

Introduciendo la dinámica de fluidos computacional en el análisis de flujos en medio poroso

Introducing computational fluid dynamics in the analysis of porous medium flows

Ramón Salcedo
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
ramon.salcedo@upc.edu

Arnau Bayón
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
arbabar@iiama.upv.es

Patricia Chueca
INSTITUTO VALENCIANO DE INVESTIGACIONES AGRARIAS
chueca_pat@gva.es

Abstract

Este trabajo presenta una introducción a la modelización con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de un fluido atravesando un medio poroso. Para ello, se propone un caso práctico mediante la simulación de un flujo de aire producido por el ventilador de un pulverizador hidráulico asistido por aire que atraviesa un medio poroso (la vegetación). El trabajo consiste en dotar de las herramientas necesarias para configurar un modelo CFD para, posteriormente, ajustar la resistencia de la porosidad al paso de la corriente usando datos experimentales. El ajuste contempla tres escenarios: uno, considerando sólo pérdidas inerciales iguales entre los diferentes cuerpos porosos, dos, considerando dichas pérdidas inerciales más las pérdidas viscosas y, tres, considerando sólo pérdidas inerciales diferentes entre los diferentes cuerpos porosos. Finalmente, se comparan las velocidades obtenidas en cada simulación con datos reales, eligiéndose aquella configuración que arroja mayores ajustes. La metodología planteada pretende poner de manifiesto la importancia de usar con criterio los distintos parámetros propios de la configuración de modelos CFD.

This paper presents an introduction about how to model a flow through a porous medium with Computational Fluid Dynamics (CFD). To this end, a case study is proposed by simulating an air current produced by the fan of an air assisted sprayer through a porous medium (vegetation). The work is aimed at adjusting the porosity resistance to the airflow using experimental data. The adjustment assesses three scenarios: one, considering only equal inertial losses between different porous bodies, two, considering both inertial losses and viscous losses and, three, considering only different inertial losses between different porous bodies. Finally, velocities obtained in each simulation are compared with experimental data. The proposed methodology highlights the importance of employing suitable parameters when configuring CFD models.

Keywords: Air current, vegetation, CFD, RANS, k-epsilon.

Palabras clave: Corriente de aire, vegetación, CFD, RANS, k-epsilon.

1. Introducción

El dominio de la mecánica de fluidos es uno de los requisitos fundamentales en muchos campos de la ingeniería (Yamaguchi, 2008). Sin embargo, a pesar de los progresos realizados, todavía se trata de una disciplina complicada de abordar. Esto es debido a que en la gran mayoría de los casos, los ingenieros tienen que trabajar con flujos turbulentos (Davidson, 2015), donde las simplificaciones aplicadas para el ahorro en costes computacionales no siempre gozan de validez.

Para alcanzar resultados satisfactorios en la modelación de flujos turbulentos, se requieren costosos y largos experimentos de laboratorio o de campo hasta llegar a resultados concluyentes. Estos ensayos siempre se ven limitados por el número de puntos de medición, la posición de estos o el carácter intrusivo de los métodos empleados. Además, el número de variables y grados de libertad involucrados es tal que suelen llegar a ser imposibles de controlar.

A modo de herramienta complementaria a las técnicas experimentales, existen los modelos basados en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) (Versteeg y Malalasekera, 2007). Los modelos CFD utilizan métodos numéricos para aproximarse a las complejas ecuaciones que describen los flujos turbulentos. Estos modelos se pueden aplicar a un elevado número de situaciones en ingeniería, tales como termodinámica, flujos bifásicos o transferencia de masa. Los modelos CFD contribuyen al diseño de instalaciones y de dispositivos tecnológicos, así como a la adopción de soluciones rápidas evitando la realización de numerosos y costosos experimentos. La CFD puede predecir las propiedades del fluido y visualizar su comportamiento con gran detalle dentro de un dominio definido.

Un caso típico en CFD es la caracterización de un flujo forzado a pasar por un medio poroso. Cuando un fluido en movimiento atraviesa un medio de estas características, se producen una serie de pérdidas asociadas a la inercia del flujo junto a otras debido a la viscosidad. Este fenómeno tiene especial interés en el estudio de acuíferos subterráneos (Igboekwe y Achi, 2011), yacimientos petrolíferos (Huang et al., 2016) o el diseño de sistemas de drenaje (Jarman et al., 2008).

Un ejemplo de este fenómeno es la aplicación de fitosanitarios en cultivos arbóreos mediante el empleo de pulverizadores asistidos por aire mediante ventiladores axiales (Lee et al., 2013) —Figura 1—. En este caso, las gotas producidas son arrastradas por una corriente de flujo de aire generada por el ventilador en dirección a la vegetación. Cuando la corriente de aire atraviesa el árbol, se produce una caída de presión y una pérdida de energía. Por esa razón, varios autores han considerado la vegetación como un medio poroso a la hora de modelar con CFD los tratamientos fitosanitarios (Da Silva et al., 2006; Endalew et al., 2010). Estos modelos sirven para: 1) estudiar la deposición de los fitosanitarios sobre la vegetación, 2) estimar las posibles pérdidas que se puedan producir hacia la atmósfera y al suelo por deriva y 3) analizar el efecto de determinados parámetros (condiciones de la maquinaria, climatología o tipo de cultivo sobre la eficiencia de la aplicación).

La CFD es una técnica cada vez más impartida en las escuelas técnicas. Destaca su versatilidad, su utilidad práctica y la empleabilidad que confiere a los futuros egresados. El presente trabajo se enmarca en un supuesto práctico a fin de que los alumnos aprendan a modelar una corriente forzada de aire a través de un medio poroso. En este caso, se trata de caracterizar la resistencia vegetal de un naranjo a la corriente de aire durante un tratamiento como si de un cuerpo poroso se tratase. Se pretende que el alumno se familiarice con los diferentes métodos de ajuste de la porosidad. Los resultados son comparados con datos experimentales. De esta



Figura 1: Equipo atomizador arrastrado por un tractor típicamente usado en los tratamientos cítricos en Valencia. La corriente del ventilador trasero orienta las gotas que salen de las boquillas hacia la copa de los árboles.

manera, el alumno puede comprender e interiorizar a su vez los conceptos de calibración y validación de un modelo numérico.

Dicho proceso, generalizable a otros casos de aplicación de desarrollo y validación experimental de modelos numéricos, puede resultar a priori confuso para el alumno, por lo que se desarrolla con detenimiento en las siguientes secciones, siguiendo el diagrama que se muestra en la Figura 2. El primer paso en el empleo de un modelo CFD consiste en un planteamiento previo para saber cómo tratar el problema a simular. Tras ello, el siguiente paso es trazar la geometría del modelo y, a fin de que el software pueda realizar los cálculos pertinentes, discretizarlo en múltiples celdas. Acto seguido, hay que definir todos los parámetros del modelo, además de las condiciones de entrada y salida del dominio analizado, las características de los contornos sólidos, si los hay, y las variables a analizar. Una vez ejecutadas las simulaciones y obtenidos los resultados, se procede al ajuste del modelo. Es decir, sus resultados se someten a comparación con datos de referencia, en este caso, medidas provenientes de ensayos, procediendo a la calibración de parámetros de forma iterativa hasta lograr un buen ajuste entre ambos conjuntos de datos. Una vez el modelo ha sido validado, puede ser utilizado como apoyo para el análisis científico del problema estudiado.

