



Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas

ISSN: 2007-0934

revista\_atm@yahoo.com.mx

Instituto Nacional de Investigaciones

Forestales, Agrícolas y Pecuarias

México

Pérez Vega, Cuauhtémoc; Ramírez Arias, José Armando; López Cruz, Irineo L.  
Características aerodinámicas de mallas anti-insectos usadas en ventanas de  
invernaderos en México

Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, vol. 7, núm. 3, abril-mayo, 2016, pp. 493-506

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias  
Estado de México, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263145554002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## **Características aerodinámicas de mallas anti-insectos usadas en ventanas de invernaderos en México\***

### **Aerodynamic characteristics of anti-insect mesh windows used in greenhouses in Mexico**

**Cuahtémoc Pérez Vega<sup>1§</sup>, José Armando Ramírez Arias<sup>1</sup> e Irineo L. López Cruz<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km. 38.5. Chapingo, Texcoco Estado de México. C. P. 56230. Tel: 595 95 215 51. (ilopez@correo.chapingo.mx; ariasar\_mx@yahoo.com.mx). <sup>§</sup>Autor para correspondencia: pvcuahtemoc@hotmail.com.

## **Resumen**

Se analizaron mediante pruebas de microscopía y en túnel de viento, las características geométricas, porosidad y la caída de presión, respectivamente de siete diferentes mallas comúnmente usadas como barreras físicas en ventanas de invernaderos mexicanos para determinar su efecto sobre la tasa de ventilación, la permeabilidad y el factor inercial. Las mallas se analizaron en la Universidad Autónoma Chapingo en mayo de 2013 y fueron: anti-trips (M1), anti-trips bicolor (M2), anti-áfidos (M3), anti-áfidos bicolor (M4), cenital (M5), rompevientos verde-negro (M6) y anti-áfidos blanca (M7), cuyas porosidades fueron 0.36, 0.35, 0.47, 0.45, 0.54, 0.29 y 0.43 respectivamente. La geometría de las mallas se realizó midiendo las áreas de los poros con un microscopio óptico, para determinar las porosidades y calcular el descenso de la tasa de ventilación. Posteriormente, las características aerodinámicas más importantes; es decir, permeabilidad y factor inercial, se determinaron usando un túnel de viento para medir la relación entre la caída de presión causada por cada malla y la velocidad del flujo de aire. Los resultados mostraron que la malla cenital (M5) presenta la menor resistencia al flujo de aire con 21% de descenso en la tasa de ventilación, mientras que la malla rompevientos verde-negra (M6) fue de 50%. Los invernaderos en México normalmente usan la malla del tipo anti-áfidos con porosidad entre 0.43 y 0.47 para las ventanas laterales y cenitales.

## **Abstract**

They were analyzed by tests microscopy and wind tunnel, geometric characteristics, porosity and pressure drop, respectively seven different meshes commonly used as physical barriers windowing Mexican greenhouses to determine its effect on the ventilation rate, permeability and the inertial factor. The meshes were analyzed in the Chapingo in May 2013 were: anti-thrips (M1), anti-thrips bicolor (M2), anti-aphid (M3), anti-aphid bicolor (M4), zenithal (M5), green-black windbreaker (M6) and anti-aphid white (M7), whose porosities were 0.36, 0.35, 0.47, 0.45, 0.54, 0.29 and 0.43 respectively. The geometry of the meshes is performed by measuring the areas of the pores with an optical microscope to determine the porosities and calculate the decrease in ventilation rate. Subsequently, the most important aerodynamic characteristics; i. e. inertial factor and permeability were determined using a wind tunnel to measure the relationship between the pressure drop caused by each mesh and the speed of the airflow. The results showed that the zenithal mesh (M5) has the least resistance to air flow with 21% decrease in ventilation rate, while the green-black windbreaker mesh (M6) was 50%. Greenhouses in Mexico typically use anti-aphid mesh with porosity between 0.43 and 0.47 for the side windows and zenithal type.

\* Recibido: diciembre de 2015  
Aceptado: marzo de 2016

**Palabras clave:** caída de presión, factor inercial, permeabilidad, porosidad.

**Keywords:** inertial factor, permeability, porosity, pressure drop.

## Introducción

La producción de hortalizas en ambientes protegidos de los trópicos húmedos y en climas cálidos, es vulnerable al estrés climático (valores elevados de temperatura y humedad), plagas y a las enfermedades virales transmitidas por ellas (von Zabeltitz, 2011). El uso de mallas plásticas en ventanas de invernaderos, macrotúneles y malla-sombra, se recomienda para prevenir daños importantes de los cultivos a causa de insectos (Romero-Gómez *et al.*, 2010). Su principal función es ejercer como barrera física que impide la entrada de insectos al interior del invernadero y por lo tanto, una baja incidencia de enfermedades, minimizando la necesidad de tratamientos fitosanitarios (Álvarez *et al.*, 2006). El uso de mallas está muy difundido, pero tienen una influencia negativa haciendo descender la tasa de ventilación natural, y por tanto, aumentan la temperatura y la humedad al interior de ambientes protegidos (Valera *et al.*, 2006).

La eficiencia de estas mallas depende principalmente del tamaño del mallado (debe ser menor al diámetro torácico del insecto más pequeño que se quiere excluir), su sección transversal y propiedades ópticas (tales como el color) (Teitel, 2007; von Zabeltitz, 2011; Castilla, 2013). La porosidad de la malla es la relación entre el área de los poros y el área total; depende del diámetro del hilo y del número de hilos por unidad de área, y determina la reducción en la tasa de ventilación natural (Castilla, 2013).

Debido a esta resistencia la velocidad del aire, la temperatura y la humedad en el interior de los invernaderos son modificadas (Fatnassi *et al.*, 2003) y se reduce la transmisión de luz (von Zabeltitz, 2011), afectando negativamente el crecimiento y desarrollo del cultivo, y favoreciendo la aparición de enfermedades (Teitel *et al.*, 2008). Las mallas empleadas normalmente en invernaderos disminuyen la tasa de ventilación aproximadamente 40% en mallas anti-insectos, y 70-80% en mallas anti-trips (Montero y Antón, 2000), aunque esta disminución puede ser más alta si la velocidad del viento es muy baja (Castilla, 2013).

## Introduction

The production of vegetables in protected environments of the humid tropics and in warm climates, is vulnerable to climatic stress (high values of temperature and humidity), pests and viral diseases transmitted by them (Von Zabeltitz, 2011). The use of plastic mesh in windows greenhouses, macrotunnels and mesh-shade is recommended to prevent serious damage to crops caused by insects (Romero-Gómez *et al.*, 2010). Its main function is to act as a physical barrier that prevents the entry of insects into the greenhouse and therefore, a low incidence of diseases, minimizing the need for phytosanitary treatments (Alvarez *et al.*, 2006). The use of nets is widespread, but have a negative influence by lowering the rate of natural ventilation, and therefore increase the temperature and humidity within protected environments (Valera *et al.*, 2006).

The efficiency of these screens depends mainly on the size of the mesh (must be less than thoracic diameter of the smallest insect you want to exclude), its cross section and optical properties (such as color) (Teitel, 2007; von Zabeltitz, 2011; Castilla, 2013). The porosity of the mesh is the ratio of pore area and total area; it depends on the wire diameter and the number of threads per unit area, and determines the reduction in the rate of natural ventilation (Castilla, 2013).

Because of this resistance air velocity, temperature and humidity inside the greenhouses are modified (Fatnassi *et al.*, 2003) and light transmission (von Zabeltitz, 2011) is reduced, adversely affecting the growth and development crop, and favoring the onset of disease (Teitel *et al.*, 2008). Meshes normally used in greenhouses ventilation rate decreased about 40% by anti-insect mesh, and 70-80% in anti-trips meshes (Montero and Anthony, 2000), although this decrease can be higher if the wind speed it is very low (Castilla, 2013).

