partial t} \right)^\oplus = - \left(u_i \frac{\partial p'}{\partial x_i} \right)^\oplus - g_i \tilde{u}_i^\oplus - V_s^2 \frac{\partial \tilde{u}_i^\oplus}{\partial x_i} + V_s^2 \bar{\rho} \left(\frac{1}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \right)^\oplus \quad (3)$$

V_s es la velocidad del sonido, A es la relación entre la constante de los gases perfectos para el aire seco y el aire húmedo y el término de correlación velocidad-gradiente de la fluctuación de la presión es resuelto utilizando un modelo a gradiente (Deardorff, 1980).

De la misma forma, pueden expresarse las ecuaciones de conservación de las magnitudes escalares (θ , q_v , q_w):

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\theta^\oplus)}{\partial t} + \frac{\partial(\tilde{u}_j^\oplus \bar{\theta})}{\partial x_j} \delta_{j3} + \frac{\partial(\tilde{u}_j^\oplus \theta^\oplus)}{\partial x_j} = S_\theta - \frac{\partial h_{\theta j}}{\partial x_j} \quad (4)$$

donde S denota las fuentes y sumideros de energía y h_j expresa los flujos turbulentos (Xue et al. 2000).

El tensor de *Reynolds de sub-malla* expresa el aporte de la cantidad de movimiento desde las pequeñas escalas hacia las grandes. Este aporte está expresado en el término filtrado de la correlación de velocidades de la componente residual ($u_i^- = u_i - u_i^\oplus$) una vez aplicado el filtro:

$$\tilde{R}_{ij} = (\tilde{u}_i^- u_j^-)^\oplus \quad (5)$$

Este término es modelado como una viscosidad bajo la forma de la aproximación de *Boussinesq*:

$$\tilde{R}_{ij} = -2\bar{\rho} k_m S_{ij}^{a\oplus} + \frac{1}{3} \tilde{R}_{kk} \delta_{ij} \quad (6)$$

En la ecuación (6) k_m se denomina *coeficiente de difusión turbulenta* y $S_{ij}^{a\oplus}$ es la parte asimétrica del *tensor de deformación filtrado* S_{ij}^\oplus :

$$S_{ij}^\oplus = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i^\oplus}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^\oplus}{\partial x_i} \right)$$

$$S_{ij}^{a\oplus} = S_{ij}^{\oplus} - \frac{1}{3} S_{kk}^{\oplus} \delta_{ij}$$

El modelo *Smagorinsky* propone el cálculo del *coeficiente de difusión turbulenta* como el producto de un parámetro que depende del tamaño característico de la celda de cálculo ($\Delta = \Delta_x \Delta_y \Delta_z$)^{1/3} y un tensor equivalente de deformación $|S^{\oplus}| = (2S_{ij}^{\oplus} S_{ij}^{\oplus})$:

$$k_m = (C_s \Delta)^2 |S^{\oplus}|$$

En esta última ecuación, C_s es llamado *coeficiente de Smagorinsky*. Este coeficiente es calculado de manera dinámica, es decir en cada paso de tiempo y para cada nodo de la malla de cálculo, utilizando un *filtro test* según propone [Germano et al. \(1991\)](#).

Resta resolver la traza del tensor *Reynolds* de submalla \tilde{R}_{kk} presente en (6) que puede escribirse como:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{kk} &= 2\bar{\rho}E^- \\ E^- &= \frac{1}{2} (u_k^- u_k^-)^{\oplus} \end{aligned}$$

En estas expresiones, E^- es la energía cinética turbulenta de submalla y representa la energía que portan los torbellinos de pequeña talla (menor que el tamaño de una celda de cálculo en SGE). Esta energía adquiere importancia en la zona cercana a superficies sólidas donde existe mayor proporción de torbellinos de pequeño tamaño. Para comparar las mediciones experimentales con los resultados de la SGE, es interesante modelar esta energía para adicionarla a la que portan los grandes torbellinos y de esta forma obtener la energía cinética turbulenta total. [Deardorff \(1980\)](#) propone resolver la ecuación de la energía cinética de submalla utilizando modelos a gradiente para los términos de producción, difusión, gravedad y disipación presentes en esta ecuación:

$$\frac{d(\bar{\rho}E^-)}{dt} = \underbrace{-(u_i^- u_k^-)^{\oplus} \frac{\partial \bar{u}_i^{\oplus}}{\partial x_k}}_{\text{Producción}} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\bar{u}_i^- \left(E^- + R_{ik} + \frac{p'^-}{\bar{\rho}} \right) \right]^{\oplus}}_{\text{Difusión}} - \underbrace{g \left[\delta_{i3} \frac{\bar{u}_i^-}{\bar{\rho}} B^- \right]^{\oplus}}_{\text{Gravedad}} - \underbrace{\frac{1}{2} \varepsilon_{ii}}_{\text{Disipación}} \quad (7)$$

3 DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA DE GONG AND IBBETSON (1989)

Se presenta en este trabajo un caso de validación del código SGE considerando las mediciones de la experiencia de [Gong and Ibbetson \(1989\)](#). Los autores de esta experiencia realizaron mediciones del campo de velocidades correspondientes a un flujo turbulento en capa límite generado en túnel de viento incluyendo como relieve de suelo una colina de débil pendiente. El túnel de viento a circuito abierto utilizado en esta experiencia pertenece al *Departamento de Agricultura de la Universidad de Reading (Gran-Bretaña)*. Posee una sección de 1 metro de ancho, 0,4 metros de alto y 3 metros de longitud utilizables en el cual se desarrolla la capa límite neutra de 0,3 metros de altura siguiendo el método de generación descrito por [Counihan \(1969\)](#). [Gong and Ibbetson \(1989\)](#) instalaron sobre el piso del túnel una hoja de caucho cuya rugosidad es obtenida con la incorporación de cilindros de $h_e = 3 \text{ mm}$ de altura y de $d_e = 2 \text{ mm}$ de diámetro. Los ejes longitudinales de estos cilindros han sido espaciados de manera uniforme con una separación de $s_e = 3,6 \text{ mm}$. De esta forma se logra una altura característica de rugosidad de $z_0 = 0,17 \text{ mm}$ que se obtiene considerando la forma,

altura y espaciamento de los elementos (Raupach et al. 1980).

Gong and Ibbetson (1989) realizaron mediciones del campo de velocidad utilizando un anemómetro de *hilo caliente* en diferentes posiciones siguiendo el eje central del túnel de viento para dos tipos de configuración de relieve:

- A. Caso de suelo plano rugoso (sin la presencia de la colina).
- B. Caso de presencia de la colina en suelo rugoso.

La validación del código SGE para ambos casos consiste en realizar una comparación de los perfiles de la velocidad media temporal en régimen permanente y de la energía cinética turbulenta originada por las fluctuaciones del mismo a distintas posiciones corriente abajo con y sin la presencia de la colina.

3.1 Datos de la experiencia

Los datos característicos de la capa límite generada en laboratorio son las siguientes:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \delta = 0,3 \text{ m} & \text{espesor de la capa límite.} \\ U_e = 8 \text{ m/s} & \text{velocidad media del aire exterior a la capa límite.} \\ u_* = 0,055 U_e & \text{velocidad de frotamiento.} \\ z_0 = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ m} & \text{rugosidad del suelo.} \end{array} \right.$$

A. Caso de suelo plano rugoso

Mediciones de la velocidad y sus fluctuaciones fueron realizadas a cuatro posiciones diferentes a lo largo del eje longitudinal de simetría del túnel de viento, medidas a partir de la formación de la capa límite, (1,21 m; 1,51 m; 1,71 m y 1,91 m). Estas mediciones permitieron obtener expresiones analíticas (8) para la velocidad media longitudinal, (9) para las fluctuaciones de la componente longitudinal, (10) para las fluctuaciones de la componente transversal y (11) para las fluctuaciones de la componente vertical. La Figura 1 muestra los perfiles de la velocidad media obtenida a partir de las mediciones experimentales en símbolos y representados analíticamente según (8) como línea llena. La Figura 2 muestra los perfiles medios de las fluctuaciones de velocidad en sus tres direcciones medidos experimentalmente en símbolos y representados analíticamente según (9), (10) y (11) en líneas llenas.

