



DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS AERODINÁMICOS DE SETOS DE BUGAMBILIA (*Bougainvillea spectabilis*) COMO CORTINAS ROMPEVIENTOS

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF AERODYNAMIC PARAMETERS OF BUGAMBILIA (*Bougainvillea spectabilis*) HEDGES AS A WINDBREAK

Alexander Laffita Leyva^{1a*}, Arturo Martínez Rodríguez^{1b}, Pedro A. Valdés Hernández^{1c}, Emmanuel Ávila González² y René O. Rodríguez Grimón³

^{1a}Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Cuba

<https://orcid.org/0000-0001-5584-4786>

^{1b}Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Cuba

<http://orcid.org/0000-0002-0539-1114>

^{1c}Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Cuba

<https://orcid.org/0000-0002-8570-0895>

²Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IIAGRI), Ciudad Habana, Cuba

<https://orcid.org/0000-0002-0555-3152>

³Universidad Espíritu Santo, Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-2758-8241>

* Autor para correspondencia E-mail: alexl@unah.edu.cu

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar experimentalmente los parámetros aerodinámicos de setos de Bugambilia a emplear como cortina rompevientos para su caracterización como medios porosos en los programas comerciales de dinámica de fluido computacional. Esta investigación pertenece a un proyecto aprobado por el Programa Nacional de Energía de Cuba. Muestras de setos de Bugambilia con densidad aparente del follaje de $7,19 \text{ kg m}^{-3}$ fueron sometidas a la acción de corrientes de aire en un túnel aerodinámico construido en el Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA) de la Universidad Agraria de La Habana. El diseño experimental contempló tres niveles de profundidad de la cortina (1; 1,5 y 2 m) y cuatro niveles del flujo volumétrico del aire (entre $5,2$ y $7,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tres niveles de profundidad en términos de porosidad aerodinámica de la cortina (ϵ_{ad}), con valores promedio ϵ_{ad} de $0,77 \pm 0,05$; $0,70 \pm 0,07$ y $0,64 \pm 0,08$; k_p resistencia al paso del fluido por la cortina (k_p), con valores promedio de $6,39$; $9,96$ y $12,69 \text{ s}^{-1}$; y coeficiente de arrastre, con valores de $0,35$; $0,55$ y $0,89$ para 1; 1,5 y 2 m de profundidad, respectivamente. Se obtuvo modelos estadísticos lineales para la predicción de la diferencia de presión (ΔP_t) en función del flujo volumétrico, con coeficientes de determinación de $0,68$; $0,77$ y $0,78$ para los tres niveles de profundidad de la cortina estudiados.

Palabras clave: Coeficiente de arrastre; diferencia de presión y caudal; medios porosos; porosidad aerodinámica.

ABSTRACT

The objective of this study was to determine experimentally the aerodynamic parameters of Bugambilia hedges to be used as a windbreak for their characterization as porous media in commercial programs of computational fluid dynamics. This research is part of a project approved by the National Energy Program of Cuba. Samples of Bugambilia hedges with apparent foliage density of 7.19 kg m^{-3} were subjected to the action of air currents in an aerodynamic tunnel built in the Center for Agricultural Mechanization (CEMA) of the Agrarian University of Havana. The experimental design included three depth levels of the windbreak (1, 1.5 and 2 m) and four levels of the volumetric air flow (between 5.2 and $7.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Statistically significant differences were found between the three depth levels in terms of aerodynamic porosity of the windbreak (ϵ_{ad}), with average values of 0.77 ± 0.05 , 0.70 ± 0.07 and 0.64 ± 0.08 ; resistance of the windbreak (k_p) to fluid flow, with average values of 6.39, 9.96 and 12.69 s^{-1} ; and drag coefficient, with values of 0.35, 0.55 and 0.89 for depths of 1, 1.5 and 2 m, respectively. Linear statistical models were obtained for the prediction of the pressure difference (ΔP_t) in function of volume flow, with coefficients of determination of 0.68, 0.77 and 0.78 for the three depth levels of the windbreak studied.