To analyze the flow characteristics of air through the meshes usually employed in greenhouses is important to determine its permeability ( $K$ ,  $m^2$ ) and inertial factor ( $Y$ , dimensionless),

Para analizar las características del flujo de aire que atraviesa las mallas empleadas habitualmente en invernaderos es importante determinar su permeabilidad ( $K$ ,  $m^2$ ) y su factor inercial ( $Y$ , adimensional), dos parámetros fundamentales para poder modelar el paso de aire a través de un medio poroso. Así, Miguel *et al.* (1997) y Miguel *et al.* (1998) evaluaron diferentes mallas en un túnel de viento, y encontraron que las mejores correlaciones con la porosidad son las de la ecuación (1):

$$K = 3.44 \times 10^{-9} \alpha^{1.6} \text{ y } Y = 4.3 \times 10^{-2} \alpha^{-2.13} \quad 1)$$

Donde:  $\alpha$  = porosidad de la malla ( $m^2 m^{-2}$ ).

Por su parte, Valera *et al.* (2005) estudiaron 11 mallas en un túnel de viento y encontraron las siguientes correlaciones (ecuación 2):

$$K = 5.68 \times 10^{-8} \alpha^{3.68} \text{ y } Y = 5.67 \times 10^{-2} \alpha^{-1.1604} \quad 2)$$

En los estudios de Miguel *et al.* (1997), Miguel *et al.* (1998) y Valera *et al.* (2005), la caída de presión fue graficada como una función de la velocidad del aire antes de la malla, y un polinomio de segundo grado fue ajustado a la curva de medición, para calcular la permeabilidad y el factor inercial (Teitel, 2010). Al respecto, Flores-Velázquez y Montero (2008) propusieron diferentes relaciones para  $K$  e  $Y$  (ecuación 3), basados en datos publicados por Miguel *et al.* (1997), Teitel (2001) y Valera *et al.* (2006).

$$K = 2.0 \times 10^{-7} \alpha^{3.3531} \text{ y } Y = 0.342 \times 10^{-2} \alpha^{-2.5917} \quad 3)$$

Cuando las ecuaciones de Navier-Stokes, son resueltas numéricamente en simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), el término fuente en la ecuación de momento está representado por la ecuación de Forchheimer. Diferentes autores (Campen y Bot, 2003; Fatnassi *et al.*, 2003; Molina-Aiz *et al.*, 2004) usan esta aproximación para determinar los valores de  $K$  e  $Y$ .

El objetivo del estudio fue analizar mediante mediciones microscópicas y en túnel de viento, la porosidad y caída de presión, respectivamente, de siete mallas comerciales usadas habitualmente en ventanas de invernaderos mexicanos, para determinar, su efecto sobre las tasas de ventilación, la permeabilidad y el factor inercial de cada una de ellas.

two key parameters to model the air flow through a porous medium. Thus, Miguel *et al.* (1997) and Miguel *et al.* (1998) evaluated different meshes in a wind tunnel and found that the best correlations with porosity are those of the equation (1):

$$K = 3.44 \times 10^{-9} \alpha^{1.6} \text{ y } Y = 4.3 \times 10^{-2} \alpha^{-2.13} \quad 1)$$

Where:  $\alpha$  = porosity of the mesh ( $m^2 m^{-2}$ ).

Meanwhile, Valera *et al.* (2005) studied 11 meshes in a wind tunnel and found the following correlations (Equation 2):

$$K = 5.68 \times 10^{-8} \alpha^{3.68} \text{ y } Y = 5.67 \times 10^{-2} \alpha^{-1.1604} \quad 2)$$

In studies Miguel *et al.* (1997), Miguel *et al.* (1998) and Valera *et al.* (2005), the pressure drop was plotted as a function of air velocity before the mesh, and second-degree polynomial was fitted to the measured curve to calculate the permeability and the inertial factor (Teitel, 2010). In this regard, Flores-Velázquez and Montero (2008) proposed different relationships for  $K$  and  $Y$  (Equation 3), based on data published by Miguel *et al.* (1997), Teitel (2001) and Valera *et al.* (2006).

$$K = 2.0 \times 10^{-7} \alpha^{3.3531} \text{ y } Y = 0.342 \times 10^{-2} \alpha^{-2.5917} \quad 3)$$

When the Navier-Stokes equations are solved numerically in simulations of computational fluid dynamics (CFD), the source term in the momentum equation is represented by the Forchheimer equation. Different authors (Campen y Bot, 2003; Fatnassi *et al.*, 2003; Molina-Aiz *et al.*, 2004) used this approach to determine the values of  $K$  and  $Y$ .

The aim of the study was analyzed by microscopic and wind tunnel measurements, porosity and pressure drop, respectively, of seven commercial meshes commonly used in windows mexican greenhouses, to determine its effect on ventilation rates, permeability and the inertial factor each.

## Materials and methods

### Experimental site

The study was conducted in laboratories Energy DIMA and Engineering Laboratory Timber DICIFO of Autonomous University Chapingo (UACH) in Chapingo, Mexico

## Materiales y métodos

### Sitio experimental

El estudio se realizó durante el 2013 en los laboratorios de Energía del DIMA, y laboratorio de Ingeniería de la Madera de DICIFO de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), en Chapingo, México. Se realizaron mediciones microscópicas de la geometría de los poros de diferentes mallas con un microscopio óptico (Leica Microsystems modelo DM500). Y pruebas experimentales en un túnel de viento C15-10 (Armfield Inc. NJ, USA) para determinar la caída de presión en diferentes mallas.

### Caracterización geométrica de las mallas

Selección y preparación de las muestras. Las muestras de las mallas anti-trips (M1), anti-trips bicolor (M2), anti-áfidos (M3), anti-áfidos bicolor (M4), cenital (M5), rompevientos verde-negro (M6) y anti-áfidos (M7), se seleccionaron de manera aleatoria en productos nuevos comercializados por empresas fabricantes de fibras plásticas y constructores de invernaderos en México. La preparación de las muestras consistió en colocar una pequeña porción rectangular de cada malla analizada a lo largo de toda la superficie de un portaobjetos para microscopio, sujeta por cinta transparente. De este modo, la malla se ajusta a un plano y se asegura que la región explorada sea la misma para todas las muestras. Se analizaron cinco superficies seleccionadas aleatoriamente de cada malla. Las áreas de cada muestra fueron de 2.5 mm<sup>2</sup> tomadas con un objetivo a 4 x de un microscopio óptico (Leica Microsystems modelo DM500) y una cámara ICC50 Leica de 3 megapíxeles.

Procesamiento de las imágenes. Se usó el software Leica Application Suite (LAS) EZ para simplificar el control de la cámara, la captura de imágenes, la anotación, la medición y la documentación. Las muestras digitalizadas fueron convertidas de imágenes en escala de grises a blanco y negro. Después se realizaron las mediciones marcando con el apuntador del ratón el interior del poro tanto en dirección vertical como horizontal para obtener las dimensiones de éste y, en los bordes de los hilos para determinar su diámetro (Figura 1).

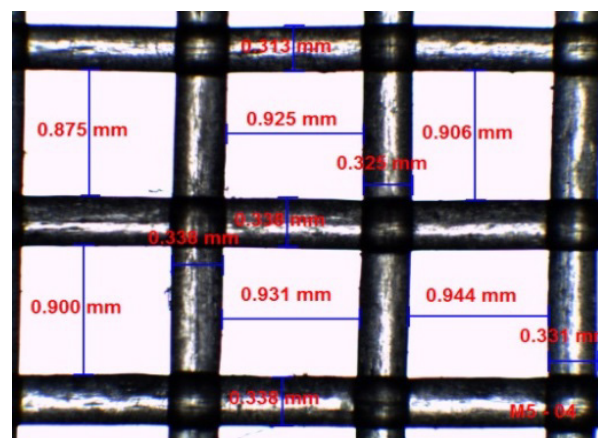
Se seleccionó una metodología de análisis geométrico ampliamente utilizada en diversos trabajos de reportados sobre caracterización geométrica de mallas anti-insectos (Cabrera *et al.*, 2006; Álvarez *et al.*, 2012). Mediante la toma

during 2013. The microscopic measurements of pore geometry of different meshes with a light microscope (Leica Microsystems Model DM500) were performed. And experimental tests in a wind tunnel C15-10 (Armfield Inc. NJ, USA) to determine the pressure drop in different meshes.