$$\bar{u} = \begin{cases} \frac{u_*}{k_v} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & \text{si } \frac{z}{z_0} > 10 \\ \frac{z}{10z_0} \frac{u_*}{k_v} \ln(10) & \text{si } \frac{z}{z_0} \leq 10 \\ U_e & \text{si } \bar{u} \geq U_e \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{\overline{u'^2}}{u_*^2} = \begin{cases} +0,009 & \text{si } \frac{z}{\delta} > 0,87 \\ -1,7103 \ln\left(\frac{z}{\delta}\right) - 0,2288 & \text{si } 0,5 < \frac{z}{\delta} \leq 0,87 \\ -1,3229 \ln\left(\frac{z}{\delta}\right) + 0,0969 & \text{si } 0,02 < \frac{z}{\delta} \leq 0,5 \\ +274,21 \left(\frac{z}{\delta}\right) & \text{si } \frac{z}{\delta} \leq 0,02 \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{\overline{v'^2}}{u_*^2} = \begin{cases} +0,02 & \text{si } \frac{z}{\delta} > 0,87 \\ -0,9416 \ln\left(\frac{z}{\delta}\right) - 0,1038 & \text{si } 0,5 < \frac{z}{\delta} \leq 0,87 \\ -0,57 \ln\left(\frac{z}{\delta}\right) + 0,2002 & \text{si } 0,02 < \frac{z}{\delta} \leq 0,5 \\ +120,43 \left(\frac{z}{\delta}\right) & \text{si } \frac{z}{\delta} \leq 0,02 \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{\overline{w'^2}}{u_*^2} = \begin{cases} +0,01 & \text{si } \frac{z}{\delta} > 0,85 \\ -1,3495 \left(\frac{z}{\delta}\right)^2 + 0,0463 \left(\frac{z}{\delta}\right) + 0,9465 & \text{si } 0,01 < \frac{z}{\delta} \leq 0,85 \\ +94,031 \left(\frac{z}{\delta}\right) & \text{si } \frac{z}{\delta} \leq 0,01 \end{cases} \quad (11)$$

Las expresiones (9), (10) y (11) han sido obtenidas a partir de un análisis de regresión mientras que la (8) responde a la ley de variación logarítmica para el perfil del viento con la altura (Garratt, 1992), en la cual $k_v = 0,4$ es la constante de Von-Kármán.

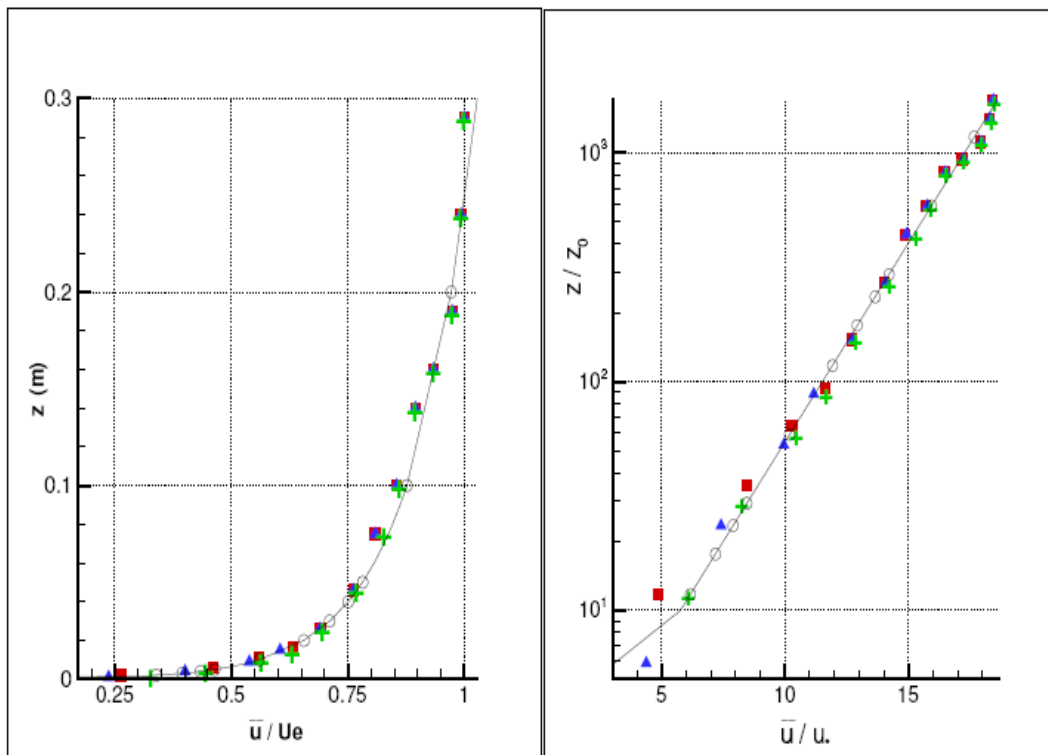


Figura 1. Perfiles de la velocidad media longitudinal.

Símbolos: Mediciones de Gong and Ibbetson (1989): \blacktriangle 1,21 m; \blacksquare 1,51 m; \circ 1,71 m; $+$ 1,91 m
Analítico Garratt (1992): —

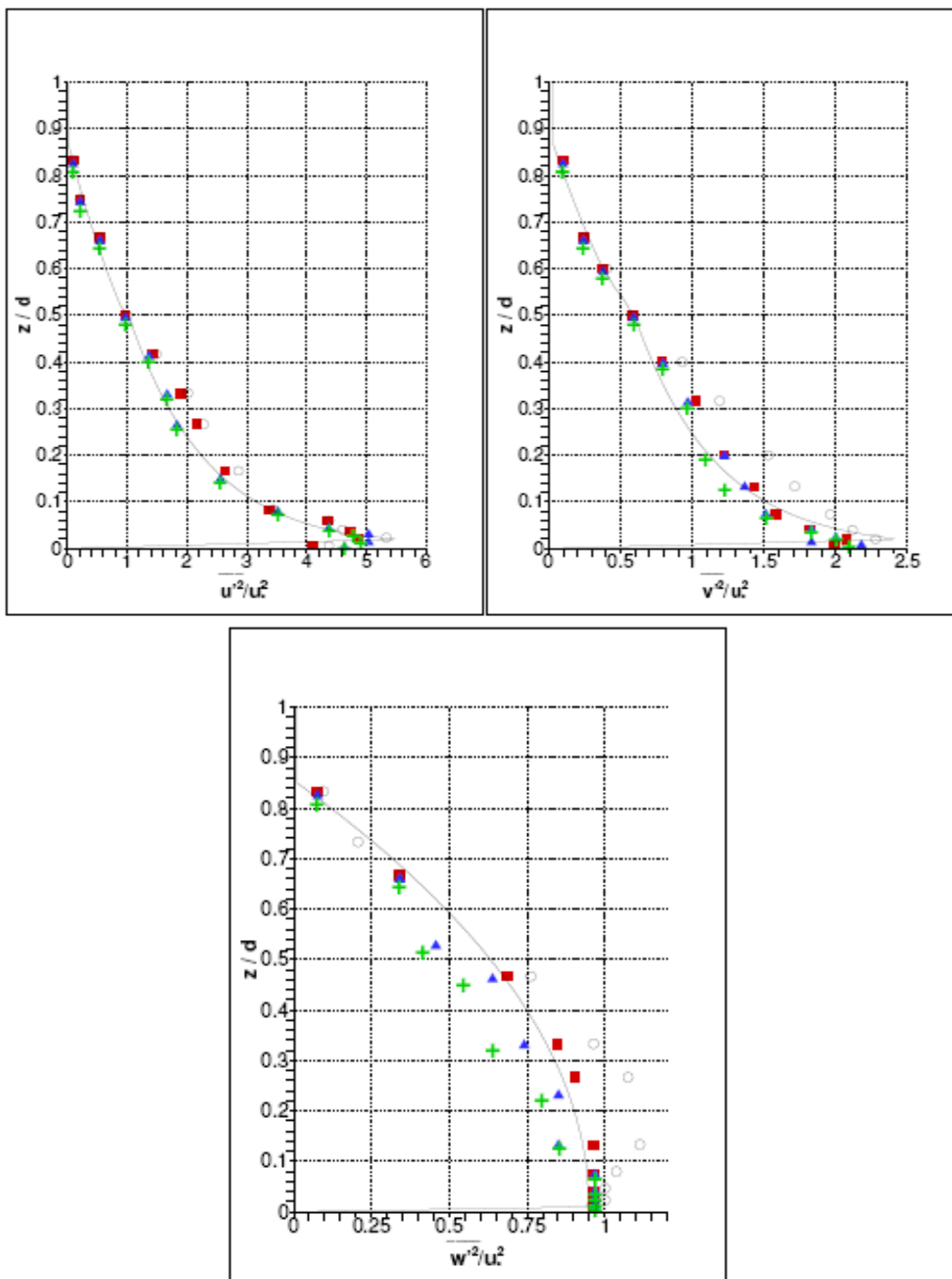


Figura 2. Perfiles medios de las fluctuaciones de velocidad.

Símbolos: Mediciones de [Gong and Ibbetson \(1989\)](#): ▲ 1,21 m; ■ 1,51 m; ○ 1,71 m; + 1,91 m

Analítico por análisis de regresión: —

B. Caso de presencia de la colina en suelo rugoso

Una colina de débil pendiente bidimensional ha sido ubicada en forma perpendicular a la dirección longitudinal del túnel de viento ([Figura 3](#)). La cima de la colina se encuentra a 1,8 m medidos desde la zona de formación de la capa límite.

