

UNA METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS EN MODELOS DE VIENTO DE TIPO MASA CONSISTENTE. ESTUDIO DE LA SENSIBILIDAD

E. Rodríguez, G. Montero, R. Montenegro, J.M. Escobar y J.M. González-Yuste

Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Edif. Central del Parque Científico y Tecnológico
Campus Universitario de Tafira
35017 – Las Palmas de G.C.
e-mail: barrera@dma.ulpgc.es

Palabras clave: estimación de parámetros, masa consistente, algoritmos genéticos

Resumen. *Los modelos de viento de tipo masa consistente [1] están basados en la ecuación de continuidad y son capaces de proporcionar campos de viento a partir de unas pocas medidas observadas en estaciones meteorológicas. Su eficiencia depende en gran medida de ciertos parámetros que los gobiernan y que normalmente toman sus valores utilizando reglas empíricas. En este trabajo se propone una metodología que permite la estimación automática de los principales parámetros de un modelo de viento de masa consistente tridimensional mediante elementos finitos en 3-D, haciendo uso de los algoritmos genéticos [2, 3] para resolver un problema inverso, de manera que el viento calculado se ajuste lo mejor posible al viento observado en las estaciones.*

Asimismo, utilizando esta metodología junto con una técnica de refinamiento de la malla tridimensional de soporte, se propone un método que permite estudiar qué zonas de un dominio resultan más afectadas por variaciones en los valores de los parámetros.

Este estudio de las zonas de mayor sensibilidad a cambios en los parámetros puede constituir una buena estrategia para determinar la distribución de nuevas estaciones de medida sobre terrenos de orografía compleja de los que se tenga información meteorológica escasa o de poca calidad.

1. Modelo de masa consistente en 3-D

Este modelo [1] está basado en la ecuación de continuidad para un fluido incompresible, considerando constante la densidad del aire en el dominio Ω y condiciones de impermea-

bilidad en Γ_b , es decir, en el terreno y en la frontera superior.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad \text{en } \Omega \quad (1)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{u} = 0 \quad \text{en } \Gamma_b \quad (2)$$

Se formula un problema de mínimos cuadrados en Ω con el objetivo de ajustar $\vec{u}(\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w})$

$$E(\vec{u}) = \int_{\Omega} [\alpha_1^2 ((\tilde{u} - u_0)^2 + (\tilde{v} - v_0)^2) + \alpha_2^2 (\tilde{w} - w_0)^2] d\Omega \quad (3)$$

donde el viento interpolado $\vec{v}_0 = (u_0, v_0, w_0)$ se obtiene a partir de medidas experimentales y α_1, α_2 son los módulos de precisión de Gauss. El problema equivale a encontrar el punto silla (\vec{v}, ϕ) del Lagrangiano [4]

$$E(\vec{v}) = \min_{\vec{u} \in K} \left[E(\vec{u}) + \int_{\Omega} \phi \vec{\nabla} \cdot \vec{u} d\Omega \right] \quad (4)$$

siendo $\vec{v} = (u, v, w)$, ϕ el multiplicador de Lagrange y K el conjunto admisible de funciones. Aplicando la técnica de los multiplicadores de Lagrange para minimizar 4, resultan las siguientes ecuaciones de Euler-Lagrange

$$u = u_0 + T_h \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad v = v_0 + T_h \frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad w = w_0 + T_v \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (5)$$

donde $T = (T_h, T_h, T_v)$ es el tensor diagonal de transmisividad, con $T_h = \frac{1}{2\alpha_1^2}$ y $T_v = \frac{1}{2\alpha_2^2}$. Como α_1 y α_2 son constantes en Ω , de la aproximación variacional resulta un problema elíptico al sustituir 5 en 1.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{T_v}{T_h} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = -\frac{1}{T_h} \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial z} \right) \quad \text{en } \Omega \quad (6)$$

Se consideran condiciones de tipo Dirichlet en las fronteras abiertas del dominio y de tipo Neumann en el terreno y frontera superior

$$\phi = 0 \quad \text{en } \Gamma_a \quad (7)$$

$$\vec{n} \cdot T \vec{\nabla} \mu = -\vec{n} \cdot \vec{v}_0 \quad \text{en } \Gamma_b \quad (8)$$

El problema definido por las ecuaciones 6–8 se resuelve usando elementos finitos con discretización en tetraedros (vease [5]) resultando un conjunto de matrices elementales de 4×4 y de vectores elementales de 4×1 , que se ensamblan dando lugar a un sistema lineal de ecuaciones simétrico que se resuelve con el método del gradiente conjugado precondicionado.

2. Viento interpolado

El primer paso para el cálculo del campo de viento es la llamada interpolación horizontal. Las medidas de velocidad del viento se interpolan a la altura de las estaciones z_m teniendo en cuenta la distancia y la diferencia de altura existentes entre cada punto y la estación [1]

$$\vec{v}_0(z_m) = \varepsilon \frac{\sum_{n=1}^N \frac{\vec{v}_n}{d_n^2}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{d_n^2}} + (1 - \varepsilon) \frac{\sum_{n=1}^N \frac{\vec{v}_n}{|\Delta h_n|}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{|\Delta h_n|}} \quad (9)$$

donde \vec{v}_n es la velocidad observada en la estación n , N es el número de estaciones consideradas en la interpolación, d_n es la distancia horizontal entre la estación n y el punto donde se quiere computar la velocidad del viento, $|\Delta h_n|$ es la diferencia de altura entre ambos puntos y ε es un parámetro ($0 \leq \varepsilon \leq 1$) que permite dar mayor importancia a uno de estos criterios de interpolación.