### Geometrical characterization of mesh

Selection and preparation of samples. Samples of anti-trips meshes (M1), anti-thrips bicolor (M2), anti-aphid (M3), anti-aphid bicolor (M4), zenithal (M5), green-black windbreaker (M6) and anti-aphids (M7) were selected randomly in new products marketed by manufacturers of plastic fibers and builders of greenhouses in Mexico. The sample preparation consisted of placing a small rectangular portion of each mesh analyzed over the entire surface of a microscope slide, held by transparent tape. Thus, the mesh is adjusted to a plane and ensures that the region scanned is the same for all samples. Five randomly selected surfaces of each mesh were analyzed. Areas of each sample were taken 2.5 mm<sup>2</sup> with a target to 4 x an optical microscope (Leica Microsystems model DM500) and a camera Leica ICC50 3MP.

Image processing. The Leica Application Suite (LAS) EZ software used to simplify camera control, image capture, annotation, measurement and documentation. The digitized samples were converted to grayscale images to black and white. After marking measurements with the mouse pointer inside the pore in both vertical and horizontal direction for dimensions thereof and, at the edges of the wire to determine its diameter they were performed (Figure 1).



**Figura 1. Muestras de malla usada para determinar el tamaño de poros y diámetro de hilos. Bases del método.**

**Figure 1. Samples mesh used to determine the pore size and wire diameter. Bases of the method.**



de imágenes digitales de muestras usando un microscopio óptico. La base geométrica es considerar que cada orificio (poro) de la malla representa un paralelogramo que está definido por cuatro hilos monofilamentos que se entrelazan entre sí para formar la red o malla. Finalmente, se determina la porosidad con base en la relación que existe entre el área de poros y el área total de mallas.

Número de hilos por unidad de longitud. De acuerdo con Cabrera *et al.* (2006), se considera que las mallas anti-insectos comúnmente empleadas en los invernaderos por lo general son fabricadas con un solo tipo de hilo de diámetro constante  $D$  (mm), y conociendo el número de hilos  $\text{cm}^{-1}$  en las dos direcciones  $X$  e  $Y$  ( $N_x$ ,  $N_y$ ), el tamaño promedio del poro en ambas direcciones  $L_x$  (mm) y  $L_y$  (mm) se puede calcular usando las ecuaciones (4) y (5):

$$L_x = \frac{10}{N_x} \cdot D \quad (4)$$

$$L_y = \frac{10}{N_y} \cdot D \quad (5)$$

Álvarez *et al.* (2012), extendiendo su análisis a mallas que pueden tener un diámetro de hilo distinto en las direcciones de la trama y de la urdimbre, propone que el número de hilos por unidad de longitud (hilos  $\text{cm}^{-1}$ ) en las direcciones trama ( $\rho_x$ ) y urdimbre ( $\rho_y$ ) de la malla se calcula usando las ecuaciones (6) y (7):

$$\rho_x = \frac{1}{l_{py} + d_{hx}} \quad (6)$$

$$\rho_y = \frac{1}{l_{px} + d_{hy}} \quad (7)$$

Donde:  $l_{py}$  y  $l_{px}$  = Las dimensiones características de los poros de la malla;  $d_{hx}$  y  $d_{hy}$  = espesor de los hilos del trama y urdimbre, respectivamente.

Cálculo de la porosidad. La separación de los hilos que forman el tejido de una malla anti-insectos define una matriz porosa formada por filas y columnas de poros. Esta puede ser observada mediante un microscopio como una superficie plana. Una de las propiedades geométricas más importantes de estos materiales es su porosidad  $\alpha$  ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ) definida como la superficie ocupada por los orificios con respecto a la superficie total de la malla (Álvarez *et al.*, 2012; Cabrera *et al.*, 2006; Valera *et al.*, 2006) y puede ser calculada por la ecuación (8) para una malla con mismo tipo de hilo en ambas direcciones de tejido.

Geometric analysis methodology widely used in various jobs reported on anti-insect mesh geometric characterization was selected (Cabrera *et al.*, 2006; Alvarez *et al.*, 2012). By taking digital images of samples using an optical microscope. The geometric base is considered that each hole (pore) of the mesh represents a parallelogram is defined by four monofilament yarns that are interwoven together to form the net or mesh. Finally, the porosity is determined based on the relationship between the pore area and the total area of mesh.

Number of threads per unit length. According to Cabrera *et al.* (2006), it is considered that the meshes anti-insects commonly used in greenhouses typically are manufactured with one type of thread of constant diameter  $D$  (mm), and knowing the number of threads  $\text{cm}^{-1}$  in both directions  $X$  and  $Y$  ( $N_x$ ,  $N_y$ ), the average pore size in both directions  $L_x$  (mm) and  $L_y$  (mm) can be calculated using equations (4) and (5):

$$L_x = \frac{10}{N_x} \cdot D \quad (4)$$

$$L_y = \frac{10}{N_y} \cdot D \quad (5)$$

Álvarez *et al.* (2012), extending its analysis meshes can have a wire diameter different in the directions of the weft and warp, proposed that the number of threads per unit length (wire  $\text{cm}^{-1}$ ) in the directions frame ( $\rho_x$ ) and warp ( $\rho_y$ ) of the mesh is calculated using equations (6) and (7):

$$\rho_x = \frac{1}{l_{py} + d_{hx}} \quad (6)$$

$$\rho_y = \frac{1}{l_{px} + d_{hy}} \quad (7)$$

Where:  $l_{py}$  and  $l_{px}$  = the characteristics of the pores of the mesh size;  $d_{hx}$  and  $d_{hy}$  = thickness of the threads of the warp and weft, respectively.

Calculation of the porosity. The separation of the strands forming a mesh fabric anti-insect defines a porous matrix of rows and columns of pores. This can be observed by a microscope as a flat surface. One of the most important geometrical properties of these materials is their porosity  $\alpha$  ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ) defined as the area occupied by the holes with respect to the total area of the mesh (Cabrera *et al.*, 2006; Valera *et al.*, 2006; Alvarez *et al.*, 2012) and can be calculated by equation (8) for a mesh with the same type of thread in both directions of fabric.

$$\alpha = \frac{100 - 10DN_X - 10DN_Y + N_XN_Y}{100} = \frac{L_XL_Y}{(L_X + D)(L_Y + D)} \quad 8)$$

Reducción de la tasa de ventilación. La reducción de la tasa de ventilación (R, %), que provocan las mallas usadas en ventanas de ambientes protegidos se puede determinar por medio de la ecuación empírica (9) propuesta por Pérez-Parra *et al.* (2004).

$$\frac{\Phi_m}{\Phi} = \alpha(2 - \alpha); R = \left[1 - \frac{\Phi_m}{\Phi}\right]100 = [\alpha^2 - 2\alpha + 1]100 \quad 9)$$

Donde:  $\Phi$  = Flujo de aire volumétrico a través de una ventana con malla ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $\Phi_m$  = flujo de aire volumétrico a través de una ventana sin malla ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ).

Caracterización aerodinámica de las mallas. Se utilizó el túnel de viento C15-10 (Armfield Inc. NJ, USA), el cual cuenta con una sección de trabajo en material acrílico transparente de (150 mm x 150 mm x 455 mm) y ventilador (Ziehl-Abegg modelo THCL155 IP54) de corriente alterna (CA) controlado por inversor que permite un control preciso de la velocidad del aire hasta  $34 \text{ m s}^{-1}$  libre de obstáculos. El aire fluye a través de la sección de trabajo impulsado por un ventilador de velocidad variable situado en el extremo de la salida del túnel. Incorpora un enderezador de flujo tipo panal en la entrada, y la relación de contracción de 9.4:1 asegura un flujo de aire continuo a través de la sección de trabajo.

Preparación e instalación de las muestras en túnel de viento. Las muestras utilizadas en el túnel de viento se cortaron y se colocaron sobre un marco metálico. El marco se construyó con aluminio de las mismas dimensiones que la sección transversal del túnel de viento (150 mm x 150 mm) en la zona de trabajo. Las mallas se colocaron y tensaron mediante un dispositivo de sujeción en todo el perímetro del marco para simular colocada en los invernaderos. Después las muestras se instalaron en la parte central de la sección de trabajo del túnel de viento para realizar las pruebas.

