

Universidad de Almería
Escuela Superior de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Rural



Tesis Doctoral

***Simulación y modelación de la ventilación en
invernaderos de Almería mediante la utilización
de Dinámica Computacional de Fluidos***

Doctorando: **Ing. Agr. Francisco Domingo MOLINA AIZ**

Directores: **Dr. Ing. Agr. Diego Luís VALERA MARTÍNEZ**
Dra. Ing. Agr. Ana Araceli PEÑA FERNÁNDEZ
Dr. Ing. Agr. Jesús Antonio GIL RIBES

Almería, Septiembre de 2010

Molina-Aiz F.D., 2010.- *Simulación y modelación de la ventilación en invernaderos de Almería mediante la utilización de Dinámica Computacional de Fluidos*. Tesis Doctoral. Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Almería, Almería, 868 pp.

Resumen

La mejora de los diseños estructurales y de las estrategias de control climático en los invernaderos requiere la modelización del proceso de ventilación. Con el objetivo de avanzar en el conocimiento de la influencia de los distintos factores de diseño en la ventilación de los invernaderos de tipo Almería, se ha desarrollado un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Para ello se ha utilizado el programa comercial ANSYS/FLOTRAN v6.1-12.0 basado en el Método de Elementos Finitos (MEF) proporcionando una descripción bidimensional estacionaria del microclima del invernadero (patrón de flujo de aire y distribución de temperatura). El flujo de aire a través de las mallas anti-insectos y el cultivo fue descrito en el modelo de CFD a través de una aproximación a medios porosos. Las mallas anti-insectos fueron modeladas mediante sus propiedades aerodinámicas, permeabilidad K_p y factor inercial Y , medidas experimentalmente. El efecto de resistencia aerodinámica producido por el flujo de aire a través del cultivo puede ser modelado como una función de la densidad de área foliar y el coeficiente de arrastre, C_D .

Para obtener los parámetros aerodinámicos necesarios para su modelación, se evaluó la resistencia al flujo de aire de las mallas anti-insectos del invernadero mediante dos procedimientos diferentes: un túnel de viento de baja velocidad y simulaciones de CFD. En el primer sistema, el aire fue forzado a pasar a través de una muestra de ensayo para crear una caída de presión. El segundo análisis se realizó mediante simulaciones numéricas del flujo de aire a través de un poro de una malla anti-insectos utilizando el mismo programa comercial de dinámica de fluidos ANSYS/FLOTRAN, que fue empleado para el modelo global del invernadero. Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que se puede utilizar una ecuación basada en el espesor e_m , en las propiedades aerodinámicas (permeabilidad K_p y factor inercial Y) de la malla y el número de Reynolds Re_p para calcular su coeficiente de caída de presión, $F_\varphi = 2 \cdot e_m \cdot K_p^{0.5} \cdot (Re_p^{-1} + Y)$.

El túnel de viento también fue utilizado para determinar el coeficiente de resistencia aerodinámica C_D de siete cultivos hortícolas. Para cada cultivo se ensayaron tres muestras con diferentes valores de densidad de área foliar. Los valores de C_D obtenidos para tomate, pimiento, berenjena, judía, calabacín, melón y calabaza fueron 0.26, 0.23, 0.23, 0.22, 0.25, 0.21 y 0.22, respectivamente. Los coeficientes de resistencia aerodinámica encontrados disminuyen con la velocidad y permanecen prácticamente constantes para números de Reynolds superiores a 6×10^4 . El coeficiente de resistencia permite caracterizar el comportamiento aerodinámico de los cultivos, aunque la utilización de un valor constante conlleva un error significativo (15-30%) para las velocidades que se suelen producir en el interior de los invernaderos ($0.1-0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Los valores máximos de C_D se obtuvieron para velocidades entre 0.5 y $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ debido a los efectos del cambio de posición de las hojas y de variación del régimen de flujo.

El modelo final de CFD fue comparado para su validación con datos experimentales obtenidos en 8 ensayos en un invernadero a escala real (4 con cultivo dentro y 4 sin cultivo). Los ensayos se desarrollaron en un invernadero tipo Almería en «raspa y amagado» de 5