En el perfil vertical de viento, este modelo no considera el fenómeno de turbulencia, cercano al terreno y producido por su rugosidad. Por tanto, se establece

$$\vec{v}_0(z) = 0 \quad z \leq z_0 \quad (10)$$

En la capa superficial se considera un perfil logarítmico, que tiene en cuenta los efectos que sobre la dirección e intensidad del viento tienen la interpolación horizontal antes mencionada, la rugosidad y la estabilidad atmosférica (neutra, estable o inestable, según la clasificación de Pasquill). Por encima de la capa superficial, el modelo realiza una interpolación lineal usando el viento geostrófico. El perfil logarítmico viene dado por la siguiente expresión

$$\vec{v}_0(z) = \frac{\vec{v}^*}{k} \left(\log \frac{z}{z_0} - \Phi_m \right) \quad z_0 < z \leq z_{sl} \quad (11)$$

donde \vec{v}^* es la velocidad de fricción, k es la constante de von Karman, z_0 es la longitud de rugosidad y z_{sl} es la altura de la capa superficial. El valor de Φ_m depende de la estabilidad atmosférica

$$\begin{aligned} \Phi_m &= 0 && \text{(neutra)} \\ \Phi_m &= -5 \frac{z}{L} && \text{(estable)} \\ \Phi_m &= \log \left[\left(\frac{\theta^2 + 1}{2} \right) \left(\frac{\theta + 1}{2} \right)^2 \right] - 2 \arctan \theta + \frac{\pi}{2} && \text{(inestable)} \end{aligned} \quad (12)$$

donde $\theta = (1 - 16 \frac{z}{L})^{1/4}$ y $\frac{1}{L} = az_0^b$; a y b dependen de la clase de estabilidad de Pasquill. L es la denominada longitud de Monin-Obukhov. La velocidad de fricción se obtiene en cada punto a partir de las medidas interpoladas a la altura de las estaciones (interpolación

horizontal).

$$\vec{v}^* = \frac{k \vec{v}_0(z_m)}{\log \frac{z_m}{z_0} - \Phi_m} \quad (13)$$

La altura de la capa límite planetaria z_{pbl} se toma de forma que la velocidad y dirección del viento se consideran constantes por encima de ella

$$z_{pbl} = \frac{\gamma |\vec{v}^*|}{f} \quad (14)$$

donde $f = 2\omega \sin \varphi$ es el parámetro de Coriolis (ω es la velocidad de rotación de la tierra y φ la latitud), y λ es un parámetro que depende de la estabilidad atmosférica. La altura de la capa de mezcla, h , coincide con z_{pbl} en condiciones neutras e inestables. En condiciones estables, Zilitinkevich sugiere [6]

$$h = \gamma' \sqrt{\frac{|\vec{v}^*| L}{f}} \quad (15)$$

donde γ' es otra constate de proporcionalidad. La altura de la capa superficial es $z_{sl} = \frac{h}{10}$. Desde z_{sl} hasta z_{pbl} se realiza un una interpolación con el viento geostrófico v_g

$$\vec{v}_0(z) = \rho(z) \vec{v}_0(z_{sl}) + [1 - \rho(z)] \vec{v}_g \quad z_{sl} < z \leq z_{pbl} \quad (16)$$

$$\rho(z) = 1 - \left(\frac{z - z_{sl}}{z_{pbl} - z_{sl}} \right)^2 \left(3 - 2 \frac{z - z_{sl}}{z_{pbl} - z_{sl}} \right) \quad (17)$$

Finalmente el modelo asume

$$\vec{v}_0(z) = \vec{v}_g \quad z > z_{pbl} \quad (18)$$

3. Discusión sobre los parámetros objeto de estimación

En este apartado se definen los cuatro parámetros del modelo de viento que son objeto de estimación. Primero se considera el llamado parámetro de estabilidad

$$\alpha = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \sqrt{\frac{T_v}{T_h}} \quad (19)$$

ya que el mínimo del funcional (3) es el mismo si se divide por α_2^2 . Por otra parte, para $\alpha \gg 1$ predomina la dirección vertical en el viento, mientras que para $\alpha \ll 1$ el ajuste tiene lugar principalmente en el plano horizontal. Así, la elección de α permite al aire sobrepasar un obstáculo o rodearlo, respectivamente [7]. En la práctica, el comportamiento de los modelos de masa consistente en muchos experimentos numéricos demuestra que son muy sensibles a los valores de α , por lo tanto, en este trabajo se presta particular atención