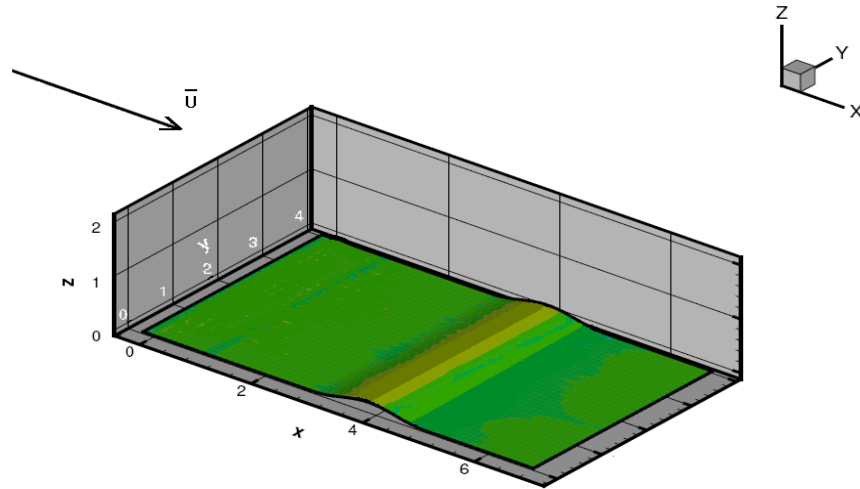


Figura 3. Posición y forma geométrica de la colina dispuesta en el túnel de viento.

La forma geométrica del perfil de la colina responde a la función analítica siguiente:

$$z_{(x)} = h \cos^2\left(\frac{\pi x}{2L_c}\right) \quad (12)$$

En la expresión (11) $h = 31 \text{ mm}$ es la altura de la cima y $L_c = 200 \text{ mm}$ es la distancia proyectada sobre el eje x desde la cima de la colina hasta una de sus bases. Con estas dimensiones las pendientes máximas son inferiores a 14° .

Las mediciones de velocidad axial, vertical y transversal han sido realizadas por los autores de la experiencia a cinco posiciones sobre el eje de simetría x del túnel de viento:

- Al pie en la ladera a barlovento.
- En la posición correspondiente a la mitad de la altura en la ladera a barlovento.
- En la posición correspondiente a la cima de la colina.
- En la posición correspondiente a la mitad de la altura en la ladera a sotavento.
- Al pie en la ladera a sotavento.

Gong and Ibbetson (1989) testearon la estabilidad lateral del flujo a una altura de $z = 105 \text{ mm}$ encontrando variaciones de $\pm 1\%$ para la velocidad media longitudinal y de $\pm 10\%$ para las fluctuaciones del campo de velocidades.

3.2 Magnitudes características de la turbulencia para suelo plano rugoso

Según las mediciones realizadas por los autores de la experiencia, los valores máximos de las fluctuaciones del campo de velocidades son:

$$\frac{u'_{m\acute{a}x}{}^2}{u_*^2} = 5,5 \quad \frac{v'_{m\acute{a}x}{}^2}{u_*^2} = 2,4 \quad \frac{w'_{m\acute{a}x}{}^2}{u_*^2} = 1$$

Lo que permite el cálculo de la escala característica de la turbulencia:

$$u'_t = \sqrt{\frac{1}{3}(u'_{m\acute{a}x}{}^2 + v'_{m\acute{a}x}{}^2 + w'_{m\acute{a}x}{}^2)} = 0,7579 \text{ m/s}$$

El número de Reynolds turbulento resulta:

$$Re_t \approx \frac{u'_t \delta}{\nu} = 15157$$

Con estos datos, el tamaño de la escala de Taylor es:

$$\lambda \approx \frac{4\delta}{Re_t^{1/2}} = 0,0097 \text{ m}$$

Que permite obtener el tiempo característico de régimen turbulento:

$$T_t \approx \frac{3\delta}{2u'_t} = 0,59 \text{ s}$$

3.3 Elección de parámetros para la Simulación de las Grandes Escalas de la turbulencia

3.3.1 El mallado de cálculo numérico: Siguiendo las relaciones encontradas por [Mason and Callen \(1986\)](#), el tamaño máximo de las celdas que componen el mallado de cálculo numérico son:

$$\Delta x = 0,045 \text{ m}, \quad \Delta y = 0,028 \text{ m}, \quad \Delta z = 0,0198 \text{ m}$$

El tamaño vertical de las celdas de cálculo es refinado paulatinamente hacia la zona cercana a la pared siguiendo una función tangente hiperbólica de forma tal que la altura vertical de las celdas en esta zona es de $\Delta z_{min} = 10 z_0$.

Los autores de la experiencia realizaron mediciones hasta corriente abajo del flujo principal hasta una abscisa de $x = 1,91 \text{ m}$ en el caso de suelo plano y hasta $x = 2,0 \text{ m}$ para el caso de presencia de la colina. En esta simulación numérica, el dominio de cálculo se prolongará hasta $x = 2,4 \text{ m}$, dividiéndolo en $63 \times 42 \times 42$ celdas según las direcciones x , y , z respectivamente.

3.3.2 Condiciones iniciales del campo de velocidades: Se aplican las condiciones de flujo estacionario según los perfiles medios y fluctuaciones del campo de velocidades medidos por los autores de la experiencia. Para generar un campo tridimensional a partir de los perfiles de velocidad se utiliza un método de aleatorización según la técnica presentada en [Aguirre \(2005\)](#).

3.3.3 Condiciones límites del campo de velocidades: En el dominio de pre-cálculo, ubicado corriente arriba, se aplican las condiciones forzadas para la velocidad media y las fluctuaciones ([Aguirre, 2005](#)) teniendo en cuenta la ley de aumento del espesor de la capa límite turbulenta corriente abajo ([Schlichting, 1979](#)). Las condiciones límites corriente abajo del dominio son de tipo convectivas ([Klemp and Wilhelmson, 1978](#)).

3.3.4 Elección del paso de tiempo de la simulación: El código ARPS trabaja con dos pasos distintos de tiempo. El más grande (Δt_G) es utilizado para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes (1), (2), (4) mientras que el más pequeño (Δt_P) permite el cálculo de la ecuación de la fluctuación de la presión (3) que considera la compresibilidad del aire en los términos en los que interviene la velocidad de las ondas sonoras V_s .

$$\Delta t_G < \frac{1}{|V_{m\acute{a}x}|} \left[\left(\frac{1}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y} \right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z} \right)^2 \right]^{-1/2} \approx 1.10^{-4} \text{ s} \quad (13)$$

El paso de tiempo pequeño considera el tamaño más reducido de las celdas de cálculo, en este caso Δz_{min} :

$$\Delta t_p < \frac{1}{V_s} \left[\left(\frac{1}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y} \right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z_{min}} \right)^2 \right]^{-1/2} \approx 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ s} \quad (14)$$

En (14) se consideró la velocidad del sonido $V_s = 300 \text{ m/s}$.

3.3.5 Coeficiente de frotamiento a la pared: ARPS adopta un modelo de pared de tipo algebraico, según la clasificación de [Baggett \(1997\)](#). En particular, considerando condiciones de impermeabilidad para la componente vertical de la velocidad (normal a la pared), [Mason and Callen \(1986\)](#) especifican una relación entre el valor de la componente longitudinal de la velocidad calculada para las celdas adyacentes a la pared y el tensor de tensiones de pared. Estas son denominadas “condiciones límites aproximativas”:

$$\begin{cases} \tau_{13}|_p = -\bar{\rho} C_{dm} |V_A^\oplus| u_A^\oplus \\ \tau_{23}|_p = -\bar{\rho} C_{dm} |V_A^\oplus| v_A^\oplus \end{cases} \quad (15)$$

En las relaciones (15) y en lo que sigue, el subíndice A indica que se trata de las celdas adyacentes a la pared. El valor $|V_A^\oplus| = \sqrt{(u_A^\oplus)^2 + (v_A^\oplus)^2}$ es el módulo de la componente horizontal de velocidad correspondiente a estas celdas y C_{dm} es el coeficiente de frotamiento a la pared. [Mason and Callen \(1986\)](#) calculan el coeficiente C_{dm} considerando ley logarítmica del perfil de viento:

$$C_{dm} = \frac{k_v^2}{\ln^2 \left(\frac{\Delta z_A}{z_0} \right)} = 0,03$$

3.3.6 Condiciones iniciales de las magnitudes escalares: Como la experiencia se ha desarrollado en condiciones de atmósfera neutra e isentrópica, se ha considerado un valor de temperatura potencial constante en el perfil de $\theta_0 = 294 \text{ }^\circ\text{K}$ y una presión a nivel de suelo de $p_0 = 1000 \text{ hPa}$.

3.3.7 Modelo de submalla: Como se explicó anteriormente, se ha utilizado la resolución dinámica para el modelo *Smagorinsky* ([Smagorinsky, 1963](#)), propuesta por [Germano et al. \(1991\)](#) e implementada en el código original ARPS por [Aguirre \(2005\)](#).