módulos equipado con ventanas laterales y cenitales. La temperatura y la velocidad del aire fueron medidas en 22 puntos dentro del invernadero. La velocidad del aire fue medida con un anemómetro omni-direccional de bulbo caliente y visualizada mediante una técnica de generación de humo, y la temperatura fue medida con sensores-registradores autónomos fijos. En los ocho casos analizados el aire entraba por las ventanas laterales y salía del invernadero por la ventana cenital. La distribución de temperatura muestra un gradiente desde los laterales hacia el centro del invernadero debido al movimiento del aire caliente que se eleva hasta la ventana cenital central, y un gradiente vertical debido al movimiento del aire sobre la superficie del suelo caliente al absorber energía solar. La máxima velocidad del aire dentro del invernadero se produjo junto a las ventanas laterales, con los menores valores medidos en el medio del invernadero. La disminución de velocidad producida en la ventana de barlovento entre el viento exterior y el aire en el interior del invernadero fue del 75-85% en todos los casos. La velocidad del aire en la parte de sotavento permaneció más o menos constante alrededor de $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, como resultado del «efecto chimenea». Los resultados de las simulaciones concuerdan cualitativamente bien con las medidas experimentales. El modelo también fue cuantitativamente validado comparando los resultados numéricos con datos experimentales. Se obtuvieron errores cuadráticos medios (RMSE) entre 2 y 2.9°C y entre 0.13 y $0.27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para la temperatura y la velocidad del aire, respectivamente.

El nivel de refinado de la malla numérica (71984 elementos) y el tamaño del dominio de cálculo ($25 \text{ m}\times 120 \text{ m}$) fueron escogidos después de su comparación con una malla más densa (102517 elementos) y un dominio más grande ($40 \text{ m}\times 120 \text{ m}$) que disminuían la precisión del modelo en comparación con los datos experimentales correspondientes al invernadero vacío. También se ensayaron tres modelos de turbulencia, el $\kappa\text{-}\epsilon$ estándar, el del grupo de re-normalización (RNG) y el de transporte por esfuerzo cortante (SST), con similar precisión en las simulaciones. Finalmente, se ha analizado el efecto en los resultados de diferentes tipos de condiciones de contorno: el perfil de velocidad del viento en la entrada del flujo de aire (logarítmico o velocidad uniforme), las condiciones del flujo en la parte superior del dominio (presión de salida o simetría) y las temperaturas en la cubierta y el suelo del invernadero (uniforme en el invernadero o diferentes en cada módulo).

Hasta ahora se han publicado muy pocos trabajos en los que se haya utilizado el programa ANSYS/FLOTTRAN basado en el MEF, mientras que el programa ANSYS/FLUENT, basado en el Método de los Volúmenes Finitos (MVF), es ampliamente utilizado como código de CFD en trabajos de investigación sobre ventilación. Para evaluar la eficiencia de los dos métodos de discretización como algoritmos de solución de CFD para la simulación de la ventilación natural en invernaderos, se han comparado las simulaciones realizadas con los dos programas con los datos experimentales para los 4 casos correspondientes al invernadero Almería vacío. Se ha analizado la posibilidad de repetición de las simulaciones con los dos métodos de discretización y programas comerciales. La capacidad de cálculo de las dos aproximaciones numéricas se ha analizado comparando el espacio total de la base de datos necesaria para almacenar los modelos numéricos junto con el tiempo de cálculo en CPU para calcular una iteración en el proceso de convergencia. Como media, para el modelo analizado, el MEF requiere un 37% menos de tiempo de

cálculo por elemento e iteración que el MVF, mientras que la cantidad de memoria necesaria fue aproximadamente 10 veces mayor para el MEF.

El modelo de CFD fue utilizado tras su validación para evaluar el efecto de diferentes parámetros que influyen en la ventilación de los invernaderos, con el objetivo de recomendar los mejores diseños a los agricultores y fabricantes de invernaderos. Los parámetros estudiados en las diferentes simulaciones fueron: anchura y número de módulos del invernadero, superficie de ventilación, localización y tipo de las ventanas, presencia de mallas anti-insectos con diferentes porosidad e incidencia de las plantas. Se consideraron dos tipos de ventanas cenitales, enrollables y abatibles. También fueron analizadas tres configuraciones para las ventanas laterales: una ventana enrollable de 0.75 m de altura situada de 0.15 a 0.90 m sobre el suelo, una ventana situada entre 0.90 y 1.65 m y una ventana de 1.5 m de altura localizada a 0.15 m.

Fue observada una reducción en la tasa de ventilación entre el 50 y 88% (en aumento con la velocidad) cuando aumentaba el número de módulos de 1 a 5, como consecuencia del incremento de la anchura (9 a 45 m). El uso de mallas anti-insectos disminuye alrededor de un 50% la velocidad de paso del aire a través de las ventanas laterales, y por lo tanto la tasa de ventilación. El análisis de regresión de las tasas de ventilación simuladas G_{CFD} indica que los resultados se pueden ajustar a un modelo lineal ($\Delta G_{CFD} [\%] = 2.37575 \cdot v_R [m \cdot s^{-1}] - 47.8497 \cdot \phi + 36.1154$ con $R^2 = 0.442$) para describir la relación estadísticamente significativa entre la reducción del caudal de ventilación ΔG_{CFD} (con respecto a un invernadero sin malla), la velocidad del viento v_R y la porosidad de la malla ϕ . La presencia de un cultivo dentro del invernadero causa un efecto de laminación del flujo de aire y reduce la velocidad del aire a nivel del suelo, mientras que la velocidad del aire es mayor en la zona sobre el cultivo.