a este problema. Muchos autores han estudiado la parametrización de la estabilidad, dado que la dificultad para determinar el valor correcto de α ha limitado el uso de los modelos de masa consistente en terrenos con orografía compleja. Sherman [8], Kitada et al. [9] y Davis et al. [10], proponen tomar $\alpha = 10^{-2}$, esto es, proporcional a la magnitud de w/u . Otros autores, como Ross et al. [11] y Moussiopoulos et al. [12] relacionan α con el número de Froude. Geai [13], Lalas et al. [14] y Tombrou et al. [15], consideran que el parámetro α varía en la dirección vertical. Finalmente, Barnard et al. [16] proponen un procedimiento para obtener α en cada simulación de un campo de velocidades de viento. La idea es usar N medidas de viento para obtener el campo de velocidades y usar las restantes N_r medidas como referencia. A continuación se realizan diversas simulaciones con diferentes valores de α . Finalmente, el parámetro de estabilidad toma el valor que hace que las velocidades calculadas difieran menos con las de referencia. Este método permite obtener valores de α que únicamente son fiables para cada caso particular y no puede proporcionar a priori valores adecuados para otras simulaciones. En este trabajo se utiliza una versión de este método propuesto en [16], empleando la técnica de los algoritmos genéticos para encontrar automáticamente el valor de α .

El segundo parámetro que va a estimarse es el coeficiente de peso ε ($0 \leq \varepsilon \leq 1$) de la ec. (9). Cuando $\varepsilon \rightarrow 1$ cobra mayor importancia la distancia horizontal entre cada punto y las estaciones de medida, mientras que cuando $\varepsilon \rightarrow 0$ la importancia recae sobre la diferencia de altura entre dichos puntos y las estaciones [1]. En general, el segundo caso es el que suele considerarse cuando se trabaja con terrenos complejos, mientras que el primero se ha usado en problemas con topografía uniforme o en análisis horizontales en 2-D. En aplicaciones reales, donde pueden existir zonas de orografía compleja junto con otras zonas más regulares, parece adecuado utilizar valores intermedios de ε .

El siguiente parámetro sometido a estudio es γ , usado en (14) y relacionado con la altura de la capa límite planetaria. Existen diferentes versiones de cuáles son los valores que puede tener este parámetro. Panofsky et al. [17] proponen el intervalo [0.15,0.25]. Por otro lado, Ratto [18] sugiere directamente $\gamma = 0,3$ en el código del programa *WINDS*, mientras que γ debe encontrarse en [0.3,0.4] según de Baas [19]. Por lo tanto, en nuestras simulaciones, el espacio de búsqueda de γ debe incluir todas estas posibilidades.

Finalmente, estamos interesados en obtener valores adecuados del parámetro γ' , que interviene en el cálculo de la altura de la capa de mezcla en condiciones atmosféricas estables (véase la ec. (15)). Garratt [20] propone $\gamma' = 0,4$. En el código de *WINDS* también se establecen valores de γ' cercanos a 0,4. Por tanto, la búsqueda del valor de γ' se hará en el entorno de 0,4.

4. Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos (AG) son herramientas de optimización basadas en el mecanismo de la evolución natural. Producen intentos sucesivos que tienen una probabilidad creciente de obtener un óptimo global. Este trabajo se basa en el modelo desarrollado por Levine [21]. Los aspectos más importantes de los AG son la construcción de una población

inicial, la evaluación de cada individuo a través de la función objetivo, la selección de los progenitores de la siguiente generación, el cruce entre dichos progenitores para dar lugar a los hijos y la mutación para incrementar la diversidad.

Usualmente se emplean dos tipos de reemplazo de la población. El primero, el reemplazo generacional, sustituye la población entera en cada iteración [22]. El segundo, conocido como estado estacionario (*steady-state*), sólo reemplaza algunos individuos en cada generación [23, 24, 25]. En nuestros experimentos la población inicial se genera aleatoriamente y se usa como criterio de parada el número de iteraciones. La fase de selección crea una población intermedia basándose en la evaluación de la función objetivo. Nosotros hemos usado dos esquemas de selección [21]: estocástica universal (SU) y por torneo binario (BT). El operador de cruce es el encargado de crear hijos a partir de la codificación binaria de los progenitores. Aquí hemos usado el operador de cruce uniforme (U), que se basa en la probabilidad de intercambio entre dos bits de los progenitores [26]. Según [27] el operador de mutación da mejores resultados si se usa tras el cruce. Su utilidad radica en que permite alcanzar individuos del espacio de búsqueda que de otra forma no habrían sido considerados. Cuando parte de un cromosoma ha sido seleccionado aleatoriamente para ser mutado, los genes correspondientes a esa parte se cambian con probabilidad p . En nuestros trabajos hemos considerado dos operadores de mutación diferentes. El primero (G) es de la forma $\nu \leftarrow \nu \pm p \times \nu$, donde ν es el valor del alelo y p se toma de una distribución Gaussiana. El segundo operador (R) simplemente reemplaza ν con un valor seleccionado de forma uniformemente aleatoria del rango de búsqueda para ese gen.

La función objetivo juega un papel análogo al del medio ambiente. Cada individuo de cada población es evaluado a través de esta función. Esto proporciona una medida, relativa al resto de la población, de cómo cada individuo satisface una métrica específica del problema. En los experimentos numéricos con este modelo de viento buscamos valores óptimos de α , ε , γ and γ' . Para ello, se plantea la minimización de una función objetivo que consiste en el error relativo medio de las velocidades obtenidas por el modelo con respecto a las medidas de las estaciones de referencia

$$F(\alpha, \varepsilon, \gamma, \gamma') = \frac{1}{N_r} \sum_{n=1}^{N_r} \frac{|\vec{v}_n - \vec{v}(x_n, y_n, z_n)|}{|\vec{v}_n|} \quad (20)$$

donde $\vec{v}(x_n, y_n, z_n)$ es la velocidad de viento obtenida por el modelo en la posición de la estación n , y N_r es el número de estaciones de referencia.