Operación del túnel de viento. Una vez instalada la muestra de la malla en la sección de trabajo del túnel de viento, se instaló el sensor de presión electrónico (0 - 178 mm H<sub>2</sub>O) en la pared de la sección de trabajo antes y después de la malla, para realizar las mediciones de la presión estática y velocidad del aire. La operación del túnel de viento se llevó a cabo usando la interfaz Armfield IFD7, que permite la conexión túnel de viento-computadora personal. Mediante

$$\alpha = \frac{100 - 10DN_X - 10DN_Y + N_XN_Y}{100} = \frac{L_XL_Y}{(L_X + D)(L_Y + D)} \quad 8)$$

Reducing ventilation rate. Reducing ventilation rate (R, %), which cause the nets used in protected environments windows can be determined through empirical equation (9) given by Pérez-Parra *et al.* (2004).

$$\frac{\Phi_m}{\Phi} = \alpha(2 - \alpha); R = \left[1 - \frac{\Phi_m}{\Phi}\right]100 = [\alpha^2 - 2\alpha + 1]100 \quad 9)$$

Where:  $\Phi$  = volumetric flow of air through a mesh window ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $\Phi_m$  = volumetric flow of air through a window without mesh ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ).

Aerodynamic characterization of the mesh. The wind tunnel C15-10 (Armfield Inc. NJ, USA), which has a working section in transparent acrylic material (150 mm x 150 mm x 455 mm) and fan (Ziehl-Abegg model was used THCL155 IP54) alternating current (AC) controlled by inverter which allows precise control of the air speed up to  $34 \text{ m s}^{-1}$  free of obstacles. The air flows through the working section driven by a variable speed fan located at the end of the tunnel exit. Incorporates a honeycomb straightener flow at the inlet, and the shrinkage ratio of 9.4:1 ensures a continuous flow of air through the working section.

Preparation and installation of wind tunnel samples. The samples used in the wind tunnel were cut and placed on a metal frame. The frame is constructed with aluminum the same dimensions as the cross section of the wind tunnel (150 mm x 150 mm) in the work area. The meshes were placed and tightened by a clamping device around the perimeter of the frame to simulate placed in greenhouses. The samples were installed in the central part of the working section of the wind tunnel for testing.

Operation of the wind tunnel. Once installed the sample of the mesh in the working section of the wind tunnel, the electronic pressure sensor (0 - 178 mm H<sub>2</sub>O) was installed on the wall of the working section before and after the mesh, to perform measurements of the static pressure and air velocity. The wind tunnel operation was carried out using the Armfield IFD7 interface, which allows the connection of wind-tunnel personal computer. Using the computer program C15-304 fan control it was carried out in the wind tunnel, including power and control of the rotation speed between 0 to 100% (de 0 a  $34 \text{ m s}^{-1}$ ) to display and record all data presented inside the wind tunnel. After the test the speed of rotation was reduced gradually to 0% to turn off the fan.

el programa de computadora C15-304 se realizó el control del ventilador en el túnel de viento, incluyendo su encendido y control de la velocidad de rotación entre de 0 a 100% (de 0 a 34 m s<sup>-1</sup>) para visualizar y registrar todos los datos que se presentan en el interior del túnel de viento. Al término de la prueba se redujo la velocidad de rotación gradualmente hasta 0 % para apagar el ventilador.

Registro de datos. Las mediciones de presión estática y velocidad del aire durante las pruebas se registraron en una hoja de cálculo para su posterior análisis, se consideró un tiempo de muestreo de 2 min por cada incremento en 1% de la velocidad de rotación del ventilador.

Algoritmo para calcular la caída de presión. Miguel *et al.* (1997) analizaron el flujo de aire a través de mallas utilizando las ecuaciones de flujo en medios porosos. Para el estado estacionario, el flujo de fluido incompresible a través de un material poroso, la caída de presión puede ser expresada por la ecuación de Forchheimer (10):

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\mu}{K} u + \rho \left[ \frac{Y}{K^{1/2}} \right] u|u \quad (10)$$

Donde:  $\mu$ = viscosidad dinámica (kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>);  $u$ = velocidad del aire (m s<sup>-1</sup>);  $\rho$ = densidad del aire (kg m<sup>-3</sup>);  $K$  y  $Y$ = permeabilidad y el factor inercial de la malla respectivamente.

Experimentalmente es posible determinar las características aerodinámicas (permeabilidad  $K$  y factor inercial  $Y$ ) de las mallas mediante el siguiente procedimiento:

Paso 1. Los datos de presión y velocidad de aire medidos en el túnel de viento se ordenan en una matriz de dos columnas (presión y velocidad) y  $n$  filas (número de datos), para ser graficados (caída de presión contra velocidad del aire) y ajustar a un modelo o polinomio de segundo grado.

Paso 2. Mediante la interface gráfica de la herramienta de ajuste de curvas de MATLAB (*cftool*, *Curve Fitting Tool*) se importan los datos del espacio de trabajo de MATLAB a la herramienta *cftool*.

Paso 3. Los datos se exploran gráficamente para posteriormente ajustarlos usando un modelo paramétrico de segundo grado ( $\Delta P = AV^2 + BV + C$ ), de la librería de *cftool* y generar sus estadísticas.

Data register. Measurements of static pressure and air velocity during the tests were recorded in a spreadsheet for further analysis, it was considered a sampling time of 2 min for each 1% increase in the rotational speed of the fan.

Algorithm to calculate the pressure drop. Miguel *et al.* (1997) analyzed the airflow through meshes using equations of flow in porous media. For steady state, the flow of incompressible fluid through a porous material, the pressure drop can be expressed by equation Forchheimer (10):

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\mu}{K} u + \rho \left[ \frac{Y}{K^{1/2}} \right] u|u \quad (10)$$

Where:  $\mu$ = dynamic viscosity (kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>);  $u$ = Air velocity (m s<sup>-1</sup>);  $\rho$ = Air density (kg m<sup>-3</sup>);  $K$  and  $Y$ = permeability and the inertial factor of the grid respectively.

Experimentally it is possible to determine the aerodynamic characteristics (permeability  $K$  and inertial factor  $Y$ ) of the meshes using the following procedure:

Step 1. Data pressure and air velocity measured in the wind tunnel are arranged in a matrix of two columns (pressure and speed) and  $n$  rows (number of data) to be graphed (pressure drop against air velocity) and adjust to a model or second-degree polynomial.

Step 2. Using the graphical interface tool MATLAB curve fitting (*cftool*, *Curve Fitting Tool*) data MATLAB workspace tool to imported *cftool*.

Step 3. The data is graphically explore later adjust using a parametric model of second degree ( $\Delta P = AV^2 + BV + C$ ), the library *cftool* and generate statistics.

The second degree model is related Forchheimer equation as follows:

$$\Delta p = AV^2 + BV + C \quad (11)$$

In which the coefficients (A and B) can be calculated according to equation (11).

$$A = \frac{Y}{\sqrt{K}} \rho e_s \quad (12)$$

$$B = e_s \frac{\mu}{K} \quad (13)$$



El modelo de segundo grado es relacionado con la ecuación de Forchheimer de la siguiente manera:

$$\Delta p = AV^2 + BV + C \quad (11)$$

En la cual los coeficientes (A y B) pueden ser calculados en función de la ecuación (11).

$$A = \frac{Y}{\sqrt{K}} \rho e_s \quad (12)$$

$$B = e_s \frac{\mu}{K} \quad (13)$$

A partir de (13) es posible calcular la permeabilidad, usando la ecuación (14).

$$B = e_s \frac{\mu}{B} \quad (14)$$

Similar procedimiento se sigue para Y con la ecuación (15).

$$Y = \frac{A \sqrt{K}}{\rho \cdot e_s} \quad (15)$$

La permeabilidad específica del medio representa la capacidad de permitir el paso de un fluido a través y es función de la viscosidad y de la frecuencia de contacto con las paredes sólidas. El coeficiente de arrastre (Y) está influenciado por la naturaleza del medio, en este caso poroso, que define dicho factor inercial. Se asume una densidad del aire de  $(\rho) = 1.204 \text{ kg m}^{-3}$  y una viscosidad dinámica  $(\mu) = 1.7894 \times 10^{-5} [\text{Kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}]$ , ambas para ser usadas en las ecuaciones 12, 13, 14 y 15.