La configuración de las aperturas de ventilación afecta al flujo de aire, a la tasa de ventilación y a la distribución de la temperatura del aire en el invernadero. Los resultados muestran que las máximas tasas de ventilación se consiguen cuando se abren a la mitad la ventana cenital y las ventanas laterales enrollables están totalmente abiertas. Las mínimas tasas fueron predichas cuando las ventanas laterales estaban parcialmente cerradas. En el caso del invernadero analizado y para las cuatro configuraciones de ventanas simuladas se ha obtenido una correlación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 99% entre la velocidad del viento v_R y la superficie de ventilación lateral S_{VL} (p -valor=0.0025) con la tasa de ventilación del invernadero: $R [h^{-1}] = 13.7877 \cdot v_R [m \cdot s^{-1}] + 0.556455 \cdot S_{VL} [m^2] - 40.6668$ ($R^2 = 0.835$). Los resultados predichos con CFD indican que un invernadero Almería con cinco ventanas cenitales abatibles abiertas a sotavento y dos ventanas laterales puede conseguir mayores tasas de intercambio de aire que con las ventanas abatibles abiertas a barlovento.

Finalmente, las tasas de ventilación simuladas para todos los casos estudiados han sido comparadas con las predichas mediante diferentes modelos derivados de la ecuación de Bernoulli. Con este objetivo se calcularon los coeficientes de efecto eólico del invernadero experimental tipo Almería a partir de medidas directas del flujo de aire en las ventanas mediante anemometría omni-direccional y sónica tridimensional. Para el modelo que solo

considera el efecto del viento, el coeficiente de eficiencia obtenido fue $E_v = C_d \cdot C_v^{0.5} = 0.107$ y se redujo a $E_v = 0.050$ cuando la ventana cenital central fue remplazada por dos ventanas cenitales con menor superficie. Los valores de los coeficientes eólicos medio y turbulento fueron $C_v = 0.159$ y $C_v' = 0.027$, respectivamente. En el invernadero con dos ventanas cenitales más pequeñas estos coeficientes fueron $C_v = 0.066$ y $C_v' = 0.029$. Los coeficientes de descarga debido a la presencia de mallas anti-insectos en el invernadero ($C_{d,\phi} = 0.152-0.278$) fueron calculados a partir de medidas en túnel de viento, obteniendo un valor medio del coeficiente de descarga de $C_d = 0.265$. El uso de mallas anti-insectos en las aperturas puede causar una reducción de C_d de aproximadamente el 71% y consecuentemente del coeficiente de eficiencia E_v . Un viento perpendicular al eje del invernadero produce un flujo de entrada por las ventanas laterales y salida por la ventana cenital. En términos cualitativos, este patrón de flujo de aire concuerda con las simulaciones de CFD.

La mejor concordancia entre las tasas de ventilación simuladas con CFD, G_{CFD} , para las 72 situaciones analizadas en el invernadero Almería (12 configuraciones con 6 velocidades de viento) y las calculadas con los modelos, G_M , fue obtenida para el modelo que considera la distribución de presión resultante como la suma de los campos de presión debidos a los efectos de flotabilidad y del viento. Generalmente, los valores del caudal de ventilación deducidos de las simulaciones de CFD eran un 40% mayores que los calculados con los coeficientes C_d y C_v obtenidos de las medidas experimentales. Los coeficientes de efecto eólico fueron deducidos de las velocidades experimentales promediadas sobre el periodo de medida y por lo tanto despreciando la parte turbulenta, mientras que los valores estimados por el modelo de CFD incluyen la parte turbulenta, aún cuando el modelo $k-\epsilon$ utilizado es una aproximación grosera de la realidad. Además, los coeficientes se obtuvieron con cultivo dentro de los invernaderos mientras que las simulaciones se hicieron mayoritariamente en invernaderos vacíos. Cuando se añade el caudal de ventilación turbulento G' se obtiene una buena concordancia global, con los resultados ajustándose a un modelo lineal $G_{CFD} = 1.00 \cdot (G_M + G')$ con $R^2 = 0.854$ y con una relación estadísticamente significativa entre G_{CFD} y $G_M + G'$ a un nivel de confianza del 99%.