5. Estudio de la sensibilidad

El modelo de viento en estudio utiliza técnicas de refinamiento de la malla tridimensional [28] para mejorar la solución numérica en aquellas zonas del dominio donde se produce mayor error. Una cuestión interesante es el estudio del efecto del refinamiento de la malla en la estimación de parámetros. Más concretamente, estamos interesados en estudiar cómo afecta, en un problema dado, el hecho de utilizar los parámetros estimados sobre una

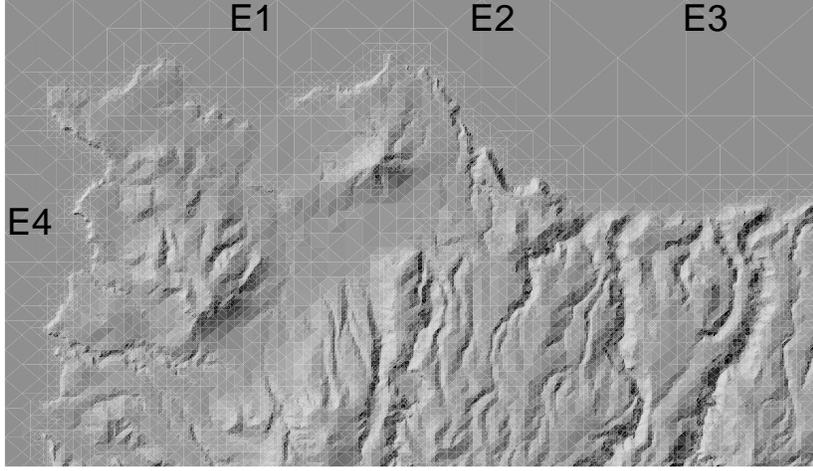


Figura 1: Localización de las cuatro estaciones sobre el dominio.

mallá, al usar como soporte otra mallá producto del refinamiento o del desrefinamiento de la primera. Para ello, definimos un parámetro de sensibilidad S_T que nos permite determinar cómo afecta la variación de los parámetros al campo de viento en general, no sólo en el entorno de las estaciones de medida:

$$S_T = \frac{|v_T^p - v_T^{p'}|}{|v_T^p|} \quad (21)$$

donde, v_T^p es el viento obtenido en elemento T -ésimo de la mallá con el conjunto p de parámetros, y $v_T^{p'}$ el obtenido con el conjunto de parámetros p' .

Se plantea entonces un problema de cálculo del campo de viento sobre un dominio de $16,5 \times 9,5 \times 7 \text{ km}$ situado en la zona noroeste de la isla de Gran Canaria. A partir de la topografía digitalizada del terreno, se genera una mallá τ_0' con tiene 44886 nodos y 216043 tetraedros.

En la figura 1 puede verse la localización de las estaciones en el dominio y en la tabla 1 aparecen los valores de la intensidad y dirección del viento medidos en cada estación. Los datos correspondientes al viento geostrófico se aproximan aplicando la ley de resistencia geostrófica, resultando un vector de componentes $(0,47, -3,19, 0)$ en m/s . Se realiza entonces una primera estimación de los parámetros del modelo con algoritmos genéticos, considerando $N = N_r = 4$, obteniéndose así los siguientes valores: $\alpha = 5,3727$, $\varepsilon = 1$, $\gamma = 0,1501$, $\gamma' = 0,15$. La mejor evaluación de la función objetivo fue 0,0254. A continuación se realizan tres iteraciones de cálculo del viento aplicando refinamiento local de la mallá, tras las que se obtiene la mallá τ_1 con 66248 nodos y 335865 tetraedros.

Con esta nueva mallá τ_1 como soporte se realizó una nueva estimación de los parámetros del modelo, resultando $\alpha = 4,9344$, $\varepsilon = 0,9999$, $\gamma = 0,15$ y $\gamma' = 0,1502$; el valor de la función objetivo fue 0,0315.

Estación	$ \vec{v} $	direc.	x	y
E1	3.75	155	433926	3116868
E2	3.75	155	439460	3116868
E3	3.75	155	443333	3116868
E4	3.00	178	430053	3113068

Cuadro 1: Valores de viento asignados a las estaciones y localización de las mismas en coordenadas UTM.

Con estos parámetros se calcula nuevamente el campo de velocidades de viento y se realiza un paso de refinamiento local sobre τ_1 . El parámetro de refinamiento en este caso fue $\theta = 0,5$, resultando la malla τ_2 con 103744 nodos y 545420 tetraedros.

Finalmente se realizó otra estimación de parámetros sobre τ_2 , en la que resultó $\alpha = 5,059$, $\varepsilon = 1$, $\gamma = 0,1501$ y $\gamma' = 0,1501$, con un valor de la función objetivo de 0,032.