4 RESULTADOS

A. Caso de suelo plano rugoso

En la [Figura 4](#) se presenta la comparación entre los perfiles de velocidad media de la componente longitudinal a una abscisa de $1,51 \text{ m}$. Uno de ellos corresponde a las mediciones realizadas por los autores de la experiencia y el otro es obtenido a partir de los valores instantáneos de velocidad calculados por SGE en períodos de $0,5 \text{ s}$ (aproximadamente 1 Tt) y hasta 25 s , luego de esperar 5 s para la estabilidad y convergencia del cálculo numérico. Este intervalo de tiempo para el cálculo de los valores medios del campo de velocidad [5 s a 25 s] ha sido obtenido como consecuencia de un análisis de convergencia de estos perfiles hacia una solución estable. A la izquierda de la [Figura 5](#) se muestran los perfiles de la energía cinética turbulenta de las grandes escalas

$\overline{E^{\oplus}} = \frac{1}{2} \left(\overline{u_i^{\oplus'} u_i^{\oplus'}} \right)$ en línea cortada, donde $u_i^{\oplus'} = u_i^{\oplus} - \overline{u_i^{\oplus}}$ es la fluctuación del valor de velocidad de las grandes escalas alrededor de su valor promedio temporal a la abscisa considerada. Se observa además el valor de energía cinética turbulenta total $\overline{E} = \overline{E^{\oplus}} + \overline{E^-}$ en línea llena y el perfil analítico calculado por regresión a partir de las mediciones experimentales según (9), (10) y (11) utilizando la expresión $\overline{E}_a = \frac{1}{2} u_*^2 \left(\frac{\overline{u'^2}}{u_*^2} + \frac{\overline{v'^2}}{u_*^2} + \frac{\overline{w'^2}}{u_*^2} \right)$ en línea punteada. A la derecha de la misma figura, se observa una comparación entre los perfiles de cada una de las tres componentes de la velocidad. Los obtenidos numéricamente para las grandes escalas de la turbulencia en línea cortada, los correspondientes a la fluctuación total en línea llena (considerando que la energía cinética turbulenta calculada según (7) se reparte de manera isotrópica en las tres componentes) y los valores obtenidos experimentalmente en símbolos. Las Figuras 6 y 7 muestra los perfiles de velocidad media calculados con SGE y obtenidos de los datos experimentales para las abscisas 1,71 m y 1,91 m respectivamente. La Figura 8 muestra los perfiles de las fluctuaciones de las tres componentes de la velocidad calculados y obtenidos con datos experimentales a las abscisas 1,71 m (izquierda) y 1,91 m (derecha).

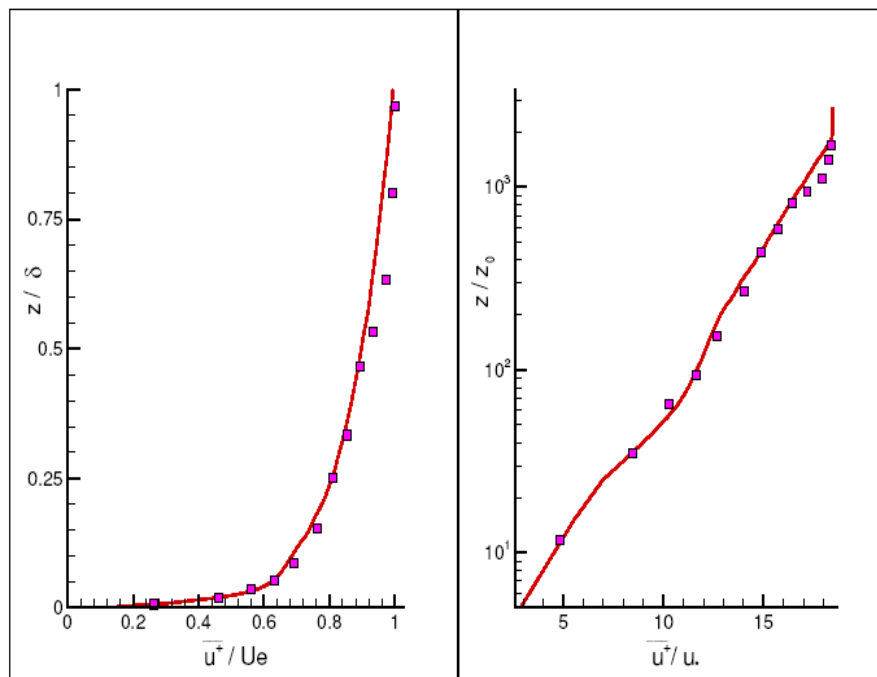


Figura 4. Perfiles de la componente longitudinal de velocidad media.

- Mediciones experimentales a 1,51 m.
- Calculado por SGE.

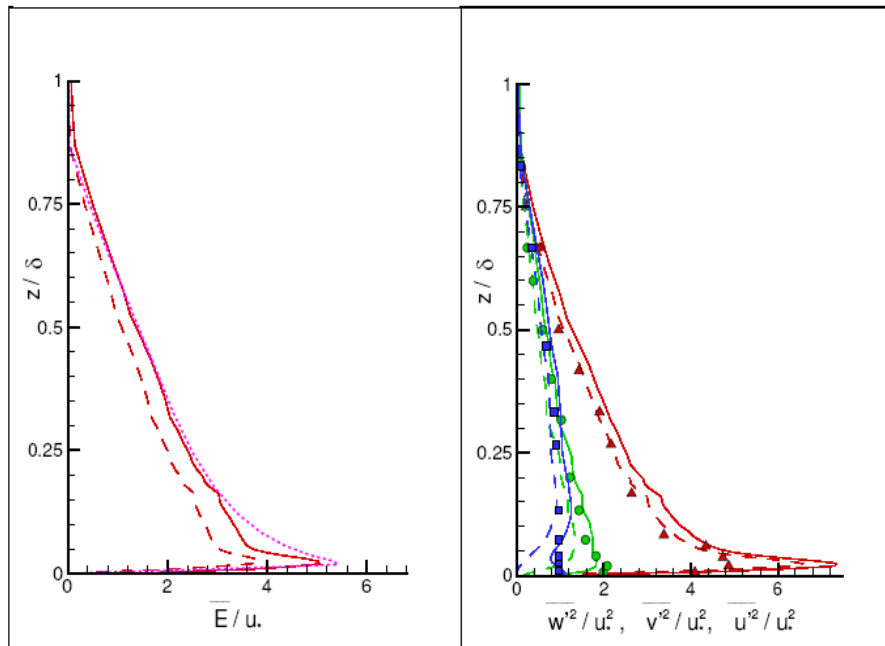


Figura 5. Perfiles de la energía cinética turbulenta (izquierda) y de las fluctuaciones de velocidad (derecha).
 ---- Grandes escalas, — Total, Analítico.
 Izquierda: Energía cinética turbulenta.
 Derecha: Fluctuación de velocidad (componente vertical w' ■, transversal v' ●, longitudinal u' ▲).

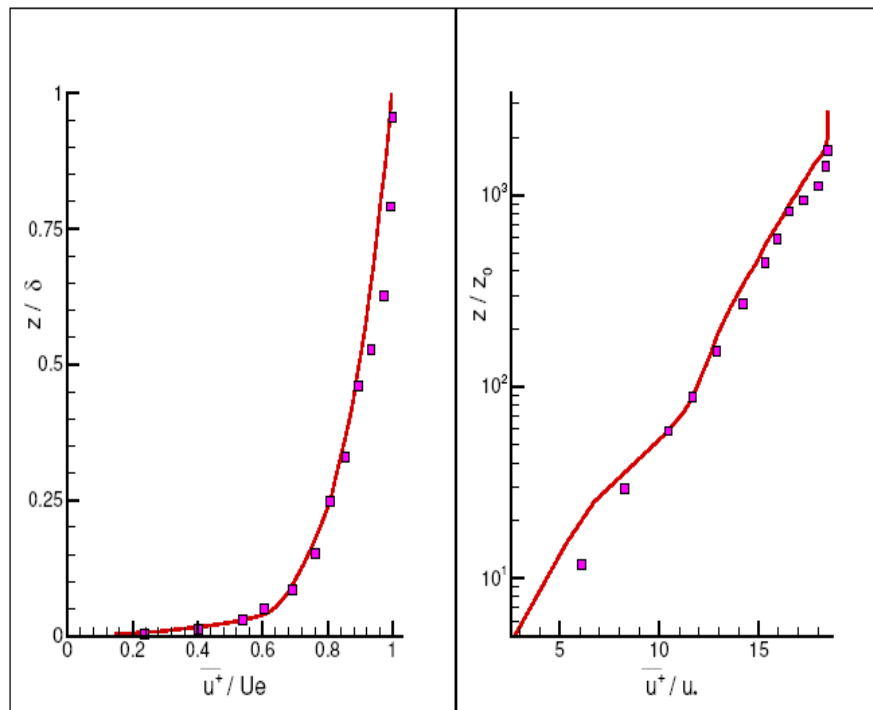


Figura 6. Perfiles de la componente longitudinal de velocidad media.
 ■ Mediciones experimentales a 1,71 m.
 — Calculado por SGE.