Résumé

L'amélioration des dessins structuraux et des stratégies de contrôle climatique dans les serres requiert la modélisation du processus de ventilation. Dans l'objectif d'approfondir l'influence des différents facteurs de dessin pour la ventilation des serres de type Almeria, il a été développé un modèle de Dynamique des Fluides Computationnelle (CFD). Pour cela on a utilisé le code commercial ANSYS/FLOTRAN v6.1-12.0 fondé sur la Méthode d'Éléments Finis (MEF) proportionnant une description bidimensionnelle stationnaire du microclimat de la serre (champ de vitesse et distribution de température). Le flux d'air à travers les filets anti-insectes et la végétation de la culture fut décrit dans le modèle de CFD à travers une approche des milieux poreux. Les filets anti-insectes furent modélisés grâce à leurs propriétés aérodynamiques, la perméabilité K_p et le facteur inertiel Y , mesurés de façon expérimentale. L'effet de résistance aérodynamique produit par le flux d'air à travers la culture peut être modélisé comme une fonction de la densité de surface foliaire et du coefficient de perte de charge, C_D .

Pour obtenir les paramètres aérodynamiques nécessaires pour sa modélisation, on a évalué la résistance à l'écoulement d'air des filets anti-insectes de la serre grâce aux deux procédés différents: un tunnel de vent à petite vitesse et des simulations de CFD. Dans le premier système, l'air fut forcé à passer à travers un échantillon d'essai pour créer une perte de pression. La deuxième analyse fut réalisée grâce aux simulations numériques de l'écoulement d'air à travers un pore d'un filet anti-insectes utilisant le même code commercial de dynamique des fluides ANSYS/FLOTRAN qui fût employé pour le modèle global de la serre. Les résultats obtenus pour cette étude suggèrent qu'on peut utiliser une équation fondée sur l'épaisseur e_m , sur les propriétés aérodynamiques (perméabilité K_p et facteur inertiel Y) du filet et le nombre de Reynolds Re_p pour calculer son coefficient de perte de charge, $F_\varphi = 2 \cdot e_m \cdot K_p^{0.5} \cdot (Re_p^{-1} + Y)$.

Le tunnel de vent fut aussi utilisé pour déterminer le coefficient de résistance aérodynamique C_D de sept cultures horticoles. Pour chaque culture, nous avons fait des essais avec trois échantillons et des valeurs différentes de densité de surface foliaire. Les valeurs de C_D obtenus pour la tomate, le poivron, l'aubergine, le haricot, la courgette, le melon et la courge furent respectivement 0.26, 0.23, 0.23, 0.22, 0.25, 0.21 et 0.22. Les coefficients de résistance aérodynamique trouvés diminuent avec la vitesse et ils restent pratiquement constants pour les valeurs de Reynolds supérieures à 6×10^4 . Le coefficient de résistance permet de caractériser le comportement aérodynamique des cultures, bien que l'utilisation d'une valeur constante suppose d'avoir une erreur significative, 15-30%, pour les vitesses que l'on obtient au milieu des serres ($0.1-0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Les valeurs maximales de C_D furent obtenues pour des vitesses entre 0.5 et $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à cause des effets du changement de position des feuilles et de la variation du régime d'écoulement.

Le modèle final de CFD fut comparé pour sa validation avec des données expérimentales obtenues sur 8 essais dans une serre à l'échelle réelle (4 avec une culture dedans et 4 sans culture). Les essais se développèrent dans une serre type Almeria en «*raspa y amagado*» de 5 chapelles équipée de fenêtres latérales et en toiture. La température et la vitesse de

l'air furent mesurées en 22 points dans la serre. La vitesse de l'air fut mesurée avec un anémomètre omni-directionnel de bulbe chaud et elle fut visualisée grâce à une technique de génération de fumée. La température fut mesurée avec des capteur-enregistreurs autonomes fixes. Dans les huit cas analysés l'air entrainé par les fenêtres latérales et il sortait de la serre par la fenêtre du toit prêt du faîtage. La distribution des températures montre un gradient thermique depuis les latéraux vers le centre de la serre à cause du mouvement de l'air chaud qui s'élève jusqu'à la fenêtre centrale en toiture, et un gradient vertical à cause du mouvement de l'air sur la surface du sol chaud par l'absorption d'énergie solaire. La vitesse de l'air maximale dans la serre se produit près des fenêtres latérales, avec les plus faibles valeurs mesurées au milieu de la serre. La diminution de la vitesse qui se produit près de la fenêtre orientée face au vent, entre le vent extérieur et l'air intérieur fut de 75-85% dans tous les cas. La vitesse de l'air dans la partie opposée au vent resta plus ou moins constante et d'environ $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, comme résultat de «l'effet de cheminée». Les résultats des simulations sont en accord avec les mesures expérimentales. Aussi le modèle fut quantitativement validé en comparant les résultats numériques avec données expérimentales. Pour la température et la vitesse de l'air, respectivement, on obtint des erreurs quadratiques moyennes (MSE) entre 2 et 2.9°C et entre 0.13 et $0.27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Le niveau de raffinement du maillage numérique (71984 éléments) et la taille du domaine de calcul ($25 \text{ m}\times 120 \text{ m}$) furent choisis après sa comparaison avec une maille plus dense (102517 éléments) et un domaine plus grand ($40 \text{ m}\times 120 \text{ m}$) qui diminuaient la précision du modèle en comparaison avec les données expérimentales correspondantes à la serre vide. Nous avons également fait des essais avec trois modèles différents de turbulence, le $k-\epsilon$ standard, celui du groupe de re-normalisation (RNG) et celui de transport par effort coupant (SST), avec une similaire précision dans les simulations. En dernier lieu, nous avons analysé l'effet sur les résultats dans des différents types de conditions aux limites: le profil de la vitesse du vent dans l'entrée de l'écoulement d'air (logarithmique ou vitesse uniforme), les conditions de l'écoulement dans la partie supérieure du domaine (pression de sortie ou symétrie) et les températures dans la toiture et le sol de la serre (uniforme dans la serre ou différents dans chaque chapelle).