### Análisis estadístico

Para determinar la diferencia significativa estadísticamente para las mallas en cuanto a la porosidad se realizó un ANDEVA donde se consideraron siete muestras con cinco repeticiones cada una. Los datos obtenidos en promedios de características geométricas y aerodinámicas se realizaron pruebas de comparación de medias de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) usando el paquete estadístico SAS 9.2 (SAS, 2009). Los datos obtenidos de características aerodinámicas se analizaron usando la herramienta cftool del programa Matlab para generar los modelos de regresión lineal de segundo grado y ajustar a los resultados obtenidos de la caída de presión y velocidad del aire ( $0 - 4 \text{ ms}^{-1}$ ,  $0 - 6 \text{ ms}^{-1}$  y  $0 - 8 \text{ ms}^{-1}$ ), donde su mejor ajuste fue evaluado con base a la raíz del error cuadrático medio (RMSE), suma de los cuadrados debido al error (SSE) y coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

From (13) it is possible to calculate the permeability using the equation (14).

$$B = e_s \frac{\mu}{B} \quad (14)$$

Similar procedure is followed for Y with the equation (15).

$$Y = \frac{A \sqrt{K}}{\rho \cdot e_s} \quad (15)$$

The specific permeability of the medium represents the ability to allow the passage of a fluid through and is dependent on the viscosity and the frequency of contact with the solid walls. The drag coefficient (Y) is influenced by the nature of the medium, in this case porous, defining said inertial factor. An air density of  $(\rho) = 1.204 \text{ kg m}^{-3}$  and a dynamic viscosity  $(\mu) = 1.7894 \times 10^{-5} [\text{Kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}]$ , both for use in Equations 12, 13, 14 is assumed and fifteen.

### Statistic analysis

To determine the statistically significant difference for meshes regarding porosity ANDEVA where seven samples were considered five repetitions was performed. The data obtained in average geometric and aerodynamic characteristics comparison tests were performed Tukey ( $p \leq 0.05$ ) using the statistical package SAS 9.2 (SAS, 2009). The data obtained from aerodynamic characteristics were analyzed using the cftool tool Matlab program to generate the linear regression models of second grade and adjust to the results of the pressure drop and air velocity ( $0 - 4 \text{ ms}^{-1}$ ,  $0 - 6 \text{ ms}^{-1}$  y  $0 - 8 \text{ ms}^{-1}$ ), where your best fit was evaluated based on the root mean square error (RMSE), sum of squares due to error (SSE) and coefficient of determination ( $R^2$ ).

## Results and discussion

### Geometric characteristics of the meshes

In the Table 1 average diameter thread lengths in both directions of the pores, the porosity and reduced ventilation rate for seven screens shown studied. Porosity presented four groups together, highlighting the anti-trips meshes M1 and M2; the anti-aphid M3, M4 and M7; the zenithal M5 and windbreaker M6, obtaining significant differences between types of mesh. The zenithal was the most porous mesh; i.e. presents less resistance to air flow passing through it. This

## Resultados y discusión

### Características geométricas de las mallas

En el Cuadro 1 se muestran los promedios del diámetro de hilo, longitudes en ambas direcciones de los poros, la porosidad y la reducción de la tasa de ventilación para las siete mallas estudiadas. La porosidad presentó cuatro agrupaciones entre sí, destacando las mallas anti-trips M1 y M2; las anti-áfidos M3, M4 y M7; la cenital M5 y la rompevientos M6, obteniendo diferencias significativas entre tipos de mallas. La malla cenital fue la más porosa; es decir, presenta menos resistencia al flujo de aire a su paso por ella. Este tipo de malla se coloca en las ventanas cenitales de los invernaderos debido a que allí se presenta alta velocidad de aire, lo que no permite el flujo de los insectos hacia el interior del invernadero.

type of mesh is placed in the greenhouse zenithal windows because there high air velocity, which does not allow the flow of insects into the greenhouse is presented.

Romero-Gomez *et al.* (2010) mention that when zenithal windows are located downwind although some act as air inlets, the remaining function as vents; the air entering through the zenith provides little aeration vents in the area of plants, however high speed air just develops on top of the greenhouse. This phenomenon occurs due to the geometric characteristics of the mesh used in greenhouses windows. Greenhouses in Mexico typically use anti-aphid mesh with porosity between 43 and 47% for the side windows and zenithal type.

Moreover, the meshes are more resistant windbreaker and anti-thrips. The first aim to reduce the harmful effects to the culture by high mechanical action of wind flows, reducing its

**Cuadro 1. Características geométricas de mallas típicas de invernaderos mexicanos.**

**Table 1. Geometrical characteristics typical of Mexican greenhouses meshes.**

Malla	$\rho_x \times \rho_y$ hilos pulg <sup>-1</sup>	D (mm)	Lx (mm)	Ly (mm)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	R (%)
Anti-trips (M1)	52x26	0.248	0.656	0.246	0.36c	41
Anti-trips bicolor (M2)	52x26	0.254	0.622	0.250	0.35c	42
Anti-áfidos (M3)	40x26	0.246	0.760	0.400	0.47b	28
Anti-áfidos bicolor (M4)	40x26	0.273	0.800	0.420	0.45b	30
Cenital (M5)	27x25	0.283	0.825	0.746	0.54a	21
Rompevientos verde-negro (M6)	44x22	0.359	0.847	0.260	0.29d	50
Anti-áfidos blanca (M7)	40x25	0.265	0.348	0.802	0.43b	33

Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).  $\rho_x$  y  $\rho_y$  = número de hilos por pulgada cuadrada en la dirección x y y; D= diámetro de hilo; Lx y Ly= longitud en la dirección x y y del poro;  $\alpha$ = porosidad; R= reducción de la tasa de ventilación.

Romero-Gómez *et al.* (2010) mencionan que cuando las ventanas cenitales se ubican a sotavento aunque algunas actúan como entradas del aire, las restantes funcionan como salidas de aire; el aire que entra a través de las ventilas cenitales proporciona poca aeración en la zona de las plantas, en cambio se desarrolla alta velocidad de aire justo en su parte superior del invernadero. Este fenómeno se presenta debido a las características geométricas de la malla usada en ventanas de invernaderos. Los invernaderos en México normalmente usan la malla del tipo anti-áfidos con porosidad entre 43 y 47% para las ventanas laterales y cenitales.

Por otra parte, las mallas con mayor resistencia son la rompevientos y las anti-trips. Las primeras tienen la finalidad de reducir los efectos nocivos al cultivo por acción mecánica de flujos altos de viento, reduciendo su velocidad

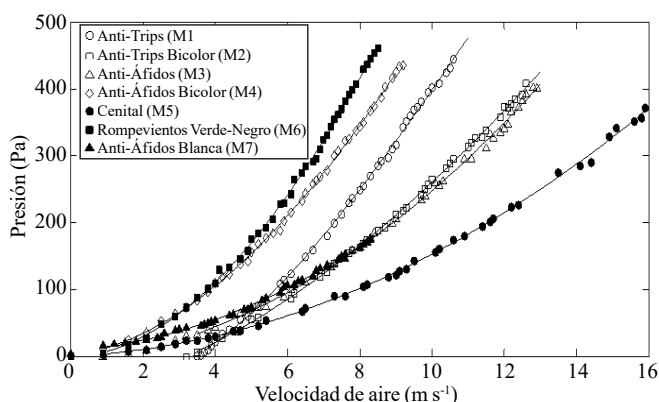
speed in the greenhouse; the latter are used in side windows to prevent serious damage to crops caused by insect pests of small size, particularly designed to prevent the entry of Thrips (eg, *Frankliniella occidentalis*). The anti-aphid nets are the most used in Mexican greenhouses because they are designed to prevent the entry aphid (*Aphis gossypii*) and whiteflies (eg *Bemisia argentifolii*, *Trialeurodes vaporariorum*, *B. tabaci*) (Teitel, 2007; Romero-Gomez *et al.*, 2010) which are the main transmitters of viral diseases insects.