2. Planteamiento del problema

El objetivo es ajustar la resistencia porosa que ofrece la copa de un naranjo cuando la corriente del ventilador de un pulverizador alcanza la vegetación. Para ello, se analizarán las velocidades antes y después de atravesar el cuerpo poroso. La utilidad práctica más inmediata es reproducir el comportamiento de la corriente de aire cuando un cuerpo poroso (p.e. árbol)

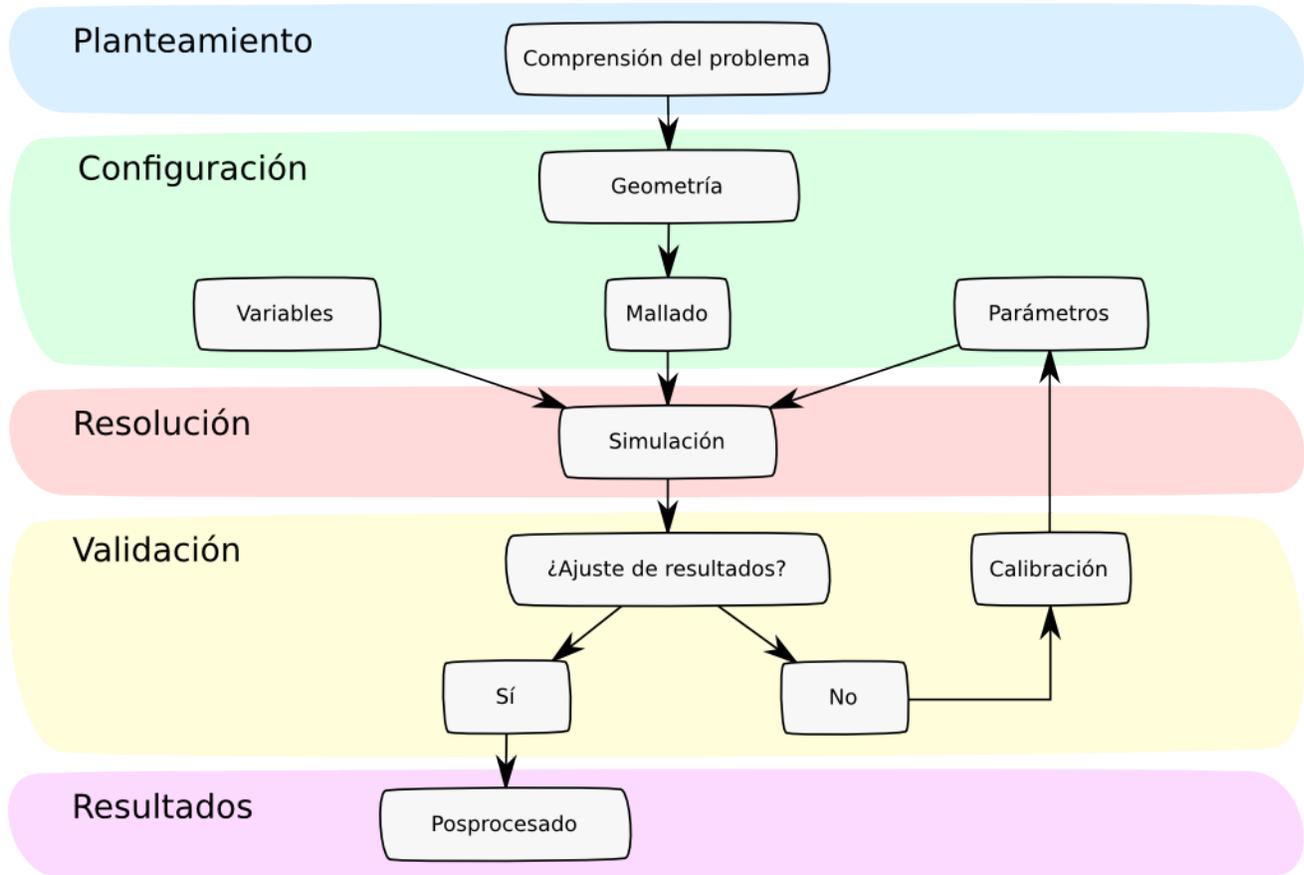


Figura 2: Diagrama de flujo del proceso de trabajo con modelos numéricos y su contraste experimental.

se interpone en su trayectoria, con lo que se puede inferir en la eficiencia de los tratamientos fitosanitarios y las pérdidas que se producen del producto aplicado al medio ambiente.

3. Configuración del modelo

3.1. Obtención de los datos experimentales

El modelo se construye a partir de los datos obtenidos en una parcela comercial de naranjos con un pulverizador hidráulico asistido por aire convencional. La salida de aire estaba alineada con el tronco del árbol (Figura 3). Este experimento está basado en un trabajo de campo realizado por Da Silva et al. (2006) para caracterizar la resistencia aerodinámica de la vegetación en viñedos cuando se emplean este tipo de equipos. Durante dicho ensayo, se midieron las velocidades del aire alrededor del ventilador (postes A y B), así como las velocidades antes y después de atravesar la copa (postes C y D). El poste A medía las velocidades del aire a partir de 0.4 m de altura hasta los 1.8 m, cada 0.2 m. El poste horizontal B, situado a 1.8 m de altura, registró velocidades cada 0.2 m desde el centro del ventilador hasta coincidir con el poste A. Los postes C y D midieron las velocidades cada 0.2 m de altura, desde 0.2 m hasta 3.0 m de altura. En total se tomaron datos en 43 puntos. Todos los puntos de medida estaban alineados en el mismo plano de salida del aire del ventilador.

En el ensayo, sólo se consideró una cara del ventilador como se ha realizado en estudios similares (Da Silva et al., 2006; Endalew et al., 2010). Aunque la distribución de aire en los

ventiladores axiales es asimétrica, los fabricantes reducen esta asimetría mediante la inclusión de deflectores de aire y mejoras en el diseño de sus ventiladores.

La velocidad y dirección del aire en cada punto se midió con un anemómetro de ultrasonidos 3D (WindMaster 1590-PK-020, Gill Instruments Ltd., Hampshire, UK) colocado en posición horizontal sujeto al poste, interfiriendo lo menos posible con la corriente de aire. La precisión fue de 1.5 % con una resolución de 0,01 m/s. En cada punto se registraron durante un minuto las tres componentes de la velocidad, margen de tiempo lo suficientemente largo para que las velocidades captadas representen el régimen estacionario en estas condiciones (Salcedo et al., 2015).