Jusqu'à aujourd'hui très peu de travaux, ayant utilisé le logiciel ANSYS/FLOTRAN fondé sur le MEF ont été publiés, tandis que le programme ANSYS/FLUENT, fondé sur la Méthode des Volumes Finis (MVF), est amplement utilisé comme logiciel de CFD pour les travaux de recherche sur la ventilation. Pour évaluer l'efficacité des deux méthodes de discrétisation comme algorithmes de solution de CFD pour la simulation de la ventilation naturelle en serres, les simulations réalisées avec les deux programmes ont été comparées aux mesures expérimentales pour les quatre cas correspondants à la serre Almeria vide. Nous avons analysé la possibilité de répétition des simulations avec les deux méthodes de discrétisation et les logiciels commerciaux. Nous avons analysé la capacité de calcul des deux approches en comparant l'espace total de la base de données nécessaire pour enregistrer les modèles numériques avec le temps de calcul en CPU et pour calculer une itération dans le processus de convergence. En moyenne, pour le modèle analysé, le MEF a besoin de 37% moins de temps de calcul par élément et par itération que le MVF, tandis que la quantité de mémoire nécessaire fut à peu près 10 fois majeure pour le MEF.

Le modèle de CFD fut utilisé après sa validation pour évaluer l'effet des différents paramètres qui ont une influence sur la ventilation des serres, avec l'objectif de recommander les meilleurs projets de dessins de serres aux agriculteurs et fabricants de serres. Les paramètres étudiés dans les différentes simulations furent: la largeur et le numéro de chapelles de la serre, la surface de ventilation, la localisation et les types de fenêtres, la mise en place de filets anti-insectes de différentes porosités et l'incidence des plantes. Deux types de fenêtres en toiture ont été considérées: roulantes et à battants. Nous avons aussi analysé trois configurations de fenêtres latérales: une fenêtre roulante de 0.75 m de hauteur située entre 0.15 et 0.90 m par rapport au sol, une fenêtre située entre 0.90 et 1.65 m et une fenêtre de 1.5 m de hauteur située à 0.15 m par rapport au niveau du sol

Nous avons pu observer une réduction du taux d'aération de l'ordre de 50 à 88% (en croissance avec la vitesse), quand le nombre de chapelles augmentait de 1 à 5, à cause de l'augmentation de la largeur (9 à 45 m). L'utilisation de filets anti-insectes diminue d'environ 50% la vitesse de l'air au niveau des fenêtres latérales, et par conséquent le taux de renouvellement. L'analyse de régression des taux d'aération simulés G_{CFD} montre que l'on peut ajuster les résultats à un modèle linéal ($\Delta G_{CFD} [\%] = 2.37575 \cdot v_R [m \cdot s^{-1}] - 47.8497 \cdot \phi + 36.1154$ avec $R^2 = 0.442$) pour décrire la relation statistiquement significative entre la réduction du débit de ventilation ΔG_{CFD} (par rapport à une serre sans filets), la vitesse du vent v_R et la porosité du filet ϕ . La présence d'une culture dans la serre cause un effet de laminage de l'écoulement d'air et cela réduit la vitesse de l'air au niveau du sol, tandis que la vitesse de l'air est plus forte au niveau de la culture.