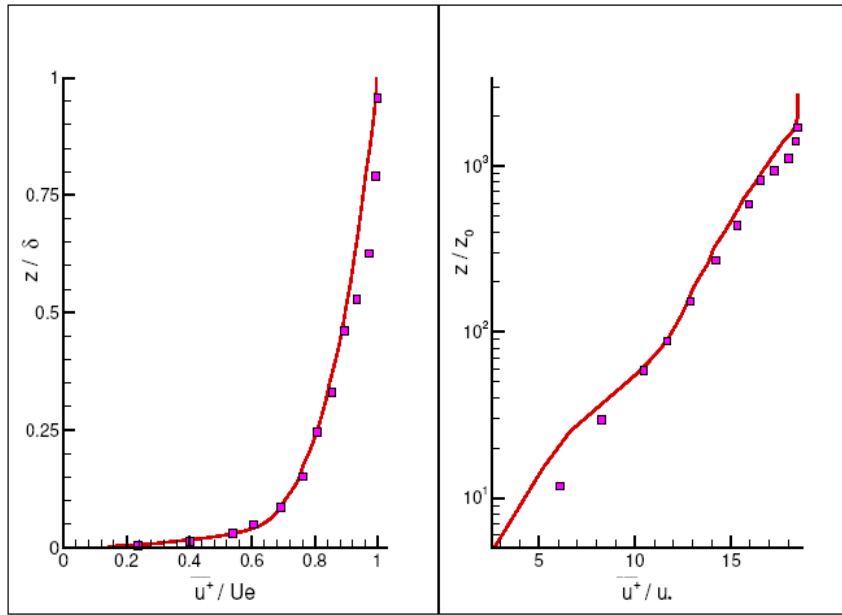


Figura 7. Perfiles de la componente longitudinal de velocidad media.

■ Mediciones experimentales a 1,91 m.
 — Calculado por SGE.

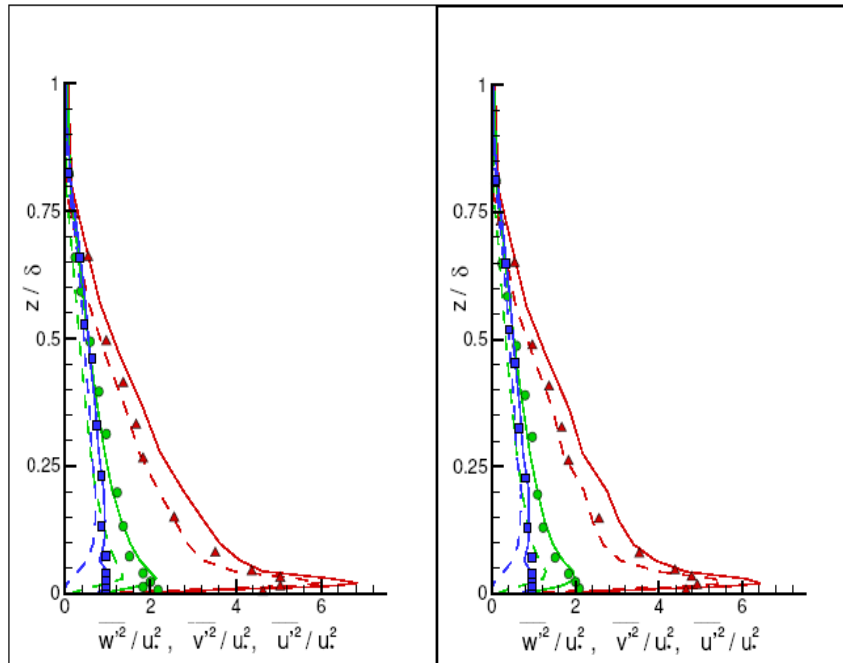


Figura 8. Perfiles de las fluctuaciones de velocidad. Izquierda: 1,71 m. Derecha: 1,91 m.

--- Grandes escalas, — Total. Símbolos: Mediciones experimentales (componente vertical w' : ■, transversal v' : ●, longitudinal u' : ▲).

B. Caso de presencia de la colina en suelo rugoso

Para este caso, [Gong and Ibbetson \(1989\)](#) realizaron mediciones de la velocidad del aire en cinco posiciones sobre el eje longitudinal del túnel de viento y a diferentes alturas. La [Figura 9](#) muestra los perfiles de la componente longitudinal de las grandes escalas de la velocidad

media calculados con el código SGE y obtenidos con los datos experimentales. La [Figura 10](#) presenta la diferencia entre la velocidad media perturbada y no perturbada por la presencia de la colina $\Delta \bar{u}_s^{\oplus} = \bar{u}^{\oplus} - \bar{u}_0^{\oplus}$ dividida la velocidad media no perturbada (suelo plano). Las [Figuras 11, 12 y 13](#) muestran respectivamente las diferencias entre los valores medios de las fluctuaciones de la velocidad (perturbada y no perturbada por la presencia de la colina) para las tres componentes respectivamente. Se observó que a partir de $6s$ el perfil de velocidad longitudinal se estabilizó. No se observaron diferencias significativas entre los resultados del cálculo utilizando intervalos de tiempo de $[6 s a 50 s]$ respecto de $[6 s a 60 s]$ para el cálculo de los perfiles medios y fluctuaciones de velocidad por lo cual, los perfiles que se muestran en las figuras anteriormente citadas se han calculado considerando los resultados en el intervalo comprendido en $[6 s a 50 s]$.

5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Para el caso de suelo plano rugoso, se observa que los resultados numéricos utilizando el código SGE están muy próximos a los valores obtenidos a partir de las mediciones experimentales, tanto para la velocidad media longitudinal como también para las fluctuaciones medias de las tres componentes ([Figuras 4, 5, 6, 7 y 8](#)). Sin embargo, existe una pequeña sobre-estimación de la velocidad media longitudinal cerca del piso ($z/z_0 = 10$) para las posiciones $x = 1,71 m$ y $x = 1,91 m$ del orden del 15% ([Figuras 6 y 7](#)). Para poder comparar los perfiles de energía cinética turbulenta obtenidos de las mediciones experimentales con los resultados de la simulación SGE, se ha calculado el aporte de la energía cinética turbulenta de submalla con ayuda de un modelo (7). Estos perfiles obtenidos a partir de las fluctuaciones de las grandes escalas en comparación con los datos obtenidos de las mediciones experimentales muestran un déficit que es más pronunciado cerca del suelo ([Figuras 5 y 8](#)).

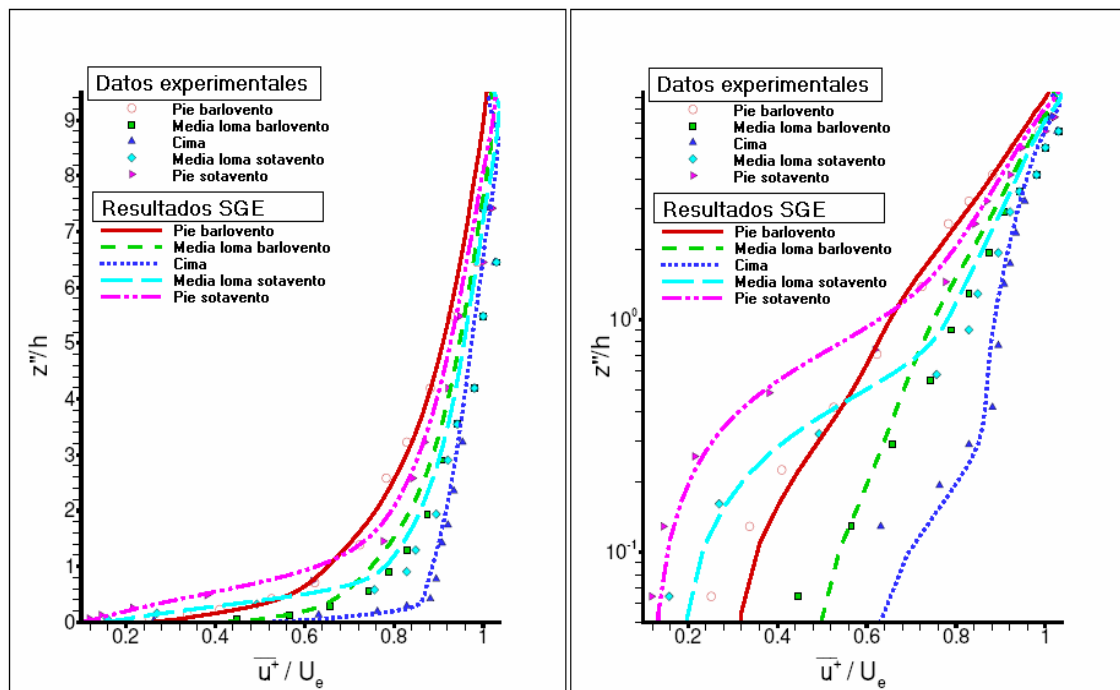


Figura 9. Perfiles de la componente longitudinal de las grandes escalas de la velocidad media para cinco posiciones sobre la colina. La variable z'' es la altura respecto al suelo y h es la elevación de la cima de la colina.