Durante el experimento se registró también la velocidad del viento con un anemómetro de ultrasonidos 2D (WindSonic, Gill Instruments Ltd., Hampshire, UK) situado a 5.0 m de altura sobre la superficie del terreno. El dispositivo fue colocado cerca de la plantación para ser representativo de las condiciones meteorológicas de ésta. Durante el experimento, la velocidad media fue de 0.9 m/s, por debajo del límite de 3.0 m/s indicado para la realización de una buena aplicación de fitosanitarios (BOE, 2012).

Conviene recalcar y transmitir al alumno la necesidad de explicar de forma clara, concisa, contrastable y reproducible las condiciones en las que los datos experimentales fueron obtenidos. Esto adquiere más importancia si se contempla la publicación de los resultados del modelo numérico (en informes técnicos, ponencias o publicaciones científicas).

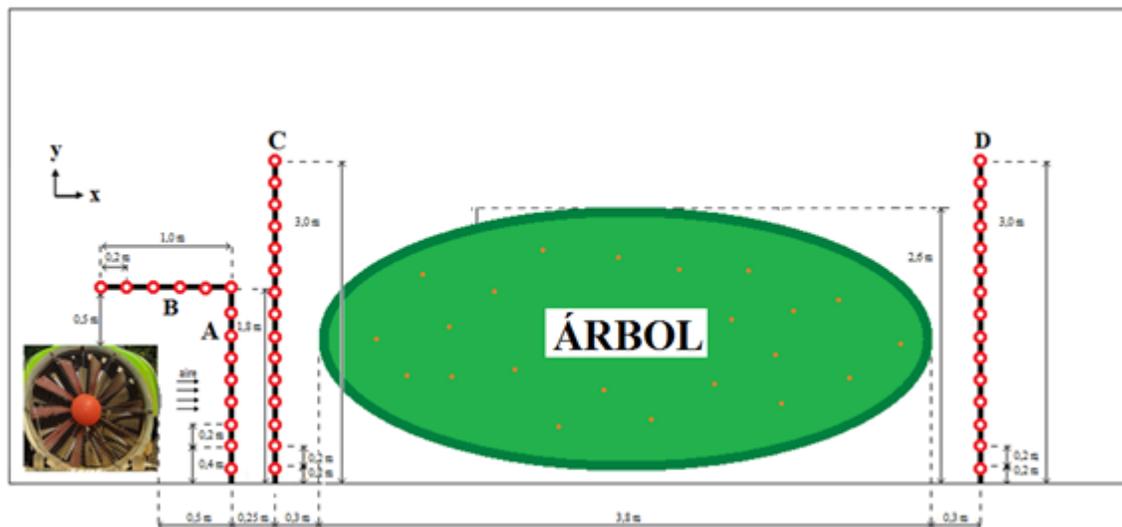


Figura 3: Alzado del esquema del ensayo.

3.2. Definición de la geometría del modelo CFD

A fin de simplificar el fenómeno bajo estudio, se decidió emplear un modelo bidimensional. Se asumió que las velocidades transversales con respecto al plano de observación, descrito en la Figura 3, tienen escasa relevancia en el proceso. El empleo de un modelo bi o tridimensional es, generalmente, la primera decisión a adoptar por el modelador numérico, antes de adentrarse en pormenores geométricos del caso analizado. En cuanto al dominio (Figura 4), se escogió uno de estructura rectangular, dejando un hueco en la esquina inferior izquierda, con una anchura de 19.0 m de largo y 8.0 m de alto, que representa el pulverizador. La entrada de aire se situaba en la esquina inferior izquierda, cuyas dimensiones correspondían a los postes A y B del ensayo

(“air inlet”). El aire podía salir por el resto de límites del dominio (“pressure outlet”), salvo por el límite inferior que correspondía al suelo (“wall”).

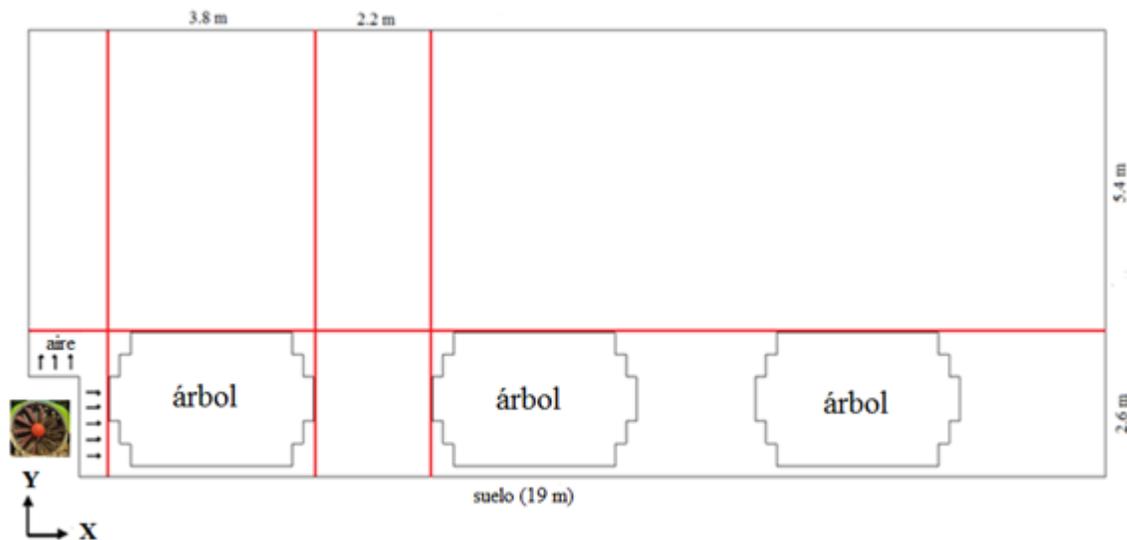


Figura 4: Dominio computacional.

Respecto a la geometría de los árboles, se llevaron a cabo ciertas simplificaciones en aras de la reducción de costes computacionales. Se representaron tres secciones, cuya anchura y altura máxima de cada árbol corresponden a las medidas en el ensayo. La distancia entre cada árbol fue medida en campo. En este trabajo se optó por una primera aproximación del comportamiento de los árboles. Solo se tenía en cuenta la masa foliar sin considerar la presencia del tronco. Aunque la estructura leñosa tiene un papel influyente en la realidad sobre el comportamiento del aire, se han realizado trabajos similares con la misma hipótesis (Da Silva et al., 2006). De este modo, se simplifica el problema y se presenta un caso más sencillo a los alumnos sin incurrir, como se observa más adelante, en grandes imprecisiones.