L'écoulement d'air, le taux d'aération et la distribution de la température de l'air dans la serre sont directement liés à la configuration des systèmes d'ouvertures. Les résultats dévoilent que l'on obtient les plus forts taux de renouvellement quand le système d'ouverture en toiture est ouvert à moitié et que les fenêtres latérales sont totalement ouvertes. Les taux les plus faibles furent prédits quand les fenêtres latérales étaient partiellement fermées. Dans le cas de la serre analysée et pour les quatre configurations de fenêtres simulées nous avons établi une corrélation statistiquement significative avec un niveau de confiance de 99% entre la vitesse du vent v_R et la surface de ventilation latérale S_{VL} (p -valeur=0.0025) avec le taux de renouvellement de la serre: $R [h^{-1}] = 13.7877 \cdot v_R [m \cdot s^{-1}] + 0.556455 \cdot S_{VL} [m^2] - 40.6668$ ($R^2 = 0.835$). Les résultats prédits avec CFD indiquent qu'une serre de type Almeria avec cinq fenêtres en toiture à battants orientées dans la direction opposée à celle du vent et deux fenêtres latérales peut obtenir de plus forts taux de renouvellement d'air qu'avec les ouvertures de ventilation orientées dans la direction du vent.

Finalement, les taux d'aération simulés dans tous les cas étudiés ont été comparés avec les taux calculés avec les différents modèles dérivés de l'équation de Bernoulli. Dans cet objectif, nous avons calculé les coefficients liés à la pression du vent sur la serre expérimentale type Almeria à partir des mesures directes du flux d'air dans les fenêtres grâce à l'anémométrie omni-directionnelle et sonique tridimensionnelle. Pour le modèle qui considère seulement l'effet du vent, le coefficient d'efficacité obtenu fut $E_V = C_d \cdot C_v^{0.5} = 0.107$ et il fut diminué à $E_V = 0.050$ quand la fenêtre centrale en toiture fut remplacée par deux fenêtres, de moindre surface, placées près du faîtage. Les valeurs des coefficients de pression moyenne du vent et de turbulence étaient respectivement $C_p = 0.159$ et $C_p' = 0.027$.

Dans la serre avec les deux fenêtres en toiture plus petites, ces coefficients étaient $C_v=0.066$ et $C_v'=0.029$. Les coefficients de décharge à cause de la présence de filets anti-insectes dans la serre ($C_{d,\phi}=0.152-0.278$) furent calculés à partir des mesures prises dans le tunnel à vent ; nous avons obtenu une valeur moyenne du coefficient de décharge de $C_d=0.265$. L'utilisation des filets anti-*aphides* dans les ouvertures peut causer une réduction de C_d d'à peu près 71% et par conséquent du coefficient d'efficiencia E_v . Un vent perpendiculaire à l'axe de la serre produit un flux d'entrée par les fenêtres latérales et une sortie par les systèmes d'ouverture en toiture. D'un point de vue qualitatif, le champ de vitesse est en accord avec les simulations de CFD.

La meilleure concordance entre les taux d'aération simulées avec CFD G_{CFD} pour les 72 situations analysées dans la serre de type Almeria (12 configurations avec 6 vitesses du vent) et celles qui ont été calculées avec les modèles G_M , fut obtenue pour le modèle qui considère la distribution de pression résultante comme la somme des champs de pression dues aux effets de flottabilité et du vent. Généralement, les valeurs du débit de ventilation déduites des simulations de CFD étaient 40% plus grandes que celles qui ont été calculées avec les coefficients C_d et C_v déduits des mesures expérimentales. Les coefficients d'effet éolien furent déduits des vitesses expérimentales moyennes dans la période de mesure et par conséquent méprisant la partie turbulente, tandis que les valeurs estimées par le modèle de CFD incluent la partie turbulente, même quand le modèle $\kappa-\epsilon$ utilisé est une grossière approche de la réalité. De plus, les coefficients furent obtenus dans une serre avec des cultures tandis que les simulations furent réalisées principalement dans des serres vides. Quand on ajoute le flux de ventilation turbulent G' on obtient une bonne concordance globale, avec les résultats s'adaptant à un modèle linéal $G_{CFD}=1.00 \cdot (G_M+G')$ avec $R^2=0.854$ et avec une relation statistiquement significative entre G_{CFD} et G_M+G' avec un niveau de confiance de 99%.

Abstract

The improvement of structures designs and climate control strategies in greenhouse need precise the modelling of the ventilation process. With the aim of advance in the knowledge of the influence of the different design factors in the Almería-type greenhouse ventilation, a model of Computational Fluid Dynamics (CFD) have been developed. For this purpose, have been used the commercial software ANSYS/FLOTRAN v6.1-12.0 based in the Finite Elements Method (FEM), providing a two-dimensional steady-state description of the greenhouse microclimate (airflow pattern and temperature distribution). The airflow through the insect-proof screens and the crop was described in the CFD model through an approach to porous media. The insect-proof screens were modelled by means of their airflow properties, permeability K_p and inertial factor Y , measured experimentally. The drag effect produced by the airflow through crops can be modelled as a function of leaf area density and the drag coefficient, C_D .