Aerodynamic characteristics of the meshes. In the Figure 2 shows the complete behavior of the pressure drop as a function of the airspeed produced in the wind tunnel rotation speed of the fan 0 to 100%. The mesh green-black windbreaker, was the least porous, presented a pressure drop of 459.9 Pa and reached a maximum speed of 8.5 m s<sup>-1</sup> in the

en el interior del invernadero; las segundas son utilizadas en ventanas laterales para prevenir daños importantes a los cultivos causadas por insectos plaga de reducido tamaño, particularmente diseñadas para prevenir el ingreso de trips (por ejemplo, *Frankliniella occidentalis*). Las mallas anti-áfidos son las más usadas en invernaderos mexicanos porque están diseñadas para prevenir la entrada de áfidos (*Aphis gossypii*) y mosquitas blancas (por ejemplo, *Bemisia argentifolii*, *Trialeurodes vaporariorum*, *B. tabaci*) (Teitel, 2007; Romero-Gómez *et al.*, 2010) que son los principales insectos transmisores de enfermedades virales.

### Características aerodinámicas de las mallas

La Figura 2 muestra el comportamiento completo de la caída de presión en función de la velocidad del aire producida en el túnel de viento a velocidad de rotación de su ventilador de 0 a 100%. La malla rompevientos verde-negro, fue la menos porosa, presentó una caída de presión de 459.9 Pa y alcanzó una velocidad máxima de  $8.5 \text{ m s}^{-1}$  en el túnel de viento. A diferencia de la malla cenital que fue la más porosa, presentó una caída de presión de 371.7 Pa logrando una mayor velocidad de aire de  $15.9 \text{ m s}^{-1}$  en el túnel. La zona centro de México presenta una velocidad de viento máximas promedio de  $8.1 \text{ m s}^{-1}$ , registradas en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, D. F., en febrero durante el periodo de 2001 a 2008.



**Figura 2. Caída de presión en función de velocidad del aire medida en túnel de viento para siete mallas anti-insectos.**

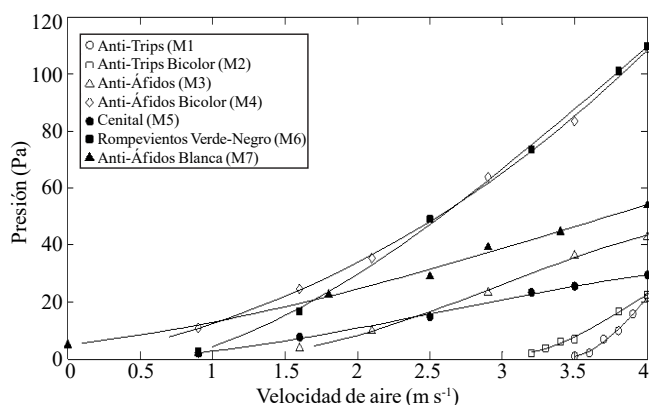
**Figure 2. Pressure drop depending on measured air speed wind tunnel seven anti-insect mesh.**

Tomando en cuenta la velocidad de viento máxima que se puede presentar en el Valle de México, se realizaron los análisis a velocidades de aire en el túnel de viento entre flujos de 0 a  $4 \text{ m s}^{-1}$ , 0 a  $6 \text{ m s}^{-1}$  y de 0 a  $8 \text{ m s}^{-1}$ . Similarmente, Romero-Gómez *et al.* (2010) analizaron mallas Anti-Insectos a velocidades de 0 a  $4 \text{ m s}^{-1}$ , y por su parte Valera *et al.* (2006) velocidades de flujo de aire hasta  $7 \text{ m s}^{-1}$ .

wind tunnel. Unlike the zenithal mesh was the most porous, presented a pressure drop of 371.7 Pa achieving greater air velocity of  $15.9 \text{ m s}^{-1}$  in the tunnel. The downtown area of Mexico has an average maximum wind speed of  $8.1 \text{ m s}^{-1}$ , registered in the Mexico City International Airport, D. F., in February during the period 2001-2008.

Taking into account the maximum wind speed that can occur in the Valley of Mexico, the analyzes were performed at air speeds in the wind tunnel between flows from 0 to  $4 \text{ m s}^{-1}$ , 0 to  $6 \text{ m s}^{-1}$  and of 0 to  $8 \text{ m s}^{-1}$ . Similarly, Romero-Gomez *et al.* (2010) analyzed anti-insect screens at speeds up to 0 to  $4 \text{ m s}^{-1}$ , and in turn Valera *et al.* (2006) air flow rates up to  $7 \text{ m s}^{-1}$ .

In the Figure 3 shows the relationship between pressure drop and air velocity of 0 to  $4 \text{ m s}^{-1}$  for the analyzed meshes. According to the statistical analysis, two groups with speeds up to  $4 \text{ m s}^{-1}$ , where the meshes M1, M2 and M6 have a pressure drop average of 20.44 Pa, 21.46 Pa y 40.54 Pa respectively were obtained. M3, M4, M5 and M7 meshes with average pressure drop 14.09 Pa, 14.67 Pa, 9.04 Pa y 14.33 Pa respectively, no statistically significant differences.



**Figura 3. Caída de presión en función de velocidad del aire (0 a  $4 \text{ m s}^{-1}$ ) de siete mallas anti-insectos.**

**Figure 3. Pressure drop as a function of air velocity ( $0$  to  $4$ ) seven anti-insect mesh.**

The Table 2 shows the coefficients A, B and C, best-fit result of the pressure drop depending on the air velocity of 0- $4 \text{ m s}^{-1}$ , and K, Y and  $C_2$  calculated according to Equations 14, 15 and 16.

For the flow of air velocity from 0 to  $6 \text{ m s}^{-1}$ , the pressure drop measured in the wind tunnel (Figure 4), divided into two statistically different categories based on the Tukey test: 1) in the first group, M4 and M6 mesh (average pressure drops 120.05 and 134.28 Pa, respectively); and 2) in the second group, M1, M2, M3, M5 and M7 (average pressure drop 50.08 Pa, 39.06 Pa, 51.85 Pa, 33.82 Pa, 60.91 Pa, respectively).

La Figura 3 presenta la relación entre la caída de presión y velocidad de aire de 0 a 4 m s<sup>-1</sup> para las mallas analizadas. De acuerdo con el análisis estadístico se obtuvieron dos agrupaciones con velocidades de hasta 4 ms<sup>-1</sup>, donde las mallas M1, M2 y M6 tienen una caída de presión promedio de 20.44 Pa, 21.46 Pa y 40.54 Pa respectivamente. Las mallas M3, M4, M5 y M7 con caídas de presión promedio de 14.09 Pa, 14.67 Pa, 9.04 Pa y 14.33 Pa respectivamente, no presentaron diferencias estadísticamente significativas.

El Cuadro 2 presenta los coeficientes A, B y C, resultado del mejor ajuste de la caída de presión en función de la velocidad del aire de 0 - 4 m s<sup>-1</sup>, y K, Y y C<sub>2</sub> calculados de acuerdo con las Ecuaciones 14, 15 y 16.

Para el flujo de velocidad del aire de 0 a 6 ms<sup>-1</sup>, la caída de presión medida en el túnel de viento (Figura 4), se agrupa en dos categorías estadísticamente diferentes en base a la prueba de Tukey: 1) en el primer grupo, malla M4 y M6 (caídas de presión promedio de 120.05 y 134.28 Pa, respectivamente); y 2) en el segundo grupo, M1, M2, M3, M5 y M7 (caídas de presión promedio de 50.08 Pa, 39.06 Pa, 51.85 Pa, 33.82 Pa, 60.91 Pa, respectivamente).

#### Cuadro 2. Coeficientes válidos para velocidad del aire de 0 a 4 m s<sup>-1</sup>.

Table 2. Coefficients valid for air velocity 0 to 4 m s<sup>-1</sup>.