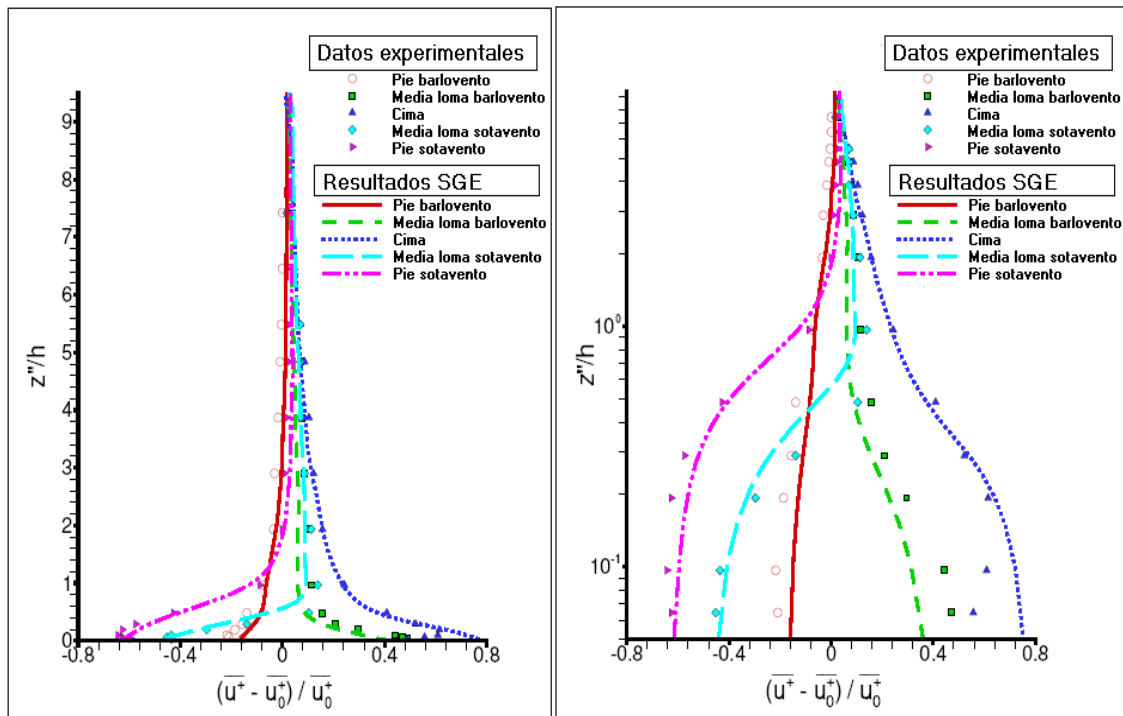


Figura 10. Perfiles de la diferencia entre la velocidad media longitudinal perturbada y no perturbada por la presencia de la colina dividida la velocidad no perturbada para cinco posiciones sobre la colina.

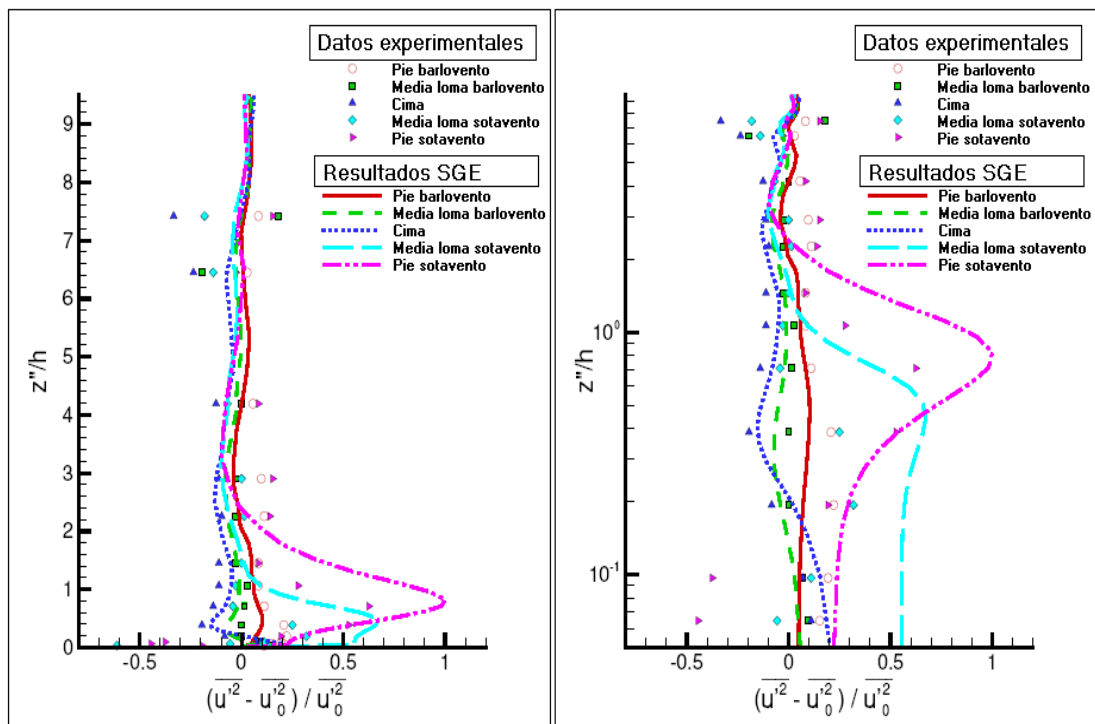


Figura 11. Perfiles de la diferencia entre las fluctuaciones de velocidad longitudinal perturbada y no perturbada por la presencia de la colina para cinco posiciones sobre la colina.

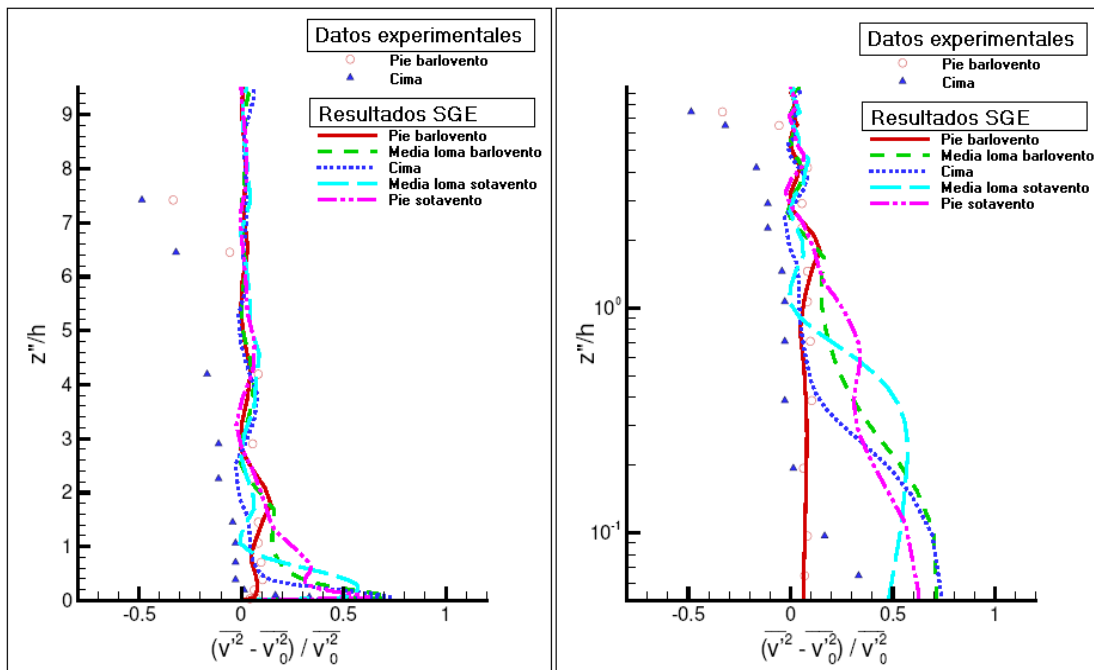


Figura 12. Perfiles de la diferencia entre las fluctuaciones de velocidad transversal perturbada y no perturbada por la presencia de la colina para cinco posiciones sobre la colina.