Keywords: Aerodynamic porosity; drag coefficient, pressure difference and volume flow rate; porous media.

INTRODUCCIÓN

La alta susceptibilidad a la formación de ciclones tropicales en el océano Atlántico, constituyen un peligro potencial para los países del área del Caribe. Buena parte de estos eventos hidrometeorológicos se desarrollan y alcanzan categorías de huracán. En la actualidad, por la mayor influencia de los efectos del evento El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) y del cambio climático, los huracanes alcanzan con mayor frecuencia categorías 3, 4 o 5 de la escala Saffir Simpson, causando severas destrucciones en objetivos económicos. Por lo general, los cultivos, las instalaciones agropecuarias, los campos fotovoltaicos y otros componentes de la infraestructura rural se encuentran en zonas descubiertas, estando propensas a la incidencia de vientos extremos producidos por esos eventos meteorológicos (López et al., 2016; Ríos, 2017).

Dada esta situación, así como el costo económico, social y medioambiental que impone el paso de los huracanes, es conveniente ejecutar estudios del efecto de los vientos huracanados sobre determinados objetivos agrícolas. Este ha sido un tema complejo de abordar desde el punto de vista experimental, ya que sólo es posible reproducir estos fenómenos y sus efectos en túneles aerodinámicos de grandes proporciones, aplicando técnicas de la teoría de semejanza y confeccionando maquetas de los objetivos a impactar por el viento.

Hoy en día, con los avances de la computación y la existencia de programas especializados en el análisis de dinámica de fluidos, basado en métodos numéricos de elementos finitos (CFD, Computational Fluid Dynamics), es posible

abordar este tipo de estudio mediante la simulación numérica, con un alto grado de aproximación. Con estas herramientas ha sido evaluado, el efecto de vientos sobre objetivos económicos, así como el empleo de cortinas rompevientos como medios de protección ante la acción de los vientos (Ferreira y Sanchez, 2009; Speckart y Pardyjak, 2014; Laffita et al., 2021; Guo et al., 2021).

Dentro de las especies a considerar en Cuba para el fomento de cortinas rompevientos, se encuentra la Bugambilia (*Bougainvillea spectabilis*), arbustos trepadores que pueden ser podados y crecen en cualquier tipo de suelo. Los tallos son leñosos, alcanzan hasta los 8 m y se enredan en otras plantas usando sus afiladas espinas. Son plantas siempre verdes en las zonas lluviosas todo el año, o bien caducifolias en las de estación seca y pueden resistir largas sequías (Ramírez, 2012), lo cual la hace factible para su empleo como barreras o cercos vivos y otros sistemas agroforestales.

Numerosas investigaciones han estado dirigidas a obtener la configuración y estructura óptima de cortinas rompevientos conformadas por árboles y/o arbustos para la protección de cultivos y objetivos económicos, así como evitar la deriva de agroquímicos y la erosión del suelo (Gillies et al., 2002; Grala, 2004; Frank y Ruck, 2005; Wu et al., 2015; Dafa-Alla y Al-Amin, 2016; Řeháček et al., 2017; Miri et al., 2018; Oberschelp et al., 2020).

La efectividad de la protección y el área de la zona a proteger por la cortina depende de parámetros que caracterizan su estructura, tales como: la porosidad, la densidad del follaje y su forma y dimensiones, así como, de condiciones medioambientales tales como la dirección e intensidad del viento (Wang et al., 2001; Oberschelp

et al., 2020; Davel et al., 2021). Autores como Wang y Takle (1997) y Zhou et al. (2004) refieren que la estructura de las cortinas rompevientos puede ser caracterizada por una combinación de la estructura interna (la porosidad, permeabilidad, densidad del follaje) y la estructura externa (la forma, longitud, altura, ancho). Sin embargo, según Wang y Takle (1997), el efecto de protección que genera la forma de la cortina no ha sido bien demostrado, al no contarse con estudios teóricos y numéricos en este sentido.