Malla	A	B	C	SSE	R <sup>2</sup>	RMSE	K (m <sup>2</sup> )	Y (Adm)	C <sub>2</sub> (m <sup>-1</sup> )
(M1)	50.89	-339.7	566.20	1.83	0.99	0.78	2.660x10 <sup>-11</sup>	0.440	170754.55
(M2)	13.74	-72.9	94.57	1.48	0.99	0.70	1.273x10 <sup>-10</sup>	0.253	44870.09
(M3)	3.07	-0.78	-1.02	15.98	0.98	2.30	1.149x10 <sup>-08</sup>	0.557	10382.06
(M4)	5.35	5.12	2.003	9.85	0.99	1.81	1.947x10 <sup>-09</sup>	0.359	16256.79
(M5)	0.24	7.93	-5.50	3.18	0.99	1.02	1.304x10 <sup>-09</sup>	0.012	691.81
(M6)	4.47	13.02	-13.35	9.89	0.99	1.81	1.008x10 <sup>-09</sup>	0.164	10324.96
(M7)	1.22	7.501	4.95	10.20	0.99	1.84	1.287x10 <sup>-09</sup>	0.069	3832.89

Coeficientes A, B y C para el mejor ajuste de la ecuación ( $\Delta P = Au^2 + Bu + C$ ); RMSE= raíz del error cuadrático medio; SSE= suma de los cuadrados debido al error; R<sup>2</sup>= coeficiente de determinación; K permeabilidad; Y= factor inercial; C<sub>2</sub>= coeficiente de pérdida inercial.

Los coeficientes A, B y C del polinomio de segundo grado obtenido del mejor ajuste de las curvas de caída de presión contra velocidad del aire en el flujo de 0 - 6 m s<sup>-1</sup>, y K, Y y C<sub>2</sub> calculados de acuerdo a las ecuaciones 14, 15 y 16, se presentan en el Cuadro 3.

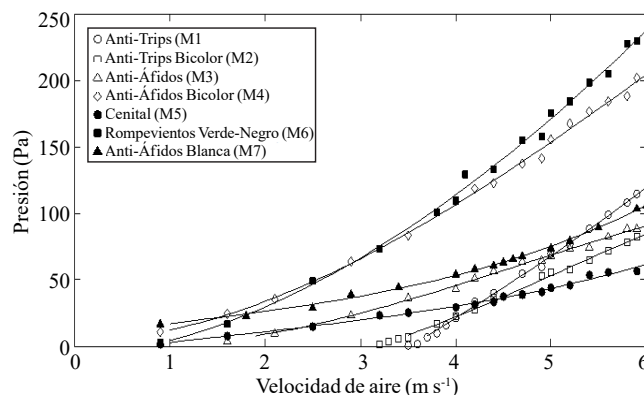


Figura 4. Caída de presión calculada en función de la velocidad del aire (0 a 6 m s<sup>-1</sup>) para las siete mallas anti-insectos.  
Figure 4. Pressure drop calculated as a function of air velocity (0 to 6 m s<sup>-1</sup>) for the seven anti-insect mesh.

The coefficients A, B and C of the quadratic polynomial obtained from best fit curves pressure drop against air velocity in the flow of 0 - 6 m s<sup>-1</sup>, and K, Y and C<sub>2</sub> calculated according to equations 14, 15 and 16, are presented in Table 3.

Figure 5 shows the curves of pressure drop as a function of air velocity of 0 to 8 m s<sup>-1</sup>, which is grouped into three categories where significant differences. The first group was composed of meshes M4 and M6 with average pressure

drops of the 88.86 Pa and 216.55 Pa, respectively; the second group was composed of M1 and M7 with a pressure drop Average 111.69 Pa and 91.95 Pa, respectively; and the third group consisted of M2, M3 and M5 with average pressure drop 76.79 Pa, 83.46 Pa and 53.36 Pa, respectively.

**Cuadro 3. Coeficientes válidos para velocidad del aire de 0 a 6 m s<sup>-1</sup>.****Table 3. Coefficients valid for air velocity of 0 to 6 m s<sup>-1</sup>.**

Malla	A	B	C	SSE	R <sup>2</sup>	RMSE	K (m <sup>2</sup> )	Y (Adm)	C <sub>2</sub> (m <sup>-1</sup> )
M1	1.92	29.88	-129.2	43.16	0.99	1.82	3.024x10 <sup>-10</sup>	0.06	6435.59
M2	1.39	17.52	-69.6	52.08	0.99	2.00	5.299x10 <sup>-10</sup>	0.05	4539.26
M3	1.73	6.58	-8.74	70.05	0.99	2.32	1.362x10 <sup>-09</sup>	0.11	5857.24
M4	3.65	13.54	-6.23	173.3	0.99	3.65	7.368x10 <sup>-10</sup>	0.15	11085
M5	1.20	2.95	-0.60	42.06	0.98	1.79	3.507x10 <sup>-09</sup>	0.10	3520.62
M6	5.10	11.14	-12.35	261.4	0.99	4.48	1.178x10 <sup>-09</sup>	0.20	11787.74
M7	2.73	-1.93	17.7	46.94	0.99	1.9	4.999x10 <sup>-09</sup>	0.30	8560.44

Coeficientes A, B y C para el mejor ajuste de la ecuación ( $\Delta P = Au^2 + Bu + C$ ); RMSE= raíz del error cuadrático medio; SSE= suma de los cuadrados debido al error; R<sup>2</sup>= coeficiente de determinación; K permeabilidad; Y= factor inercial; C<sub>2</sub>= coeficiente de pérdida inercial.

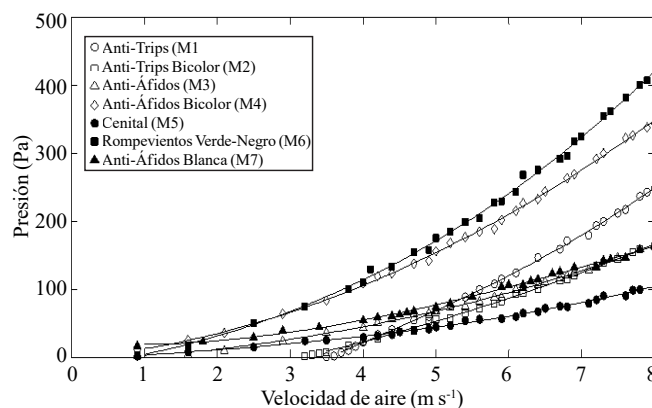
La Figura 5 muestra las curvas de caída de presión en función de la velocidad del aire de 0 a 8 m s<sup>-1</sup>, que se agrupan en tres categorías donde presentan diferencias significativas. El primer grupo estuvo integrado por las mallas M4 y M6 con caídas de presión promedio de 188.86 Pa y 216.55 Pa, respectivamente; el segundo grupo se integró por M1 y M7 con una caída de presión promedio de 111.69 Pa y 91.95 Pa, respectivamente; y el tercer grupo estuvo conformado por M2, M3 y M5 con caídas de presión promedio de 76.79 Pa, 83.46 Pa y 53.36 Pa, respectivamente.

El Cuadro 4 presenta los coeficientes A, B y C, resultantes del modelo de regresión de segundo grado para las mallas analizadas, válido para velocidades del aire de 0-8 m s<sup>-1</sup>; también se presentan los coeficientes K, Y y C<sub>2</sub>, calculados con las ecuaciones 14, 15 y 16, para las siete mallas analizadas. Los resultados obtenidos son similares a los registrados por Álvarez *et al.* (2006), dado que en su muestra 6 y la M6 del presente estudio, son similares en su valor de porosidad, al obtener un valor de un 20% menos en K y 21% mayor en Y.