For obtain the aerodynamic parameters of the net required for their modelling, we had evaluated airflow resistance of the greenhouse insect-proof screens by two different experimental procedures: a low-speed wind tunnel and CFD simulations. In the first arrangement, air was forced through the test samples in order to create a pressure drop. Second analysis were carried out by numerical simulations of airflow through a pore of the insect-proof screens using the same commercial fluid dynamics code ANSYS/FLOTRAN, that was used for the overall model of the greenhouse. The results obtained in this work suggest that an equations based on the net thickness e_m , on the airflow properties (permeability K_p and inertial factor Y) of the screen and the Reynolds number Re_p can be used for calculate the pressure drop coefficient, $F_\varphi = 2 \cdot e_m \cdot K_p^{0.5} \cdot (Re_p^{-1} + Y)$.

The wind tunnel was also used to determine the drag coefficient C_D of seven horticultural crops. Three samples with differing values of leaf area density were tested for each crop. The values of C_D obtained for tomato, sweet pepper, aubergine, bean, cucumber, melon and pumpkin were 0.26, 0.23, 0.23, 0.22, 0.25, 0.21 and 0.22, respectively. The drag coefficients found decreased with velocity and remained nearly constant for Reynolds number greater than 6×10^4 . Drag coefficient allows the aerodynamic behaviour of crops to be characterised, although the use of a constant value involves a significant error (15-30%) for velocities usually registered inside greenhouses ($0.1-0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Maximum values of C_D were obtained for velocities between 0.5 and $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ due to the effects of change in leaf position and variation in airflow regime.

The final CFD model was compared with the data obtained for 8 experimental tests from a full-scale greenhouse for validate (4 with and 4 without crop inside). The experiment was carried out in a five span «*raspa y amagado*» Almería-type greenhouse equipped with top and side ventilation. Temperature and air velocities were measured at 22 locations inside the greenhouse. Air velocity were measured with an omni-directional hot-bulb anemometer and visualised by means of a smoke tracing technique, and temperature was measured with fixed data-logger. In the height cases analysed the air enters the greenhouse through side vents and leaves through roof vent. The air temperature distributions show a gradient from the side

walls towards the centre of the greenhouse due to the movement of the hot air rising towards the central roof vent, and a vertical gradient due to the movement of the air above the hot surface of the ground absorbing solar energy. Maximum air velocity inside the greenhouse was reached close to the side vents, with the lowest values registered in the middle of the greenhouse. The velocity decrease produced in the windward opening between the outside wind and air inside of the greenhouse was 75-85% in every case. The air velocity in the leeward area remained more or less constant around $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, as result of the «chimney effect». The results of the simulations agreed qualitatively well with the experimental measurements. The model was also quantitatively validated by comparing the numerical results with experimental data. Root mean square errors (RMSE) ranging from 2 to 2.9°C and from 0.13 to $0.27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ were obtained for temperature and air velocity, respectively.

The quality of the numerical grid (71984 element) and the computational domain size ($25 \text{ m}\times 120 \text{ m}$) were chosen after comparison with a more dense grid (102517 elements) and a greater domain ($40 \text{ m}\times 120 \text{ m}$) that diminished the accuracy of the model in comparison with the experimental data corresponding to the empty greenhouse. Three turbulence models were also tested, the $k-\epsilon$ standard, the Re-Normalisation Group (RNG) and the shear stress transport (SST), with similar accuracy in simulations. Finally, the effect of different boundary conditions in the results was also analysed: the wind profile in the airflow inlet (logarithmic and uniform velocity), the flow conditions in the top of the domain (pressure outlet or symmetry) and greenhouse ground and cover temperatures (uniform in the greenhouse or different at each span).

Until now, few papers using the FEM software ANSYS/FLOTRAN used in this work has been published, whereas the software ANSYS/FLUENT, based in the Finite Volumes Method (FVM), is usually used as CFD code in ventilation research. To evaluate the efficiency of the two different discretization methods as CFD solvers for the simulation of natural ventilation in greenhouses, simulations with the two software have been compared to experimental data for the 4 cases corresponding to the Almería empty greenhouse. The possibility of repeating simulations with the two discretization methods and commercial software has been tested. The computational capacity of both approaches has also been analyzed by comparing the overall database space necessary to store the numerical models together with the necessary CPU time to compute one step of the convergence process. On average, for the model analysed, FEM required 37% less computing time per element and step as FVM, whereas the amount of required memory storage was approximately 10 times greater for FEM.