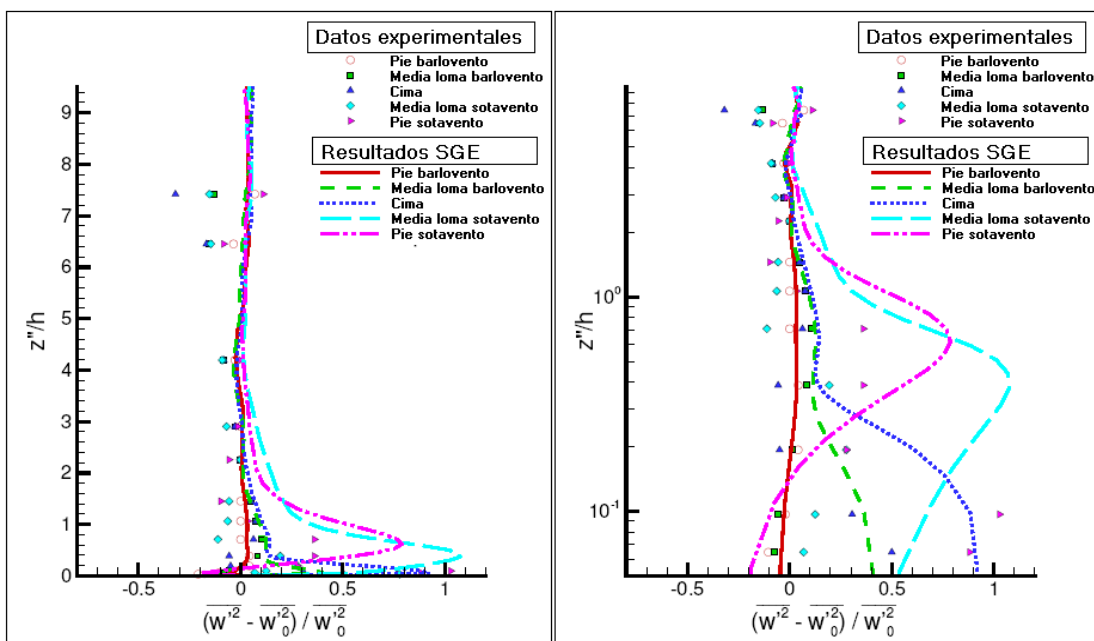


Figura 13. Perfiles de la diferencia entre las fluctuaciones de velocidad vertical perturbada y no perturbada por la presencia de la colina para cinco posiciones sobre la colina.

Sin embargo, si adicionamos a la energía obtenida por SGE el aporte de las pequeñas escalas turbulentas, se muestra un mejor acuerdo con estas mediciones. De todas formas, se observa una sobre-estimación de orden del 20 % cerca del suelo ($z/\delta = 0,015$).

La colina es vista por el flujo como un obstáculo cuya forma y altura producen perturbaciones suplementarias. El valor estimado para el tiempo característico de la turbulencia en suelo plano rugoso está muy por debajo del que corresponde al caso de

presencia de la colina, lo que se traduce en tiempos de convergencia más prolongados que en el caso de suelo plano rugoso. De lo expuesto surge que, para esta configuración de colina, es necesario aumentar el tiempo de cálculo en un factor 2 respecto al que corresponde a un suelo plano. Las Figuras 9 y 10 muestran un buen acuerdo entre los perfiles de la componente longitudinal de velocidad media calculada por SGE y obtenida a partir de las mediciones experimentales para todas las abscisas. Sin embargo, existe una ligera sobre-estimación por debajo del nivel $z''/h = 0,2$ para la abscisa correspondiente a la cima de la colina. Los perfiles de la diferencia entre los valores medios de las fluctuaciones de la velocidad para el flujo perturbado y no perturbado por la presencia de la colina (Figuras 11, 12 y 13) muestran en general un buen acuerdo con los obtenidos a partir de las mediciones experimentales. La tendencia de los perfiles calculados es la misma que los encontrados experimentalmente para las cinco abscisa, de todas maneras en la parte superior de la capa límite ($z''/h > 20$) se observan las discrepancias más importantes. No existe ningún argumento físico para explicar la variación de la diferencia entre los valores de la fluctuación del campo de velocidades perturbado y no perturbado por la colina que muestran los autores de la experiencia. En realidad, se debería esperar que estas diferencias desaparezcan por encima de una altura determinada, mostrando que el flujo no es perturbado por el relieve como se observa en los resultados de la SGE. En la Figura 11 se observa también una pequeña sub-estimación para la posición al pie a barlovento de la colina, un excelente acuerdo para las abscisas correspondientes a la media loma a barlovento y cima, y una sobre-estimación para las posiciones a sotavento de la colina. En particular, para éstas últimas, las discrepancias aumentan a medida que se desciende hacia la zona próxima al suelo a partir de una altura de $z''/h = 1$. En la Figura 12 se observa que se han omitido los datos experimentales de algunas posiciones debido a que los autores de la experiencia no los han publicado. De todas formas, se pueden realizar las mismas consideraciones que en el caso anterior para la abscisa correspondiente a la cima de la colina, mientras que para la posición al pie a barlovento, la correspondencia entre los cálculos y las mediciones es buena. En la Figura 13 se muestra también un excelente acuerdo para la posición al pie a barlovento de la colina y sobre-estimaciones para las otras posiciones, siendo las correspondientes a la media loma y cima de menor grado que las que se observan a sotavento.

REFERENCIAS

- AEA. Reglamentación de líneas aéreas exteriores de media y alta tensión. *Asociación Electrotécnica Argentina 1913-2006. Comité de estudios CE 3*, pp 1 – 87, 2006.
- Aguirre C. A. Dispersión et Mélange Atmosphérique Euléro-Lagrangien de Particules Fluides Réactives. Application à des cas simples et complexes. *Thèse de doctorat. Université Claude Bernard Lyon 1*. **115-2005**, pp 1-323, 2005.
- Aguirre C. A., A. B. Brizuela, I. Vinkovic y S. Simoëns. Modelo acoplado Eulero-Lagrangiano de simulación de la dispersión atmosférica de especies químicamente reactivas en la capa límite. *Serie Mecánica Computacional Vol XXV*, pp: 185-205, 2006.
- Aguirre C. A. y A. B. Brizuela. Características del Recurso eólico en localidades de la Provincia de Córdoba. *Memorias del II Congreso Argentino de Ingeniería Rural, Villa María, Córdoba, Argentina*, pp: 167-168, 1992.
- Aguirre C. A. y A. B. Brizuela. Aprovechamiento de Energía eólica en la Provincia de Entre Ríos. *Memorias del IV Congreso Argentino y II Internacional de Ingeniería Rural, Neuquen, Argentina*, pp: 843-848, 1996.
- Akselvoll K. and P. Moin. Large-eddy Simulation of Turbulent Confined Coannular Jets and Turbulent Flow Over a Backward Facing Step. *Dept. Mech. Eng. Tech. Rep., Stanford University*, **TF-63**, 1995.

- Arya S. P., M. E. Capuno and L. C. Fagen. Some Fluid Modeling Studies of Flow and Dispersion Over Two-dimensional Low Hills. *Atmospheric Environment*, **21**, pp: 753-764, 1987.
- ASCE. Guidelines for Transmission Line Structural Loading. *Task Committee on Structural Loading of the Committee on Electrical Transmission, Structures of the Committee on Analysis and Design of Structures Division of the American Society of Civil Engineers*. pp: 1-137, 1991.
- Baggett J. S. Some Modeling Requirements for Wall Models in Large Eddy Simulation. *Center for Turbulence Research. Annual Research Briefs. NASA Ames/Stanford Univ.* pp 123-134, 1997.
- Baggett J. S., J. Jiménez and A. G. Kravchenko. Resolution Requirements in Large-eddy Simulation of Shear Flows. *Center for Turbulence Research. Annual Research Briefs. NASA Ames/Stanford Univ.* pp 51-66, 1997.
- Bagwell T. G.; R. J. Adrian, R. D. Moser and J. Kim. Improved Approximation of Wall Shear Stress Boundary Conditions for Large Eddy Simulation. *Near-Wall Turbulent Flow*, eds. R. M. C. So, C. B. Speziale, et B. E. Launder (Elsevier Science Publisher), 1993.
- Balaras E., C. Benocci and U. Piomelli. Two-layer Approximative Boundary Conditions for Large-eddy Simulations. *AIAA J.* **34**. pp 1111-1119. 1996.
- Bardina J., J. H. Ferziger and W. C. Reynolds. Improved Turbulence Models Based on Large-eddy Simulation of Homogeneous Incompressible Turbulent Flow. *Department of Mechanical Engineering. Stanford Univ.* **NTF-19**, 1983.
- Barros V. R. Atlas del potencial eólico del Sur Argentino. *CREE, Chubut, Argentina*, pág: 1-293. 1986.
- Barros V. R. y E. Estevan. Cálculo de la potencia eólica en base a series cortas de viento. Centro Nacional Patagónico. *Revista Meteorológica XIV, N° 1 y 2, Buenos Aires, Argentina*, pp: 495 – 503, 1983.
- Bjerkan L., O. Lillevik, S. M. Helleso, S. Enge and K. Halsan. Measurements on Aeolian vibrations on a 3 Km Ford crossing with fibre-optic bragg grating sensors. *CIGRÉ*, **B2-314**, pp: 1-8, 2004.
- Brizuela A. B. Evaluación preliminar del recurso eólico en Argentina. *Red Solarimétrica, CNIE, Buenos Aires, Argentina*, pp: 1 - 19. 1982.
- Brizuela A. B. y J. L. Aiello. El recurso eólico en la Provincia de Buenos Aires. 1° Parte: Estadísticas del viento. *Red Solarimétrica, CNIE, Buenos Aires, Argentina*, pp: 1 – 152, 1988.
- Brizuela A. B. y C. A. Aguirre. Energía eólica potencial en la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Memorias de III Congreso Interamericano de Meteorología y III Congreso Mexicano de Meteorología, México*, pp: 323-327, 1988.
- Brizuela A. B. y C. A. Aguirre. Energía eólica potencial: Relevamiento del recurso. *Memorias del VI Congreso Latinoamericano y III Iberoamericano de Energía Solar, Colombia*, pp: J1-J6, 1989a.
- Brizuela A. B. y C. A. Aguirre. El recurso eólico en la Provincia de Buenos Aires. 2° Parte: Evaluación del recurso. *Red Solarimétrica, CNIE, Entre Ríos, Argentina*, pp: 1 – 70, 1989b.
- Brizuela A. B. y C. A. Aguirre. Análisis comparativo de dos métodos para estimar el recurso eólico. *Memorias del I Congreso Argentino de Ingeniería Rural, Buenos Aires, Argentina*, pp: 42, 1990.
- Cabot W. Wall Models in Large Eddy Simulation of Separated Flow. *Center for Turbulence Research. Annual Research Briefs. NASA Ames/Stanford Univ.* pp: 97-10, 1997.
- Cabot W. and P. Moin. Approximative Wall Boundary Conditions in the Large-eddy Simulations of High Reynolds Number Flow. *Flow Turb. Combust.* **63** pp: 269-291, 2000.