**Cuadro 4. Coeficientes válidos para velocidad del aire de 0 a 8 m s<sup>-1</sup>.****Table 4. Coefficients valid for air velocity of 0 to 8 m s<sup>-1</sup>.**

Malla	A	B	C	SSE	R <sup>2</sup>	RMSE	K (m <sup>2</sup> )	Y (Adm)	C <sub>2</sub> (m <sup>-1</sup> )
M1	3.43	15.41	-95.68	155.1	0.99	2.49	5.863x10 <sup>-10</sup>	0.14	11502.19
M2	1.91	12.93	-59.9	94.84	0.99	1.95	7.180x10 <sup>-10</sup>	0.08	6243.93
M3	2.18	3.62	-4.97	105.4	0.99	2.05	2.476x10 <sup>-09</sup>	0.18	7358.75
M4	4.23	9.94	-2.09	309.5	0.99	3.52	1.003x10 <sup>-09</sup>	0.20	12853.49
M5	1.36	1.82	0.99	102.1	0.99	2.02	5.692x10 <sup>-09</sup>	0.15	3972.05
M6	5.83	6.26	-6.11	669.4	0.99	5.18	2.095x10 <sup>-09</sup>	0.31	13472.37
M7	2.06	2.74	11.22	187.5	0.99	2.74	3.531x10 <sup>-09</sup>	0.19	6472.91

Coeficientes A, B y C para el mejor ajuste de la ecuación ( $\Delta P = Au^2 + Bu + C$ ); RMSE= raíz del error cuadrático medio; SSE= suma de los cuadrados debido al error; R<sup>2</sup>= coeficiente de determinación; K permeabilidad; Y= factor inercial; C<sub>2</sub>= coeficiente de pérdida inercial.

**Figura 5. Caída de presión calculada en función de la velocidad del aire (0 a 8 m s<sup>-1</sup>) para siete mallas anti-insectos.****Figure 5. Pressure drop calculated as a function of air velocity (0 to 8 m s<sup>-1</sup>) seven anti-insect mesh.**

In the Table 4 presents the coefficients A, B and C, resulting regression model for the analyzed second degree meshes, valid for air velocities of 0-8 m s<sup>-1</sup>; coefficients K, Y and C<sub>2</sub> are also presented, calculated with equations 14, 15



## Conclusiones

El análisis geométrico permitió determinar las porosidades de siete mallas con el fin de estimar la reducción en la tasa de ventilación. La porosidad de las mallas osciló entre 0.29 a 0.54, para una reducción teórica en los valores de tasa de ventilación entre 21 y 50%, respectivamente. Las características aerodinámicas de las mallas analizadas son afectadas por la velocidad del flujo de aire, obteniendo valores promedio de permeabilidad ( $2.186 \times 10^{-09}$ ) y factor inercial (0.194). A velocidades menores de  $4 \text{ m s}^{-1}$  las mallas mostraron dos agrupaciones con diferencia significativa. a) anti-trips y rompevientos; y b) anti-áfidos y cenital. A velocidades de 6 a  $8 \text{ m s}^{-1}$ , hubo tres categorías con diferencias significativas. a) rompevientos; b) anti-trips; y c) anti-áfidos y cenitales.

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su reconocimiento al Laboratorio de Energía del DIMA, y al Laboratorio de Ingeniería de la Madera de DICIFO de la Universidad Autónoma Chapingo, por el apoyo brindado mediante sus equipos (túnel de viento y microscopio).

## Literatura citada

- Álvarez, A. J.; Valera, D. L. and Molina-Aiz, F. D. 2006. A method for the analysis of the geometric characteristics of protection screens. *Acta Hortic.* 719:557-564.
- Álvarez, A. J.; Oliva, R. M. and Valera, D. L. 2012. Software for the geometric characterization of insect-proof screens. *Comp. Electr. Agric.* 82:134-144.
- Cabrera, F. J.; López, J. C.; Baeza, E. J. and Pérez-Parra, J. 2006. Efficiency of anti-insect screens placed in the vents of Almería greenhouses. *Acta Hortic.* 719:605-614.
- Campan, J. B. and Bot, G. P. A. 2003. Determination of greenhouse specific aspects of ventilation using three dimensional computational fluid dynamics. *Bios. Eng.* 84(1):69-77.
- Castilla, N. 2013. Greenhouse technology and management. CABI. Second Edition. Boston, MA, USA. 143 p.
- Fatnassi, H.; Boulard, T. and Bouirden, L. 2003. Simulation of climatic conditions in full-scale greenhouse fitted with insect-proof screens. *Agric. For. Meteorol.* 118(1):97-111.
- Flores-Velázquez, J. and Montero, J. I. 2008. Computational fluid dynamics CFD study of large scale screenhouses. *Acta Hortic.* 797:117-122.
- and 16, for the seven analyzed meshes. The results are similar to those recorded by Alvarez *et al.* (2006), since in their sample 6 and the M6 the present study are similar in porosity value, to obtain a value of 20% in K and 21% higher in Y.

## Conclusions

The geometric analysis identified seven porosities meshes in order to estimate the reduction in the ventilation rate. The porosity of the mesh ranged from 0.29 to 0.54, for a theoretical reduction in the ventilation rate values between 21 and 50%, respectively. Aerodynamic characteristics of the meshes analyzed are affected by the air flow rate, obtaining average values of permeability ( $2.186 \times 10^{-09}$ ) and inertial factor (0.194). At speeds less than  $4 \text{ m s}^{-1}$  meshes shown two groups with significant difference. a) anti-thrips and windbreaker; and b) anti-aphid and zenithal. At speeds 6 to  $8 \text{ m s}^{-1}$  there were three categories with significant differences. a) windbreaker; b) anti-thrips; and c) anti-aphid and zenith.

*End of the English version*



- Miguel, A. F.; Van de Braak, N. J. and Bot, G. P. A. 1997. Analysis of the airflow characteristics of greenhouse screening materials. *J. Agric. Eng. Res.* 67(2):105-112.
- Miguel, A. F.; Van de Braak, N. J.; Silva, A. M. and Bot, G. P. A. 1998. Physical modeling of natural ventilation through screens and windows in greenhouses. *J. Agric. Eng. Res.* 70(2):165-176.
- Molina-Aiz, F. D.; Valera, D. L. and Álvarez, A. J. 2004. Measurement and simulation of climate inside Almería-type greenhouse using computational fluid dynamics. *Agric. For. Meteorol.* 125(1):33-51.
- Montero, J. I. and Antón, A. 2000. Buoyancy driven ventilation in tropical greenhouses. *Acta Hortic.* 534:41-55.
- Pérez-Parra, J.; Baeza, E.; Montero, J. I. and Bailey, B. J. 2004. Natural ventilation of parral greenhouses. *Biosystems Eng.* 87(3):355-366.
- Romero-Gómez, P.; Choi, C. Y. and Lopez, C. I. L. 2010. Enhancement of the greenhouse air ventilation rate under climate conditions of central Mexico. *Agrociencia.* 44(1):1-15.
- SAS Institute. 2009. SAS user's guide. Statistics. Version 8. SAS Inst., Cary, NC. USA. Quality, and elemental removal. *J. Environ. Qual.* 7886p.
- Teitel, M. 2001. The effect of insect-proof screens in roof openings on greenhouse microclimate. *Agric. For. Meteorol.* 110(1):13-25.
- Teitel, M. 2007. The effect of screened openings on greenhouse microclimate. *Agric. For. Meteorol.* 143(3):159-175.
- Teitel, M. 2010. Using computational fluid dynamics simulations to determine pressure drops on woven screens. *Bios. Eng.* 105(2):172-179.

- Teitel, M.; Liron, O.; Haim, Y. and Seginer, I. 2008. Flow through inclined and concertina-shape screens. *Acta Hortic.* 801:99-106.
- Valera, D. L.; Molina-Aiz, F. D.; Álvarez, A. J.; López, J. A.; Terres-Nicoli, J. M. and Madueno, A. 2005. Contribution to the characterization of insect-proof screens: experimental measurements in wind tunnel and CFD simulations. *Acta Hortic.* 691:441-448.
- Valera, D. L.; Álvarez, A. J. and Molina, F. D. 2006. Aerodynamic analysis of several insect-proof screens used in greenhouses. *Spanish J. Agric. Res.* 4(4):273-279.
- Von-Zabeltitz, C. 2011. Integrated greenhouse systems for mild climates: climate conditions, design, construction, maintenance, climate control. Springer. New York. USA. 233-250 pp.