3.3. Mallado

Las ecuaciones de Navier-Stokes, que gobiernan el movimiento de los fluidos, no tienen solución analítica conocida por lo que es necesario recurrir a la aproximación numérica. Para ello, es menester discretizar el dominio analizado en una gran cantidad de celdas o elementos en los que el modelo aproximará resultados para las variables analizadas. Es importante indicar que el método de generación de dicha malla influirá sobre los resultados de la simulación. Es fundamental un buen diseño de ésta para que los resultados del modelo sean lo más independientes posibles de la malla y que únicamente dependan de las condiciones de contorno y de los parámetros físicos del problema. Generalmente, aunque con excepciones, cuanto mayor sea el número de celdas, mayor será la resolución y, por tanto, mejor la precisión del modelo. No obstante, a mayor número de elementos, mayor capacidad de cálculo es necesaria, siendo a menudo el coste computacional requerido inalcanzable. Por lo tanto, hay que llegar a un compromiso entre la precisión de los resultados y la resolución de la malla.

En términos generales, las mallas pueden clasificarse en dos grandes categorías: estructuradas y no estructuradas. Las mallas estructuradas son aquéllas en las que existe ortogonalidad topológica entre elementos, es decir, donde éstos siguen un patrón de conectividad sistemático, dando pie a una retícula regular. Este tipo de mallas, permiten a los algoritmos numéricos una gestión más rápida de la información, lo que redundará en menores tiempos de cálculo (Keyes et

al., 2000). Además su generación es más rápida, al ser los algoritmos de mado más sencillos y la precisión de los modelos tiende en conjunto a ser mayor (Hirsch, 2007). Por el contrario, las mallas desestructuradas permiten al modelador adaptarse mejor a geometrías complejas (Biswas y Strawn, 1998), a la vez que permiten un refinamiento más selectivo en aquellas regiones del flujo donde se esperen mayores gradientes (Kim y Boysan, 1999), siendo, por tanto, más versátiles que sus contrapartes estructuradas. En el caso de estudio, dada la simplicidad de la geometría analizada, se optó por una malla estructurada de celdas rectangulares.

Respecto al tamaño de celda, varios manuales de buenas prácticas en modelización recomiendan hacer análisis previos de convergencia de malla, es decir, análisis para definir a partir de qué grado de refinamiento de la malla los resultados alcanzan la independencia de ésta. No obstante, dicho análisis supone un volumen de trabajo para el alumno que merece un tratamiento exclusivo, por lo que queda fuera del alcance de este trabajo. Existen publicaciones donde se aborda esta cuestión de forma descriptiva acompañada de ejemplos (Celik et al., 2008). En el caso de estudio, dicho análisis fue llevado a cabo en Salcedo et al. (2015), por lo que, en coherencia con dicho trabajo, se recomienda adoptar directamente celdas de 4 cm de lado en la entrada de aire en el modelo y la zona de los árboles. En esa zona las celdas siguen una distribución uniforme. A partir de los 3.0 m de altura (correspondiente a los postes C y D) y después de los cuerpos porosos, las celdas presentan un crecimiento del 5%. De esta manera, se reduce el tamaño de celda (y se aumentaba la resolución) en las áreas de mayor interés y se compensa el coste computacional con otras áreas donde no se estudia con tanto detalle el flujo del aire o, sencillamente, se esperan gradientes mucho menores (Figura 5).

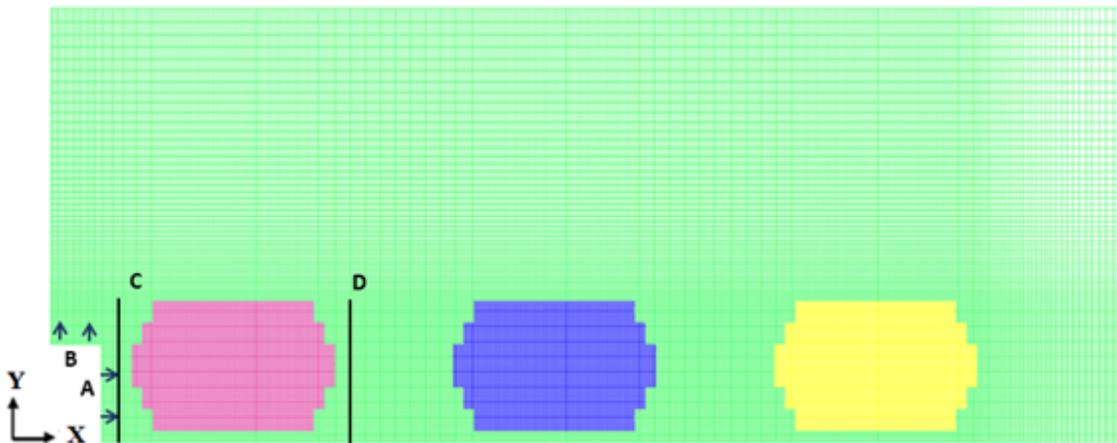


Figura 5: Discretización de la malla y situación sobre el modelo de los postes del ensayo.

3.4. Definición de variables y parámetros

Uno de los principales problemas que afronta la modelación numérica de fluidos es el tratamiento de las variaciones caóticas en las propiedades del flujo. Esto es fruto de la turbulencia, pues éste es un fenómeno inestable, heterogéneo y difícil de caracterizar (Pope, 2001). Para ello, existen modelos de cierre de las ecuaciones de Navier-Stokes, que permiten ajustar el volumen de cálculos a realizar a la capacidad computacional disponible.

En modelado mediante técnicas CFD, el tratamiento de la turbulencia se puede abordar mediante distintos enfoques, como la Direct Numerical Simulation (DNS), la Large Eddy Simulation (LES) o el Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) (Versteeg y Malalasekera, 2007). Queda fuera del alcance de este trabajo describir dichos modelos dada la extensión que éste

tomaría. Para el caso de estudio, se escogió el método RANS que es la técnica más extendida actualmente para problemas de ingeniería en general y de tecnología de la ventilación en particular. Dicha técnica aporta resultados aceptables en casos de estas características con un bajo consumo computacional (Granell, 2014).

Dentro de la tipología RANS, existen diferentes modelos turbulentos para el cierre de las ecuaciones de Navier-Stokes, como el $k - \omega$ (Wilcox, 1998) o el Spalart-Allmaras (Spalart y Allmaras, 1992). En este caso se trabajó con el modelo más utilizado en ingeniería ambiental, el Standard $k - \omega$ (Launder y Spalding, 1972).

El aire para este modelo se consideró incompresible, hipótesis asumible en flujos por debajo del umbral de 100 m/s (Salcedo et al., 2015), isotérmico y newtoniano. Como datos de entrada, se emplearon las velocidades experimentales registradas en los postes A y B.

No se tuvieron en cuenta otras corrientes externas como el viento atmosférico. La influencia del viento sobre la velocidad del aire producido por el pulverizador por debajo o igual a una altura de 3.0 m se supuso despreciable ya que la velocidad del viento en el ensayo fue siempre inferior a 1.5 m/s a los 5.0 m de altura. Georgiadis et al. (1996) y Endalew et al. (2009) indicaron que normalmente se puede suponer dicho efecto nulo por debajo de 1.5 veces la altura de los árboles.

Respecto a la resolución del flujo cercano a la zona de pared (suelo), en este trabajo se decidió modelizarlo como una superficie lisa sin obstáculos. Como función de pared, que son ecuaciones semiempíricas para la caracterización del flujo en la región de contacto con una región sólida, se escogió el modelo de pared estándar propuesto por Launder y Spalding (1974).