Estudios sobre la porosidad de la cortina (Wu et al., 2018) sugieren como óptimos, rangos de porosidad óptica entre 20 y 40% en términos de reducción de la velocidad del viento sobre la zona de influencia de la cortina. Sin embargo, la porosidad óptica en cortinas naturales es muy compleja y difícil de determinar debido al tamaño, la forma irregular y la variada distribución de los poros en árboles y/o arbustos.

Asimismo, algunos autores (Heisler y Dewalle, 1988; Wu et al., 2018) señalan que dicho parámetro continúa siendo objeto de polémicas debido a las discordancias y a la dificultad para interpretarlos. Considerando dicha dificultad, la alternativa más práctica, según Guan et al. (2003), es obtener la porosidad aerodinámica, la que definen como: el cociente entre la velocidad promedio del viento antes de la interferencia con la cortina y la velocidad promedio inmediatamente a sotavento

desde el fondo hasta la cima de la cortina, criterio que ha sido compartido por autores como Vigiak et al. (2003) y Bitog et al. (2011).

Por otro lado, la permeabilidad es otro término empleado para caracterizar el vector de resistencia del medio poroso con respecto a la penetración por un fluido newtoniano, o la capacidad que tiene el medio poroso para permitir el movimiento del fluido bajo el efecto de un gradiente de presión.

Considerando las investigaciones realizadas, el efecto de protección que pueden brindar las cortinas rompevientos de Bugambilia a objetivos agrícolas ante el impacto de vientos no ha sido abordado en Cuba, por lo que se plantea como objetivo del trabajo determinar experimentalmente los parámetros aerodinámicos que caracterizan la resistencia del medio poroso al paso del fluido y que constituyen parámetros de entrada a los programas comerciales de Dinámica de Fluidos Computacional.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de las plantaciones de Bugambilia

Las muestras de Bugambilia para la conformación de los setos, se tomaron de las plantaciones ubicadas en las áreas de la Facultad de Ciencias Técnicas (22°59'N-82°08'O) de la Universidad Agraria de la Habana (Fig. 1) en el

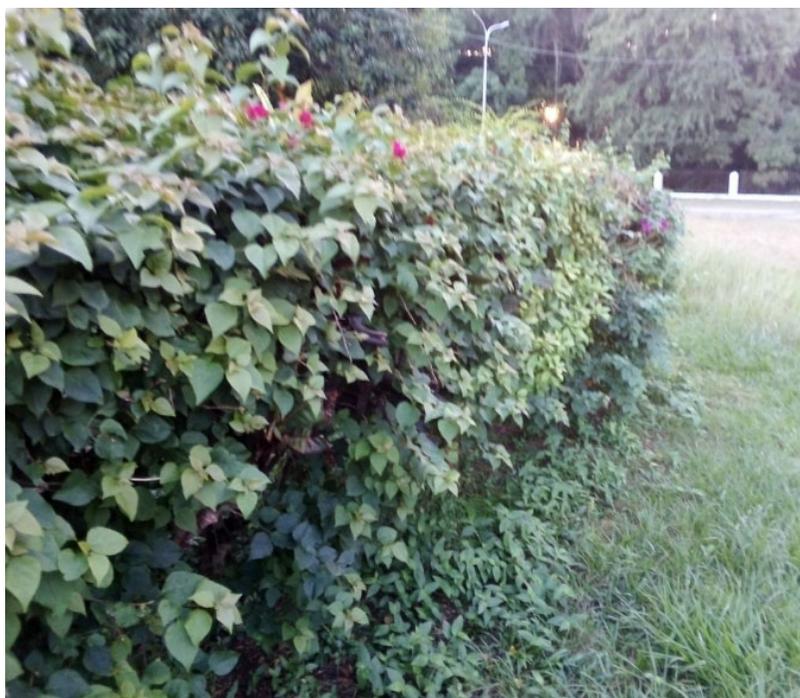


Fig. 1. Seto de Bugambilia.