The CFD model was used after validation to evaluate effects of different parameters that influence the greenhouses ventilation, in order to recommend the optimal designs to growers and greenhouse manufacturers. The parameters studied in the different simulations were: greenhouse width and span number, area, location and type of vent openings, presence of insect-proof screen with different porosity and incidence of plants. Two types of roof openings have been considered, the rollup and flap window configurations. Three arrangements of side vents have also been considered: a 0.75 m high rollup window placed from 0.15 to 0.90 m above the ground, a vent located from 0.90 to 1.65 m and a 1.5 m high vent located at 0.15 m .

Reduction between 50 and 88% (increasing with wind speed) in the ventilation rate were observed when the spans number increased from 1 to 3 or 5, as consequence of the increase of the greenhouse width (9 to 45 m). The use of insect proof screens decreased around 50% the air velocity through lateral windows, and therefore the ventilation rate. The regression analysis of simulated ventilation rates G_{CFD} showed that results can fit a linear model ($\Delta G_{CFD} [\%]=2.37575 \cdot v_R [m \cdot s^{-1}] -47.8497 \cdot \phi +36.1154$ with $R^2=0.442$) to describe a statistically significant relationship between ventilation rate reduction ΔG (with respect to unscreened greenhouse), wind speed v_R and screens porosity ϕ . The presence of a crop inside the greenhouse causes an effect of airflow lamination and reduces the air velocity at the ground level, while air speed is greater in areas above the crop.

The ventilation openings configuration affected the airflow, the ventilation rate and the air temperature distribution in the greenhouse. The results showed that maximum greenhouse ventilation rates were achieved when roof vent was half-opened and side rollup vents were fully open. Minimum rates were predicted when side vents were partially closed. In the case of the analyzed greenhouse and for the four opening configurations simulated a statistically significant correlation has been obtained statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level, between the wind speed v_R and the side ventilation area S_{VL} (p -value=0.0025) with the ventilation rate: $R [h^{-1}]=13.7877 \cdot v_R [m \cdot s^{-1}] + 0.556455 \cdot S_{VL} [m^2] -40.6668$ ($R^2=0.835$). The CFD predicted results showed that an Almería greenhouse with five roof leeward flap openings and two side vents can resulted in higher air exchange rates than with windward flap opening.

Finally, the simulated ventilation rates for all the cases studied have been compared with these predicted with different models derived from Bernoulli's equation. For this purpose the wind coefficients of the experimental Almería-type greenhouse have been calculated from direct estimation of airflow at the openings by means of omnidirectional and three-dimensional sonic anemometry. For the model considering only the wind effect, the coefficient of effectiveness obtained was $E_V=C_d \cdot C_v^{0.5}=0.107$ for the simulated greenhouse and was reduced to $E_V=0.050$ when the central roof vent was replace by two roof vents with less ventilation surface. The values of the mean and turbulent wind coefficients were $C_v=0.159$ and $C_v'=0.027$, respectively. In the greenhouse with two little roof vents these coefficient become to $C_v=0.066$ and $C_v'=0.029$. Discharge coefficients due to the presence of insect-proof screens in the greenhouse ($C_{d,\phi}=0.152-0.278$) were calculated from wind tunnel measurements, obtaining a mean total discharge coefficient of $C_d=0.265$. Use of the anti-aphid screen in the openings can cause approximately a 71% reduction of C_d and consequently of the efficiency coefficient E_V . Winds perpendicular to the greenhouse axis produce an inflow through the side openings and an outflow through the roof vent. In qualitative terms, this airflow pattern is in good agreement with CFD simulations.

The better agreement between the ventilation rates simulated with CFD G_{CFD} for the 72 situations in the Almería greenhouse (12 configuration by 6 different wind speed) and the calculated with the model G_M , was obtained for the theoretical model considering the resulting pressure distribution as the sum of the pressure fields due to buoyancy and wind effects. Generally, the values of the ventilation rate deduced from CFD simulations was 30% larger than the value calculated with coefficients C_d and C_v deduced from the experimental

measurements. The wind coefficient was deduced from the experimental averaged air velocity over the measurement period and therefore neglecting the turbulent part, while the estimated value by the CFD model includes the turbulent part even if the used $\kappa\text{-}\epsilon$ model is a rough approximation of the reality. Además los coeficientes se obtuvieron con cultivo dentro de los invernaderos mientras que las simulaciones se hicieron mayoritariamente en invernaderos vacíos. The coefficients were also obtained with a crop inside the greenhouses while the simulations were meanly made in empty greenhouses. When the turbulent ventilation rate G' was added, a overall good agreement was obtained, with results fitting a linear model, $G_{CFD}=1.00\cdot(G_M+G')$ with $R^2=0.854$ and with a statistically significant relationship between G_{CFD} and G_M+G' at the 99% confidence level.