Las variables indicadoras de esta simulación fueron las componentes de la velocidad en los puntos de medición correspondientes a los postes C y D del ensayo.

3.5. Reproducción del efecto poroso

Para la realización de las simulaciones es muy importante la manera de representar la naturaleza porosa de la vegetación, que se realiza basándose en la ecuación de Darcy, dividiéndose las pérdidas que se producen entre pérdidas inerciales y viscosas. En este caso se plantearon tres alternativas a simular:

- 1) Considerando sólo las pérdidas inerciales y estimando que éstas son idénticas en los tres cuerpos porosos. Dada la falta de información previa que indique porque valores empezar para ajustar la resistencia porosa del naranjo, se optó por empezar con una resistencia inercial de 10 m^{-1} para cada cuerpo, fruto de estimaciones preliminares basadas en iteraciones previas y la experiencia propia de los modeladores.
- 2) Considerando las pérdidas inerciales y las pérdidas viscosas por igual. Cada cuerpo presentaba una resistencia inercial de 10 m^{-1} y una resistencia viscosa de 10 m^{-2} .
- 3) Considerando sólo las pérdidas inerciales, siendo diferentes en los tres cuerpos porosos. El primer cuerpo presenta una resistencia de 30 m^{-1} y el resto 10 m^{-1} .

Se recomienda llevar a cabo las simulaciones durante, al menos, 500 iteraciones, valor a partir del cual se observa que los valores residuales alcanzan un comportamiento estable y siempre por debajo de 10^{-4} . Llegados a este punto, las simulaciones pueden considerarse convergidas.

Para la comparación entre los datos experimentales y las simulaciones, una posibilidad es la generación de gráficas para cada componente de la velocidad y el cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RMSE), definido en la Ecuación (1):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{a}_i - a_i)^2}{n}}, \quad (1)$$

donde a son los datos reales, \hat{a} son los resultados obtenidos en el modelo y n el número de datos.

Para el ajuste del modelo, se busca que las componentes de la velocidad V_x y V_y de la simulación se aproximen a las respectivas componentes obtenidas en el ensayo. Las simulaciones se consideran validadas si el RMSE es menor de 4.0 y 2.0 m/s, para V_x y V_y respectivamente, por delante del árbol (zona donde las velocidades experimentales son más altas) y de 2.0 y 1.0 m/s detrás de éste. Estos valores se han tomado en base a varias experiencias personales con este tipo de turbomáquinas en campo, donde se ha comprobado que este error entraría dentro de lo asumible en la caracterización de la corriente producida por estas máquinas.

4. Comparación de resultados con datos de ensayo

4.1. Error entre las velocidades experimentales y las simuladas

Antes de comentar con mayor detalle cada una de las simulaciones y tener una estimación de la magnitud de las diferencias entre el ensayo y el modelo, se presenta la Tabla 1 con los RMSE según el caso analizado y la variable indicadora.

	Poste C (antes árbol)		Poste D (después árbol)	
	V_x	V_y	V_x	V_y
Caso 1	3.71	2.84	2.33	0.70
Caso 2	3.71	2.84	2.33	0.70
Caso 3	3.97	5.64	2.18	0.46

Tabla 1: RMSE (m/s) entre los datos experimentales y simulados.

4.2. Caso 1: Sólo pérdidas inerciales e idénticas en los tres cuerpos porosos

En esta primera simulación, cuando la corriente entrante se enfrenta al cuerpo poroso, parte de la corriente procedente de la entrada horizontal B y de la parte alta de la entrada vertical A va directamente hacia la atmósfera (Figura 6). El flujo se desvía de su trayectoria inicial y aumenta su inclinación respecto al suelo, ante la dificultad de circular por el medio poroso, y su velocidad. No obstante, gran parte del flujo proveniente de la entrada A es absorbido por la zona porosa, salvo la corriente procedente de la zona inferior, que pasa por debajo del cuerpo poroso y también sufre una aceleración considerable. A medida que el aire va atravesando los cuerpos porosos disminuye su velocidad, hasta ser próxima a 0 m/s después del tercer árbol. Por lo tanto, al trabajar con pérdidas inerciales, el flujo enfrentado es rápidamente absorbido, perdiendo energía y produciéndose una importante caída de las presiones.

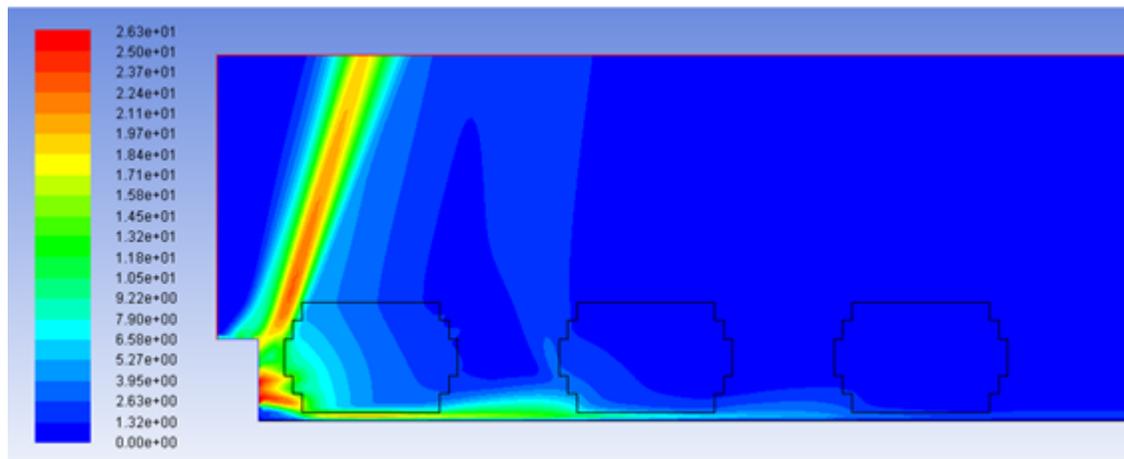


Figura 6: Diagrama del módulo de velocidades del caso 1.

Si se comparan los resultados de la simulación con las velocidades del ensayo antes del árbol (poste C), se observa que, tanto para la componente horizontal de la velocidad (V_x), como para la vertical (V_y), la corriente presenta un comportamiento similar (Figura 6). No obstante, el modelo tiende a subestimar la velocidad horizontal entre 1.0 y 2.0 m, que coincide con la zona donde el cuerpo poroso tiene una mayor longitud. Por otra parte, la velocidad vertical es mayor, conforme aumenta la altura, produciéndose hasta una diferencia de 5 m/s a los 2.0 m. Estas diferencias influyen sobre el RMSE y, pese a que la corriente de aire se comporta de manera en apariencia semejante en el modelo, se obtienen errores de 3.71 m/s y 2.84 m/s para V_x y V_y respectivamente (Tabla 1). Estos errores están por encima del límite permitido para el RMSE.