Fig. 1. Bugambilia hedge.

año 2017 en los meses de abril y mayo. Dicha especie tienen aproximadamente 2 años de plantadas y se caracterizan por presentar una adecuada uniformidad en cuanto a la densidad de su follaje, motivo por el cual fueron seleccionadas como cortinas en la experimentación realizada. Los arbustos fueron cortados por el tallo al nivel de la superficie del suelo en horario de la mañana e inmediatamente trasladados hacia la instalación experimental.

Caracterización de la instalación experimental para determinar los parámetros aerodinámicos

Para llevar a cabo la investigación se diseñó, construyó y validó una instalación experimental (Laffita et al., 2020) en el Centro de Mecanización Agropecuaria de la Universidad Agraria de la Habana. En la Fig. 2 se presenta el túnel aerodinámico empleado al cual se le acopló un ventilador axial con salida radial modelo 71-355 971/KU, accionado por un multiplicador con cuatro posibilidades de relación de transmisión y éste a su vez por un motor eléctrico de 7,5 kW con 1 750 rpm mediante una transmisión por correa. La máxima velocidad del aire en el interior del túnel, libre de obstáculos, alcanza $26,5 \text{ m s}^{-1}$ (95 km h^{-1}).

Las muestras de setos de Bugambilia fueron confinadas, mediante guías de sujeción sobre

una estructura metálica, en el interior del túnel ocupando la sección transversal de la zona de prueba, dejando algún espacio libre de follaje en la zona comprendida entre la parte inferior de las muestras y el fondo de la estructura metálica, así como entre el follaje y las paredes laterales y superior del túnel. Un procedimiento similar fue empleado por Bitog et al. (2011). Dicha zona se caracteriza por una sección transversal cuadrada con lados de 620 mm y una longitud de 3 400 mm, en la cual se definieron cuatro planos de medición para la adquisición de los datos de presión dinámica y total. El primer plano de medición se situó a 500 mm de la entrada, garantizándose una distancia de $140 \pm 20 \text{ mm}$, entre cada plano y las muestras del arbusto objeto de estudio, para evitar zonas locales de turbulencia en las inmediaciones de las mismas. En la entrada del túnel se colocó un enrejado tipo “panal de abejas” para contribuir a laminarizar el flujo.

En cada plano fueron habilitados, al costado del túnel, tres orificios de acceso para facilitar la introducción de un Tubo de Prandtl destinado a la toma de muestras de presiones total y estática en el interior del túnel. La distribución de los puntos de medición se muestra en la Fig. 2c, garantizándose que los mismos se encuentren en la zona aleadaña al follaje y alejados de los bordes del túnel.