- Counihan J. An Improved Method of Simulating an Atmospheric Boundary Layers in a Wind Tunnel. *Atmos. Environment*, **3**, pp 197-214, 1969.
- Deardorff J. W. Stratocumulus-capped mixed layer derived from a three dimensional model. *Journal of Boundary Layer Meteorology*, **18**, pp: 495-527, 1980.
- Dudhia J. A Nonhydrostatic Version of the Peen State NCAR Mesoscale Model: Validation Test and Simulation of an Atlantic Cyclone and Cold Front. *Mon Wea Rev.*, **121**, pp: 1493-1513, 1993.
- Dyer R. C. Rastros de Tornados no sudoeste do Brasil, este do Paraguai e nordeste da Argentina, 1986.
- Esmaili H. and H. Piomelli. Large-eddy Simulation of Relaminarizing Sink Flow Boundary Layers. *Review Near Wall Turbulent Flow. Elsevier Science*, pp: 287-346, 1993.
- Fackrell J. E. and A. G. Robins. Concentration Fluctuation and Fluxes in Plumes from Point Sources in a Turbulent Boundary Layers. *Journal of Fluid Mechanics*, **117**, pp 1 – 26, 1982.
- Fujita T. T. Proposed Characterization of Tornadoes and Hurricanes by Area and Intensity. *Satellite and Mesometeorological Research Project, University of Chicago*, **91**, 1971.
- Fujita T. T. The Downburst, Microburst and Macroburst. *Satellite and Mesometeorological Research Project, University of Chicago*, 1985.
- Fujita T. T. and A. D. Pearson. Results of FPP Clasification of 1971 and 1972 Tornadoes. *Eighth Conference of Severe Local Storm*, 1973.
- Garratt J. R. The Atmospheric Boundary Layers. *Cambridge University Press.*, 1992.
- Germano M., U. Piomelli, P. Moin and W. H. Cabot. A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model. *Journal of Physics Fluids*, **A 3**, pp 1760-1765, 1991.
- Gong W. and A. Ibbetson. A wind tunnel study of turbulent flow over models hill. *Boundary Layers Meteorology*, **49**, pp 113 – 148, 1989.
- Groupe d'Action 22.11.04. Tension de pose de securité par rapport aux vibrations dues au vent. *Eléctra Review*, **198**. pp 28-43, 2001.
- INTI. Acción del Viento Sobre las Construcciones. *Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles*, **102**, pp: 1-115, 1984.
- Justus C. G. Winds and system performance. *The Franklin Institute Press. Philadelphia, Penn. USA*, pág: 1-120, 1978.
- Klemp J. B. and R. B. Wilhelmson. The Simulation of three-dimensional convective storm dynamics. *Journal Atmospheric Sciences*, **35**, pp 78-107, 1978.
- Kreplin H. and M. Eckelman. Behavior of the Three Fluctuating Velocity Components in the Wall Region of a Turbulent Channel Flow. *Phys. Fluid*, **22**, pp: 1233-1239, 1979.
- Letchford C. W. and H Hawes. Risk Assessment to Improve Reliability of Transmission Facilities Exposed to Sub-tropical High Wind Storm Event. *CIGRÉ*, **22-104**, pp: 1-5, 2000.
- Letscher P., P. Haberstich and B. Dalle. Strengthening RTE Overhead Transmission Lines Following the Storm of December 1999. *CIGRÉ*, **22-105**, pp: 1-5, 2002.
- Lichtenstein E. R. y M. L. A. Schwarzkopf. Aspectos Estadísticos de las Líneas de Inestabilidad en la Argentina. *Meteorológica*, **1 (1)**, 1970.
- Lilien D., D. Snegovisky, T. Capelle and M. Le Du. Limiting Windstorm Effects on Tower by a « Low Drag » Conductor. *CIGRÉ*, **B2-302**, pp: 1-4. 2004.
- Mason P. J. Large-eddy Simuion of the Convective Atmospheric Boundary Layer. *J. Atmos. Sci.*, **46**, pp: 1492-1516, 1989.
- Mason P. and N. Callen. On the Magnitude of the Subgrid-Scale Eddy Coefficient in a Large-Eddy Simulation of Turbulent Channel Flow. *Journal of Fluid Mechanics*, **162**, pp 439-462, 1986.
- Mikhail A. Winds power for developing nations. *Solar Research Institute, Co., USA*, pp:1-111, 1981.

- Moin P. and J. Kim. Numerical Investigation of Turbulent Channel Flow. *J. Fluid Mech.*, **118**, pp: 341-377, 1982.
- OLADE. Prospección, evaluación y caracterización de la energía eólica. *Documentos OLADE*, N° **10**, Quito, Ecuador, pp: 19-33, 1980.
- Piomelli U., J. Ferziger, P. Moin and J. Kim. New Approximative Boundary Conditions for Large-eddy Simulation of Wall-bounded Flow. *Phys. of Fluid*, **A 1 (6)**, pp: 1061-1068, 1989.
- Raupach M. R., A. S. Thom and I. Edwards. A Wind-tunnel Study of Turbulent Flow Close to Regularly Arrayed Rough Surfaces. *Boundary Layers Meteorology*, **18**, pp: 373-397, 1980.
- Ross A. A. H. J., B. Rhebergen, J. P. M. van Oosterhout and C. G. N. de Jong. Probabilistic Based Condition Assessment of Overhead Transmission Lines. *CIGRÉ*, **22-103**, pp: 6, 2000.
- Schiestel R. Modélisation et Simulation des écoulements turbulents. *Traité des Nouvelles Technologies – Série Mécanique. Edition Hermes*, 1993.
- Schlichting H. Boundary-Layer Theory. *Seven edition Mc GRAW-HILL.*, 1979.
- Schmidt H. and U. Schumann. Coherent Structure of the Convective Boundary Layers Derived from Large-eddy Simulation. *J. Fluid Mech.*, **200**, pp: 511-562. 1989.
- Schwarzkopf M. L. A. y L. C. Rosso. Informe Final Contrato Agua y Energía Eléctrica. *Universidad de Buenos Aires. Expte 433.244/84*, 1989.
- Schwarzkopf M. L. A y L. C. Rosso. Riesgo de Tornados y Corrientes Descendentes en la Argentina. *Universidad de Buenos Aires.* pp: 1-30, 1993.
- Smagorinsky J. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiments. *Mon. Weather Rev.* **91**, pp 99-164, 1963.
- Wang M. and P. Moin. Dynamic Wall Modeling for LES of Complex Turbulent Flow. *Phys. Fluids*, **14**, pp: 2043-2051. 2002.
- WMO, 1981. Meteorological aspects on the utilization of wind as an energy source. *Tech. Note 175, Geneva, Suiza*, pp: 1-180, 1981.
- Xue M., K. K. Droegemeier and V. Wong. The Advanced Regional Prediction System and Real-time Storm Weather Prediction. *International Workshop on Limited-area and Variable Resolution Models. Beijing, China. World Meteorology Organization.* 1995.
- Xue M., K. Droegemeier and V. Wong. The Advanced Regional Prediction System (ARPS). A Multi-Scale Nonhydrostatic Atmospheric Simulation and Prediction Model. Part I: Model Dynamics and Verification. *Meteorology Atmospheric Physics.* **75**, pp 161-193, 2000.
- Zegadi R., M. Ayrault and P. Mejean. Effects of a two-dimensional Low Hill in a Thermally neutral and Stably Stratified Turbulent Boundary Layers. *Atmospheric Environment*, **28**, pp 1871 – 1878, 1994.