Si se examinan las velocidades salientes del cuerpo poroso, ambas componentes horizontales decrecen con la altura. Pero los datos experimentales presentan un cambio de signo a partir de 1.2 m de altura, mientras que en la simulación siguen siendo positivos. Este cambio de sentido en el ensayo se interpreta como la formación de un vórtice o reflujo. Además, cabe añadir, de cara a investigaciones futuras, que podría ser interesante para el alumno la caracterización del comportamiento de V_x y V_y mediante curvas de interpolación. En este caso, parece intuirse que la componente horizontal presenta un comportamiento exponencial. No obstante, se deja este punto para próximos trabajos.

Cuando una corriente de aire incide sobre un obstáculo (en este caso la copa) se produce una pérdida de la energía cinética y aumenta la energía potencial, aumentando la presión del aire y generando un gradiente de presión que la corriente no puede vencer. Este gradiente de presión altera la dirección de la corriente y produce una separación del flujo en la capa límite del obstáculo, dando lugar a la formación de los vórtices.

La componente vertical de la velocidad en el ensayo presenta valores negativos de entre -0.5 y -0.1 m/s, observándose que el vórtice experimental es de sentido antihorario. Sin embargo, en la simulación todos los valores de V_y también son positivos. Por tanto, el modelo no es capaz de reproducir la misma estructura turbulenta que en el ensayo y, por tanto, requiere un nuevo ajuste.

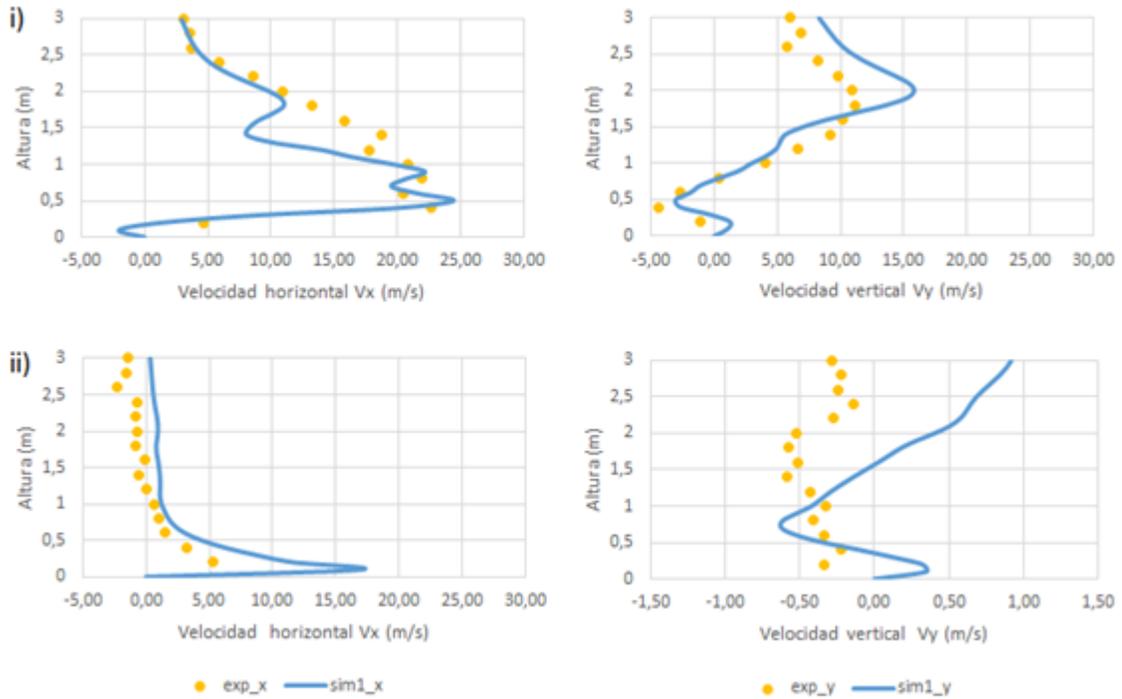


Figura 7: Velocidades horizontales y verticales del caso 1 (sim1) frente a los datos experimentales (exp) antes (i) y después (ii) de atravesar el cuerpo poroso.

4.3. Caso 2: Pérdidas inerciales y viscosas

En la segunda simulación, el modelo presenta un comportamiento idéntico al primer caso (Figura 8), hasta tal punto que los resultados obtenidos entre ambas simulaciones se solapan y no es posible distinguirlos (Figura 9), así como los RMSE son los mismos que en el caso anterior (Tabla 1). Esto significa que la inclusión de las pérdidas por viscosidad no influye significativamente, al menos, en este caso. Esto es debido a que las velocidades iniciales son del rango 25 – 30 m/s, lo suficientemente altas como para que las pérdidas por viscosidad sean casi despreciables. En cualquier caso, se observa que el modelo sigue sin ser capaz de reproducir las mismas estructuras turbulentas a la salida del cuerpo poroso.

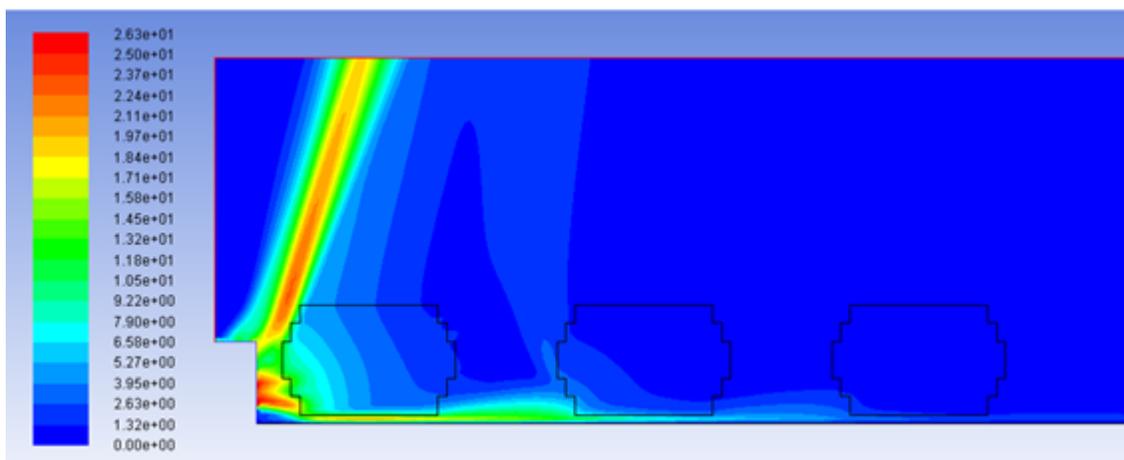


Figura 8: Diagrama del módulo de velocidades del caso 2.