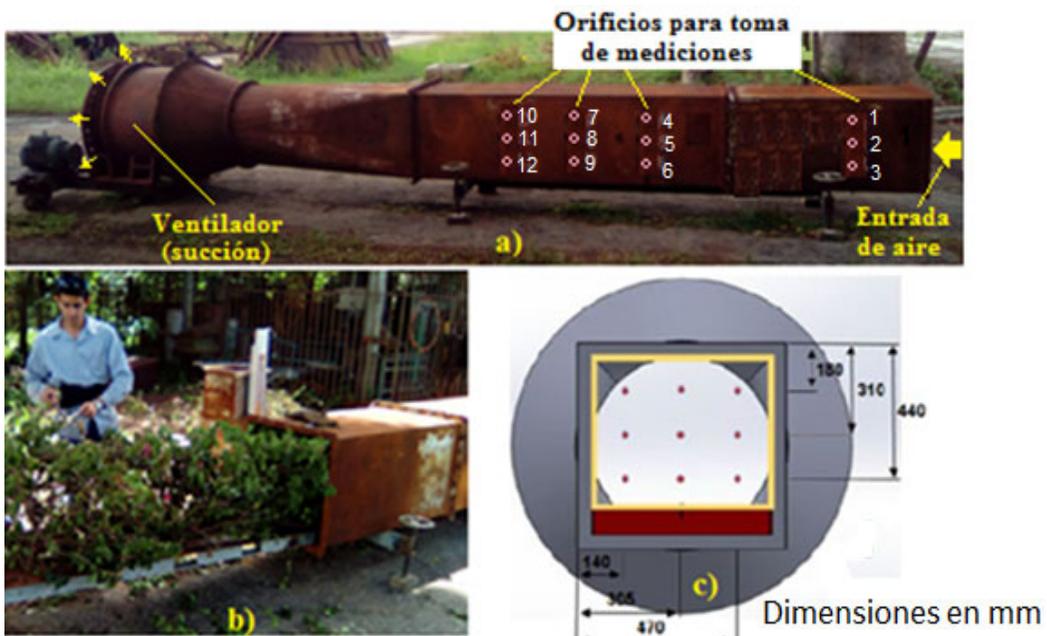


Fig. 2. Túnel aerodinámico empleado: a) Vista general del túnel; b) Introducción de las muestras al interior del túnel; c) Distribución de los puntos de medición para la presión.

Fig. 2. Wind tunnel used: a) Tunnel overview; b) Introduction of samples into the tunnel; c) Distribution of measuring points for pressure.

Los orificios fueron revestidos con goma para evitar el flujo de aire por los mismos durante el proceso de toma de muestras.

Diseño de las corridas experimentales

Como variable dependiente se establece la permeabilidad de la cortina rompevientos (k_p) y como independientes se definen dos variables:

- Flujo volumétrico del fluido en el interior del túnel aerodinámico (Q) con cuatro niveles de variación de acuerdo a la Tabla 1, obtenido a través del multiplicador de velocidad y determinado a partir de las lecturas de velocidad procedentes de un anemómetro digital modelo PROVA AVM-01 con precisión de 0,1 m/s
- Profundidad del follaje del arbusto confinado (L_{cB}) con tres niveles de variación de acuerdo a la Tabla 1.

Se definió un diseño de naturaleza factorial 4x3 para un total de 12 tratamientos a realizar durante las corridas experimentales. Por cada tratamiento se realizaron tres repeticiones para un total de 36 corridas.

En la Tabla 1 se muestran las diferentes combinaciones de tratamientos de las variables empleadas en la investigación.

Como variable de control se define la temperatura ambiente que es medida con la ayuda de un sensor de temperatura incorporado al anemómetro digital PROVA AVM-01 con una precisión de 0,1°C.

Determinación de los parámetros aerodinámicos de la cortina

Las mediciones son realizadas un minuto después de energizado el ventilador axial, de manera que la velocidad y presión alcancen una estabilidad en el interior del túnel. El tiempo de duración para cada una de las velocidades en estudio no superó los 10 minutos lo cual totaliza aproximadamente 40 minutos para cada muestra, garantizándose la turgencia de las mismas.

La porosidad efectiva aerodinámica (ε_{ad}) se determinó como el cociente entre la velocidad promedio del aire después (v_{sot}) y antes (v_{barl}) de la cortina en estudio, acorde a Bitog et al. (2011), según la expresión:

$$\varepsilon_{ad} = \frac{v_{sot}}{v_{barl}} \quad (1)$$

Siendo, la velocidad del aire en los puntos de medición obtenida indirectamente con la presión dinámica, a través de un tubo de Prandtl acoplado a un manómetro diferencial con una precisión de 7,7 Pa a partir de la siguiente ecuación:

$$v = \sqrt{\frac{2 * g * \gamma_{C_2H_4} \Delta h}{\gamma_{aire}}} \quad , \text{ m s}^{-1} \quad (2)$$

donde:

g : aceleración de la gravedad, 9,8 m s⁻²;

$\gamma_{C_2H_4}$: peso específico del líquido manométrico (alcohol), 7 742 N m⁻³;

γ_{aire} : peso específico del aire a temperatura ambiente de 26°C, 12,74 N m⁻³;

Δh : diferencia de altura obtenida del manómetro diferencial expresado en metros de columna de alcohol (proporcional a la presión dinámica).