Malla	Parámetros	F. Objetivo	Máx. Sensib.	Tetraedro
τ_0	$P(\tau_0)$	0.0255		
τ_0	$P(\tau_1)$	0.0256	2.4304	55475
τ_0	$P(\tau_2)$	0.0255	1.6919	55475
τ_1	$P(\tau_0)$	0.0316	0.7188	166981
τ_1	$P(\tau_1)$	0.0315		
τ_1	$P(\tau_2)$	0.0315	0.1786	154743
τ_2	$P(\tau_0)$	0.0320	0.9055	349208
τ_2	$P(\tau_1)$	0.0320	0.4151	349208
τ_2	$P(\tau_2)$	0.0320		

Cuadro 2: Valores de las sensibilidades. $P(\tau_i)$ es el conjunto de los cuatro parámetros estimados sobre la malla τ_i .

Se calcularon después las sensibilidades correspondientes a las combinaciones de parámetros de la tabla 2. Puede comprobarse que, para este experimento, los valores de las sensibilidades son pequeños, ya que los parámetros estimados son bastante parecidos.

También se observa en dicha tabla que existe una cierta continuidad en los parámetros, en el sentido de que el uso de $P(\tau_{i+1})$ en el problema con la malla τ_i afecta menos a la función objetivo que el uso de parámetros de mallas más “alejadas”, es decir $P(\tau_{i+k})$, $k > 1$. Además se observa que ese efecto sobre la función objetivo es menor cuanto más refinadas están las mallas.

En las gráficas 2, 3, 4, 5, 6 y 7 puede observarse algunos detalles de la distribución espacial de las zonas de mayor sensibilidad en cada uno de los casos. Como se ve, las zonas donde el modelo es más sensible a la variación de los parámetros son muy semejantes. Para reducir la sensibilidad y por tanto mejorar el viento obtenido por el modelo convendría situar estaciones de medida en esas zonas. De hecho, el estudio de la sensibilidad podría ser una buena estrategia para determinar la distribución de nuevas estaciones de medida

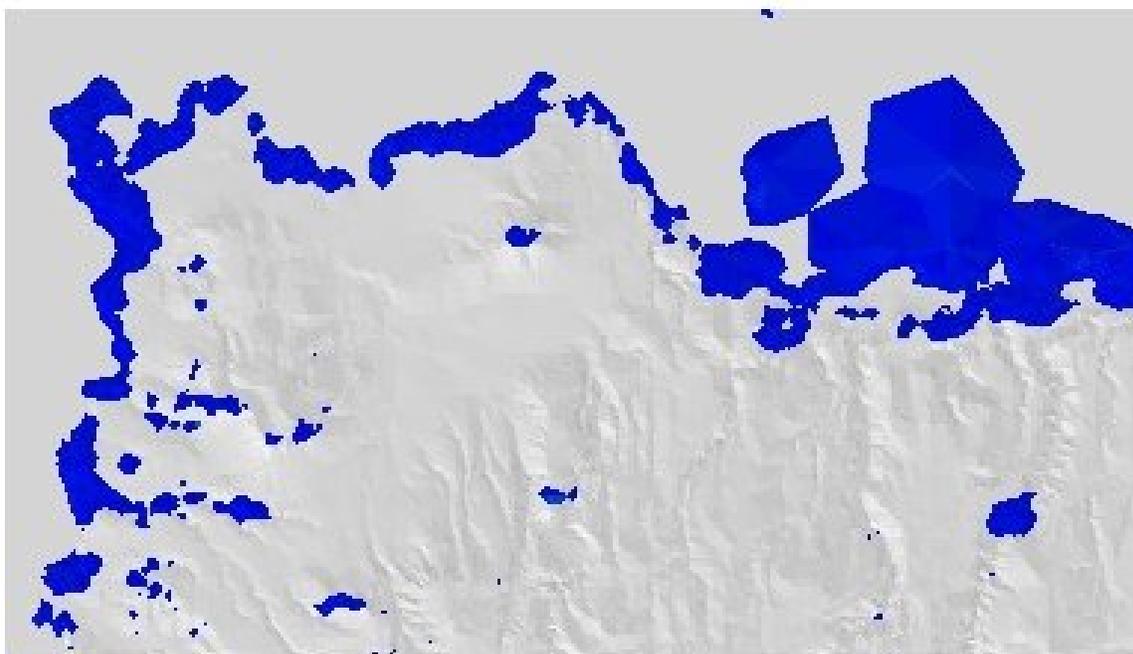


Figura 2: Sensibilidad de τ_0 con $P(\tau_1)$. Zona con valores de sensibilidad por encima de 0,024.