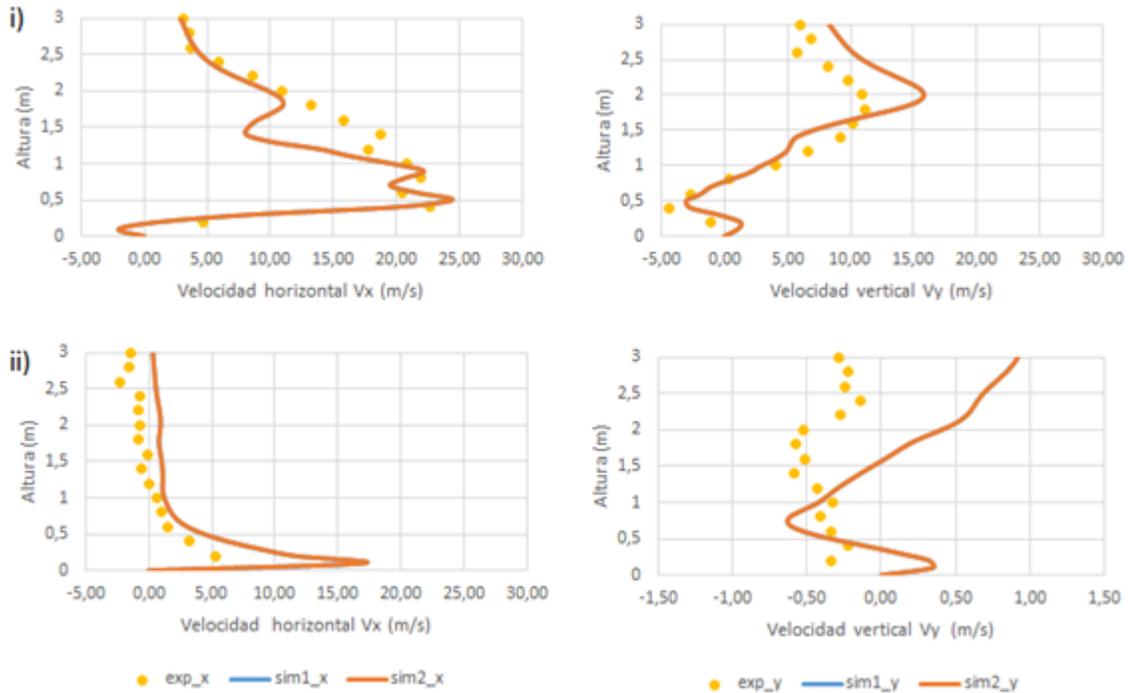


Figura 9: Velocidades horizontales y verticales del caso 2 (sim 2) frente a los datos experimentales (exp) antes (i) y después (ii) de atravesar el cuerpo poroso.

4.4. Caso 3: Sólo pérdidas inerciales y diferentes en los tres cuerpos porosos

Al aumentar la resistencia, el efecto del primer cuerpo poroso sobre la corriente de aire observado en el caso 1 también se amplifica (Figura 10). El flujo entrante en el medio poroso se disipa de manera más intensa, mientras que la velocidad es más grande por debajo y por encima del cuerpo.

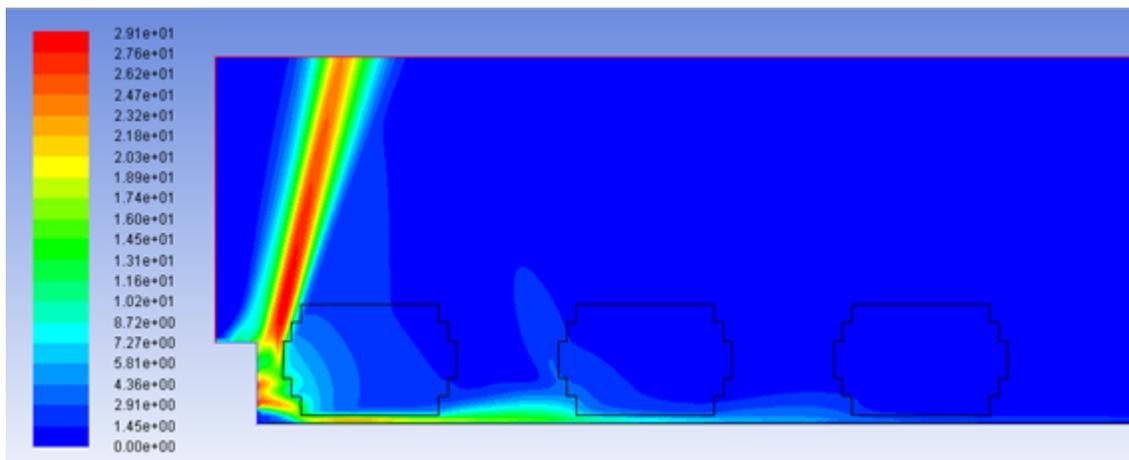


Figura 10: Diagrama del módulo de velocidades del caso 3.

Cuando se observan las velocidades antes del cuerpo poroso, las diferencias en la componente vertical son mayores con los datos experimentales respecto a las otras dos simulaciones, tal y como reflejan los errores de la Tabla 1. La corriente que va hacia la atmósfera presenta un módulo mayor y esto afecta sobre todo a la componente V_y . También se incrementan las diferencias con

los datos del ensayo en la componente horizontal. Al ocurrir esto también en los casos anteriores, cabe apuntar como causa que la geometría elegida en el modelo para representar el árbol no sea la adecuada o que las condiciones iniciales deban ser reevaluadas.