La resistencia del medio poroso (k_p) se determinó, a partir de los resultados obtenidos experimentalmente, empleando una de las expresiones recomendadas según el documento Technical Reference SolidWork Flow Simulation, (2018):

$$k_p = \frac{\Delta P_t * S}{Q * \rho_a * L_{cB}} \quad , \text{ s}^{-1} \quad (3)$$

donde:

ΔP_t : diferencia de presión total antes y después de la cortina, Pa

Q : flujo volumétrico, m³ s⁻¹

ρ_a : densidad del aire, kg m⁻³

S : sección transversal de la zona de prueba, m²

L_{cB} : profundidad del follaje de la cortina, m

Durante la simulación numérica, el programa SolidWork Flow Simulation trata al fluido con condición laminar en el interior del medio poroso, por lo que, en primera instancia al no considerarse un flujo turbulento, esta investigación es un análisis preliminar de las barreras. Un análisis con especial énfasis en verificar estas características particulares del flujo generado corriente abajo por la especie vegetal estudiada será desarrollado posteriormente.

Tabla 1. Tratamientos and variables empleadas.
Table 1. Treatments and variables used.

Tratamientos												
Variables	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
Q, m ³ s ⁻¹	5,2	5,8	6,8	7,5	5,2	5,8	6,8	7,5	5,2	5,8	6,8	7,5
L_{cB} , m	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	2	2	2	2

Q: Flujo volumétrico del fluido; L_{cB} : Profundidad del follaje

El coeficiente de arrastre (C_d) se determinó como el cociente entre la diferencia de presión estática (ΔP_{est}) antes y después de la cortina y la presión dinámica (P_{din}) del fluido antes de la cortina, acorde a Bitog et al. (2011), según la expresión:

$$C_d = \frac{\Delta P_{est}}{P_{din}} \quad (4)$$

Determinación de la densidad aparente del follaje (ρ_{CB})

La densidad aparente del follaje y tallos del arbusto de Bugambilia colocados en la zona de prueba (ρ_{CB}), se obtuvo empleando la siguiente expresión:

$$\rho_{CB} = \frac{M_{CB}}{S * L_{CB}} \quad , \text{ kg m}^{-3} \quad (5)$$

donde:

ρ_{CB} : masa de hojas y tallos del seto de Bugambilia, kg.

Procesamiento estadístico

Los datos obtenidos experimentalmente fueron procesados en el programa Statgrafics donde se realizó un análisis descriptivo, un análisis de varianza para identificar si existen diferencias significativas entre los tratamientos realizados y un análisis de regresión simple, para determinar la dependencia funcional entre la diferencia de presión antes y después de la cortina y la velocidad del aire en la zona de prueba.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se muestran, como resultado de las mediciones experimentales, los valores medios de diferencia de presión total (ΔP_t) en los diferentes planos de medición, flujo volumétrico (Q), porosidad aerodinámica (ϵ_{ad}) y resistencia al paso del fluido (k_p) para las profundidades en estudio de la cortina de Bugambilia. El análisis de varianza realizado a los parámetros aerodinámicos de la cortina arrojó que existe diferencias estadísticamente significativas (p-valor menor a 0,05) entre los valores medios para los tratamientos estudiados. Para todos los casos se aprecia una relación directamente proporcional del incremento de la diferencia de presión con respecto al aumento de las longitudes del follaje e inversamente proporcional para el caso de la porosidad, lo que se corresponde con el aspecto físico del ensayo.

A partir del análisis de varianza realizado se pudo constatar que en cada plano de medición, no existen diferencias estadísticamente significativas de la presión dinámica y total en las zona superior de los setos (puntos de acceso 1 y 2; 4 y 5; 7 y 8; 10 y 11, según Fig. 2), con respecto a la zona inferior de los tallos y parte del follaje (punto de acceso 3; 6; 9 y 12), por lo que se garantizó una densidad aparente del follaje (uniforme de $7,19 \pm 0,66 \text{ kg m}^{-3}$ para los tratamientos evaluados. La temperatura del aire durante las mediciones se mantuvo en el entorno de los $26,4^\circ\text{C}$, no presentándose variaciones apreciables de la temperatura durante la realización de las mediciones.

Tabla 2. Resultados experimentales de los parámetros aerodinámicos.
Table 2. Experimental results of the aerodynamic parameters.