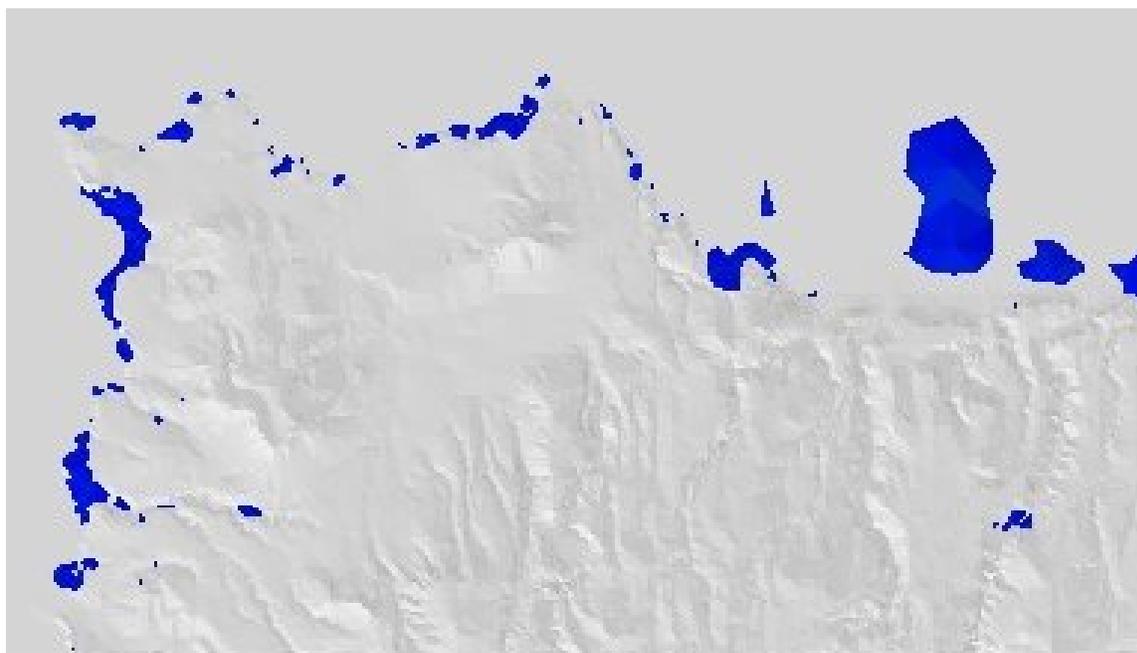


Figura 3: Sensibilidad de τ_0 con $P(\tau_2)$. Zona con valores de sensibilidad por encima de 0,016.

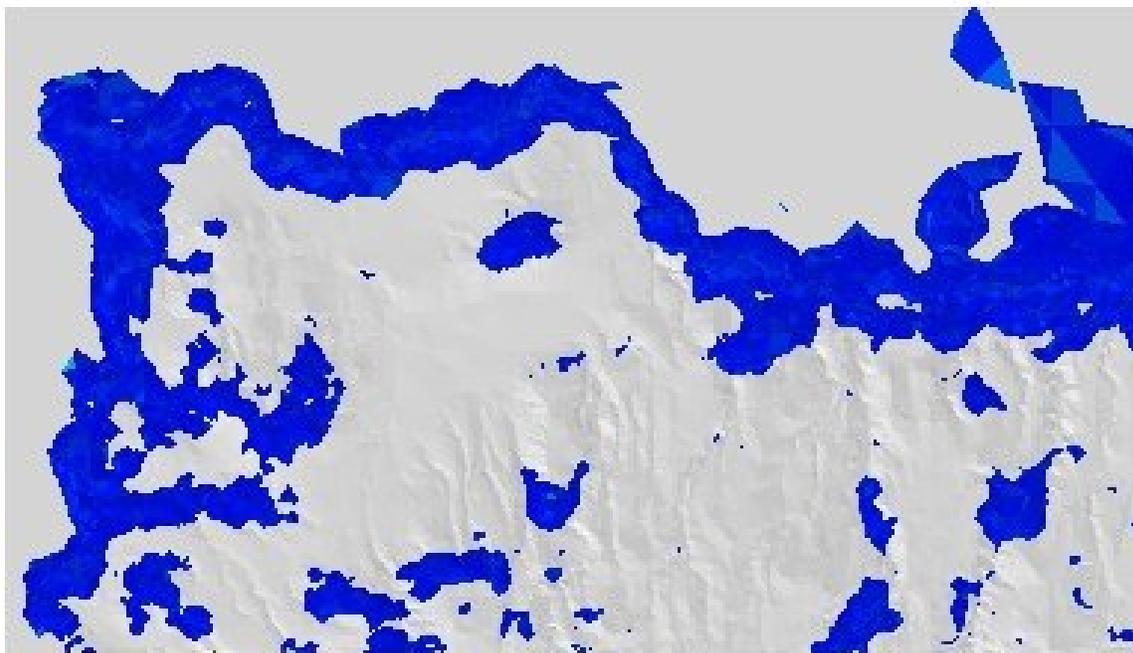


Figura 4: Sensibilidad de τ_1 con $P(\tau_0)$. Zona con valores de sensibilidad por encima de 0,016.