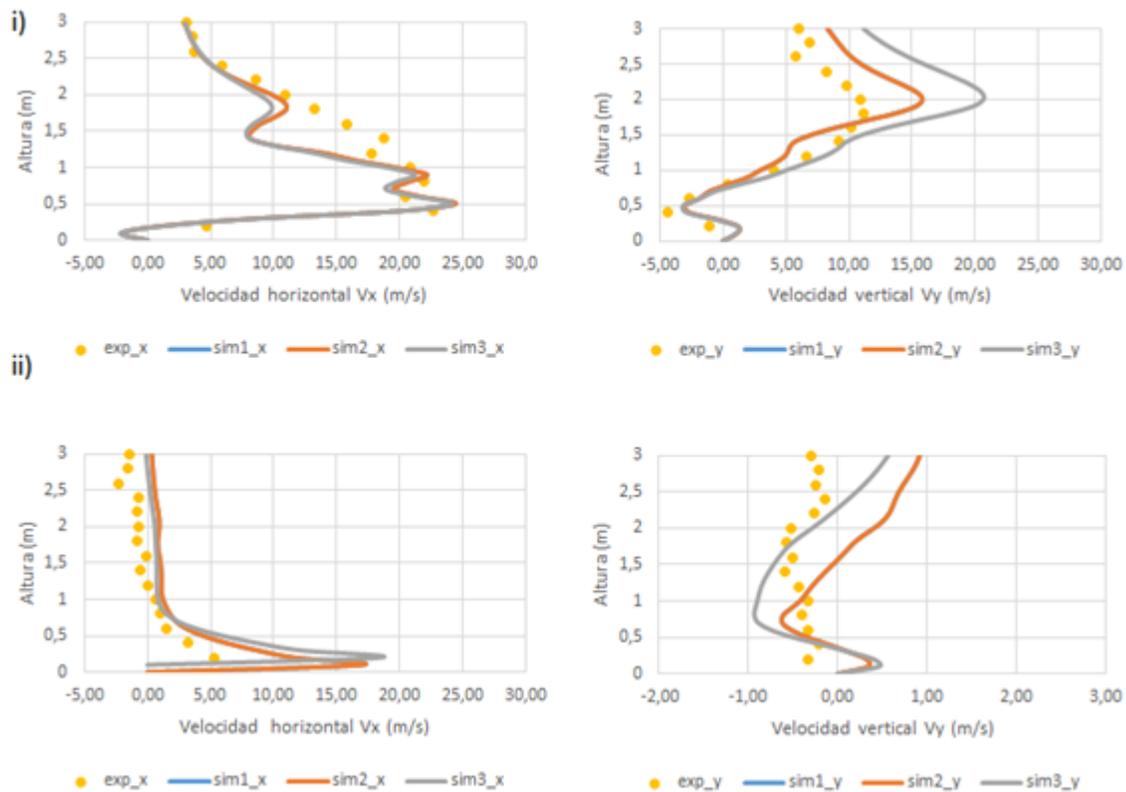


Figura 11: Velocidades horizontales y verticales del caso 3 (sim 3) frente a los datos experimentales (exp) antes (i) y después (ii) de atravesar el cuerpo poroso.

En cuanto a las velocidades después de atravesar el cuerpo poroso (Figura 11), la componente horizontal simulada ya presenta una componente negativa a partir de los 2.5 m de altura. La componente vertical del modelo también está más próxima a los datos experimentales en un rango entre 0.5 y 2.0 m de altura. Esto se refleja al pasar de 0.70 m/s a 0.46 m/s en la Tabla 1, lo que quiere decir que, al aumentar la resistencia, el modelo reproduce el vórtice detectado en los datos del ensayo de manera más próxima. A pesar de ello, los resultados aún están lejos de reproducir lo que ocurre en la realidad, por lo que se debería seguir probando de forma iterativa diferentes valores de los parámetros relativos a la porosidad hasta dar con el que mejor resultados arroje.

5. Conclusiones

En el presente trabajo, se plantea un caso de estudio a fin de que el estudiante aprenda y se familiarice con diferentes aspectos relacionados con el modelado CFD aplicado a la estimación de la porosidad y la resistencia al paso de un flujo de aire a través de un medio poroso, lo que constituye un caso práctico del campo de la ingeniería ambiental.

Por su importancia en el modelado numérico de fluidos, se hace especial hincapié en algunos conceptos básicos, como el diseño del modelo, la generación de la malla y la elección de las condiciones de contorno. También se ha desarrollado el concepto de validación con datos experi-

mentales y, en el caso de estudio planteado, se observa que dicha validación no se alcanza, por lo que es sólo el principio de un proceso iterativo consistente en ajustar la resistencia con nuevas simulaciones. Además, se concede especial importancia a la utilización de datos experimentales para el diseño y validación del modelo, haciendo ver al estudiante que la validación experimental, así como su adecuada descripción, constituye un proceso indispensable en la puesta a punto de cualquier modelo matemático riguroso.

Referencias

-  Biswas R., Strawn R. C. (1998). *Tetrahedral and hexahedral mesh adaptation for CFD problems*. Applied numerical mathematics, 26, 135–151.
-  Celik I. B., Ghia U., Roache P. J., Freitas C. J., Coleman H., Raad P. E. (2008). *Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications*. Journal of fluids engineering, 130 (7), 1–4.
-  Davidson P. A. (2015). *Turbulence: an introduction for scientists and engineers. (2nd ed.)* Oxford, United Kingdom: Oxford University Press.
-  Da Silva A., Sinfort C., Tinet C., Pierrat D., Huberson S. (2006). *A Lagrangian model for spray behaviour within vine canopies*. Journal of aerosol science, 37(5), 658–674.
-  Endalew A. M., Debaer C., Rutten N., Vercammen J., Delele M. A., Ramon H., Nicolai B. M., Verboven P. (2010). *A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying. Part I. Model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow*. Computers and electronics in agriculture, 71(2), 128–136.
-  Li C., Huang Q., Yan S., Huang T. (2016). *Parametric CFD studies on erosion in 3D double elbow*. International Journal of engineering systems modelling and simulation, 8(4), 264–272.
-  Granell R. (2014). *Análisis del flujo ambiental y propuesta metodológica para simulaciones CFD aplicadas a la ventilación natural de invernaderos*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia (España).
-  Hirsch C. (2007). *Numerical computation of internal and external flows: the fundamentals of computational fluid dynamics. (1st ed.)* Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann.
-  Jarman D. S., Faram M. G., Butler D., Tabor G., Stovin V. R., Burt D., Throp E. (2008). *Computational fluid dynamics as a tool for urban drainage system analysis: A review of applications and best practice*. 11th International Conference on Urban Drainage, 31 August - 5 September 2008, Edinburgh, Scotland.

-  Keyes D., Ecer A., Satofuka N., Fox P., Periaux J. (2000). *Parallel Computational Fluid Dynamics' 99: Towards Teraflops, Optimization and Novel Formulations. (1st ed.)* Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
-  Kim S. E., Boysan, F. (1999). *Application of CFD to environmental flows.* Journal of Wind engineering and industrial aerodynamics, 81, 145–158.
-  Launder B. E., Spalding D. B. (1972). *Lectures in Mathematical Models of Turbulence. (1st ed.)* London, United Kingdom: Academic Press.
-  Launder B. E., Spalding D. B. (1974). *The numerical computation of turbulent flows.* Computer methods in applied mechanics and engineering, 3 (2), 269–289.
-  Lee I. B., Bitog J. P. P., Hong S. W., Seo I. H., Kwon K. S., Bartzanas T., Kacira M. (2013). *The past, present and future of CFD for agro-environmental applications.* Computers and electronics in agriculture, 93, 168–183.
-  Magnus U. I., Achi N. J. (2011). *Finite difference method of modelling groundwater flow.* Journal of water resource and protection, 3(3), 192-198.
-  Pope S. B. (2001). *Turbulent flows. (11th edition)* Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
-  Salcedo R., Granell R., Palau G., Vallet A., Garcerá C., Chueca P., Moltó E. (2015). *Design and validation of a 2D CFD model of the airflow produced by an airblast sprayer during pesticide treatments of citrus.* Computers and Electronics in Agriculture, 116, 150–161.
-  Spalart P. R., Allmaras S. R. (1992). *A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows.* AIAA Paper 92-0439.
-  Versteeg H. K., Malalasekera W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method.* Upper Saddle River, United States: Pearson Education.
-  Yamaguchi H. (2008). *Engineering fluid mechanics (Vol. 85). (1st ed.)* Berlin, Germany: Springer Science & Business Media.

Modelling in Science Education and Learning
<http://polipapers.upv.es/index.php/MSEL>