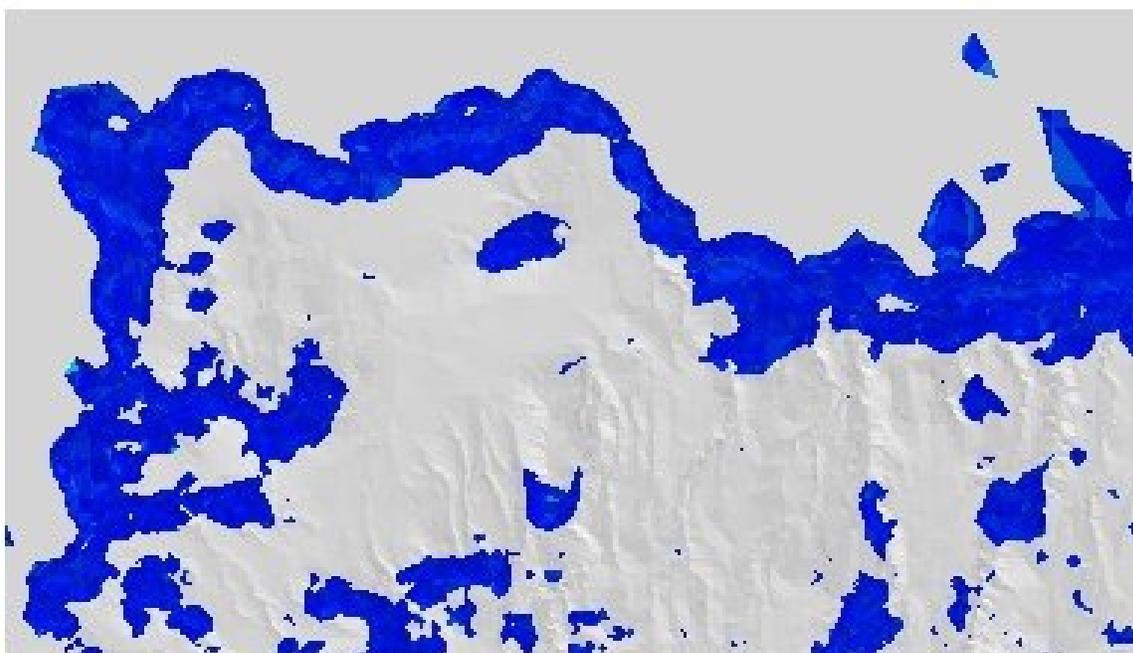


Figura 5: Sensibilidad de τ_1 con $P(\tau_2)$. Zona con valores de sensibilidad por encima de 0,005.



Figura 6: Sensibilidad de τ_2 con $P(\tau_0)$. Zona con valores de sensibilidad por encima de 0,009.

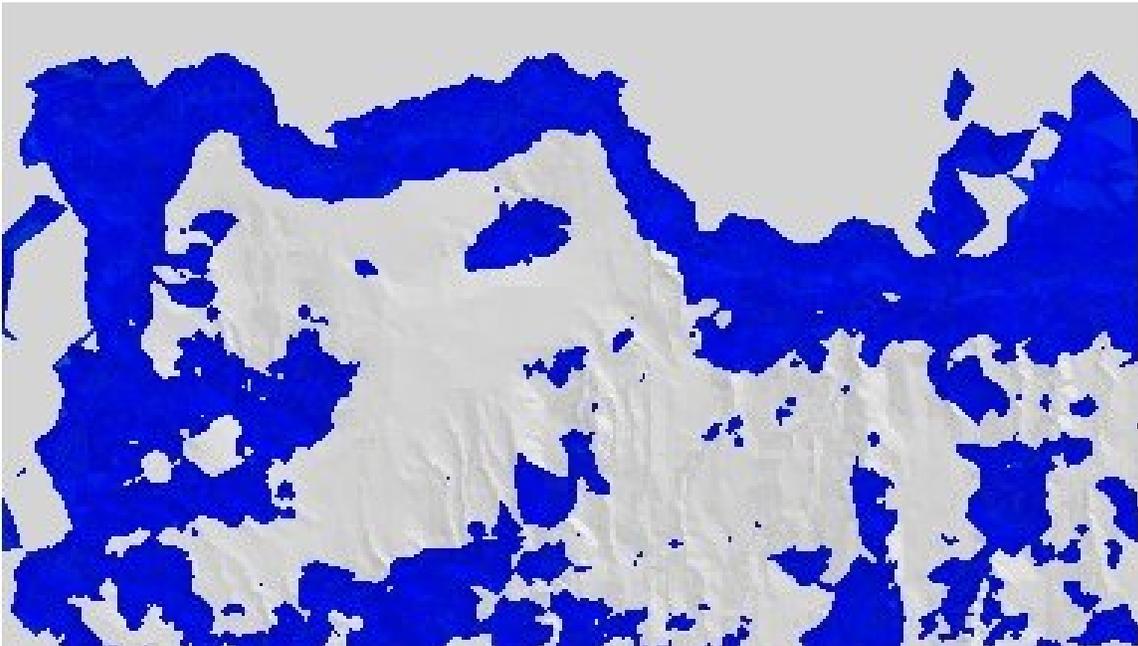


Figura 7: Sensibilidad de τ_2 con $P(\tau_1)$. Zona con valores de sensibilidad por encima de 0,004.

sobre terrenos de orografía compleja de los que se tenga información meteorológica escasa o de poca calidad.

6. Conclusiones

Un aspecto fundamental de los modelos de masa consistente, y que determina su eficiencia, es la estimación de alguno de sus parámetros característicos. Los experimentos realizados demuestran que los resultados son sensibles a los valores elegidos para α , ε , γ y γ' . Se ha propuesto una metodología de estimación basada en algoritmos genéticos, que ha resultado ser eficiente y robusta, y cuya implementación en paralelo la hace competitiva. Se propone también un método para estudiar cómo afecta el refinamiento de la malla 3-D a los parámetros del modelo. Aunque esta hipótesis debe ser confirmada con estudios experimentales posteriores, todo parece indicar que la determinación de las zonas de mayor sensibilidad puede ser de ayuda en la determinación de la localización de estaciones de medida. Este es un aspecto importante en tareas tales como la localización de parques eólicos o la posterior ubicación de los aerogeneradores.

REFERENCIAS

- [1] G. Montero, R. Montenegro y J. Escobar. A 3-D diagnostic model for wind field adjustment. *J. of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics*, Vol. **74–76**, pp. 249–261 (1998).
- [2] E. Rodríguez, G. Montero, R. Montenegro, J. M. Escobar y J. M. González-Yuste. Parameter estimation in a three-dimensional wind field model using genetic algorithms. *Lect. Notes in Comp. Sci.*, Vol. **2329**, pp. 950–959 (2002).
- [3] G. Montero, E. Rodríguez, R. Montenegro, J. M. Escobar y J. M. González-Yuste. Genetic algorithms for an improved parameter estimation with local refinement of tetrahedral meshes in a wind model. *Adv. in Eng. Softw.*, Vol. **36/1**, pp. 3–10 (2004).
- [4] G. Winter, G. Montero, L. Ferragut y R. Montenegro. Adaptive strategies using standard and mixed finite elements for wind field adjustment. *Solar Energy*, Vol. **54(1)**, pp. 49–56 (1995).
- [5] R. Montenegro, G. Montero, J. M. Escobar, E. Rodríguez y J. M. González-Yuste. Tetrahedral mesh generation for environmental problems over complex terrain. *Lect. Notes in Comp. Sci.*, Vol. **2329**, pp. 335–344 (2002).
- [6] A. Businger y S. Arya. Heights of the mixed boundary layer in the stable, stratified planetary boundary layer. *Adv. Geophys.*, Vol. **18A**, pp. 73–92 (1974).
- [7] C. Ratto. *Modelling of Atmospheric Flow Fields*, World Sci., Singapore, chap. An Overview of Mass-Consistent Models, pp. 379–400 (1996).

- [8] C. Sherman. A mass-consistent model for wind fields over complex terrain. *J. Appl. Meteorol.*, Vol. **17**, pp. 312–319 (1978).
- [9] T. Kitada, A. Kaki, H. Ueda y L. Peters. Estimation of vertical air motion from limited horizontal wind data - a numerical experiment. *Atmos. Environ.*, Vol. **17**, pp. 2181–2192 (1983).
- [10] J. A. Businger y S. P. S. Arya. Heights of the mixed layer in the stably stratified planetary boundary layer. *Adv. Geophys.*, Vol. **18A**, pp. 73–92 (1974).
- [11] D. Ross, I. Smith, P. Manins y D. Fox. Diagnostic wind field modelling for complex terrain: Model development and testing. *J. Appl. Meteorol.*, Vol. **27**, pp. 785–796 (1988).
- [12] N. Moussiopoulos, T. Flassak y G. Knittel. A refined diagnostic wind model. *Environ. Software*, Vol. **3**, pp. 85–94 (1988).
- [13] P. Geai. Methode d’interpolation et de reconstitution tridimensionnelle d’un champ de vent: le code d’analyse objective MINERVE. Tech. rep., Electricité de France (1985).
- [14] D. Lalas, M. Tombrou y M. Petrakis. Comparison of the performance of some numerical wind energy siting codes in rough terrain. In *European Community Wind Energy Conference*. Herning, Denmark (1988).
- [15] M. Tombrou y D. Lalas. A telescoping procedure for local wind energy potential assessment. In *European Community Wind Energy Conference*. H.S. Stephens & Associates (1990). Madrid.
- [16] J. Barnard, H. Wegley y T. Hiester. Improving the performance of mass consistent numerical model using optimization techniques. *J. Climate Appl. Meteorol.*, Vol. **26**, pp. 675–686 (1987).
- [17] H. Panofsky y J. Dutton. *Atmospheric Turbulence*. John Wiley, New York (1984).
- [18] C. Ratto. *Modelling of Atmospheric Flow Fields*, World Sci., Singapore, chap. The AIOLOS and WINDS Codes, pp. 421–431 (1996).
- [19] A. de Baas. *Modelling of Atmospheric Flow Fields*, World Sci., Singapore, chap. Scaling Parameters and their Estimation, pp. 87–102 (1996).
- [20] J. Garrat. Observations in the nocturnal boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. **22(1)**, pp. 21–48 (1982).
- [21] D. Levine. *A Parallel Genetic Algorithm for the Set Partitioning Problem*. Ph.D. thesis, Illinois Institute of Technology / Argonne National Laboratory (1994).

- [22] J. Holland. *Adaption in Natural and Artificial Systems*. MIT Press (1992).
- [23] G. Syswerda. Uniform crossover in genetic algorithms. In J. Schaffer, ed., *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann (1989), pp. 2–9.
- [24] D. Whitley. The GENITOR algorithm and selection pressure: Why rank-based allocation of reproductive trials is best. In *Third International Conference on Genetic Algorithms* (1989).
- [25] D. Whitley. GENITOR: A different genetic algorithm. In *Rocky Mountain Conference on Artificial Intelligence* (1988).
- [26] W. Spears y D. K. On the virtues of parametrized uniform crossover. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms* (1991).
- [27] L. Davis. *Handbook of Genetic Algorithms*. Van Nostrand Reinhold, New York (1991).
- [28] J. González-Yuste, R. Montenegro, J. Escobar, G. Montero y E. Rodríguez. Local refinement of 3-D triangulations using object-oriented methods. *Adv. in Eng. Softw.*, Vol. **35**(10–11), pp. 693–702 (2004).