L_{CB} m	ΔP_t Pa		Q , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$		ϵ_{ad}		C_d		k_p s^{-1}
	\bar{X}	Desv Std	\bar{X}	Desv Std	\bar{X}	Desv Std	\bar{X}	Desv Std	
1	98,93	21,12	5,70	0,55	0,77	0,05	0,35	0,02	6,39
	149,68	33,06	6,46	0,48					
	190,11	48,16	7,59	0,33					
	227,10	45,05	7,93	0,46					
1,5	147,10	40,25	5,08	0,24	0,70	0,07	0,55	0,07	9,96
	199,57	54,72	6,00	0,46					
	280,43	57,81	6,90	0,33					
	325,16	49,95	7,70	0,14					
2	182,37	35,90	4,84	0,16	0,64	0,08	0,89	0,06	12,69
	237,42	40,97	5,19	0,11					
	307,96	31,21	6,18	0,26					
	363,87	36,54	6,78	0,28					

L_{CB} : profundidad del follaje; ΔP_t : Diferencia de presión total; Q : Flujo volumétrico;

ϵ_{ad} : porosidad aerodinámica; C_d : coeficiente de arrastre; k_p : resistencia del medio poroso.

En la Fig. 3 se muestra la tendencia que confirma que la resistencia ejercida al paso del fluido por los setos de Bugambilia disminuye con el aumento de la velocidad y la porosidad aerodinámica encontrándose entre $0,35\pm 0,02$; $0,55\pm 0,07$ y $0,89\pm 0,06$ para los niveles de profundidad de 1; 1,5 y 2 m, respectivamente. Estos valores son comparables a los reportado por Bitog et al. (2011) en un estudio realizado en ramas de árboles de la especie (*Pinus thunbergii*) de Corea del Sur, los cuales se encuentran entre 1,08 y 0,55.

En la Fig. 4 se muestra el comportamiento obtenido para los valores medios de la diferencia de presión en función del flujo volumétrico, para cada una de las cuatro posibilidades de relación de transmisión del accionamiento del ventilador axial y de los niveles de profundidad del follaje. Como se aprecia, la diferencia de presión se incrementa, tanto con el aumento del flujo de aire, como con la disminución de la porosidad de la cortina para todos los casos. La porosidad menor se obtuvo para una profundidad (L_{CB}) de 2 m y se alcanza una velocidad máxima de 21 m s^{-1}

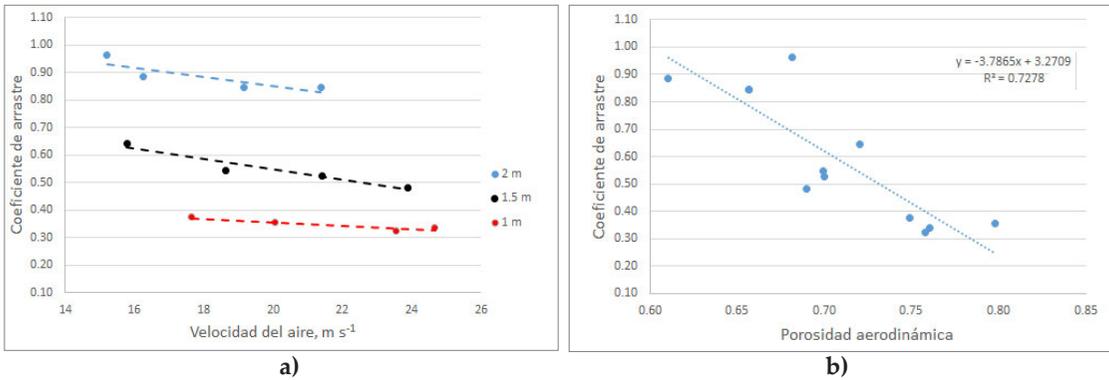


Fig. 3. Comportamiento del coeficiente de arrastre en función de: a) velocidad del aire; b) Porosidad aerodinámica.

Fig. 3. Behavior of the drag coefficient as a function of: a) wind speed; b) aerodynamic porosity.

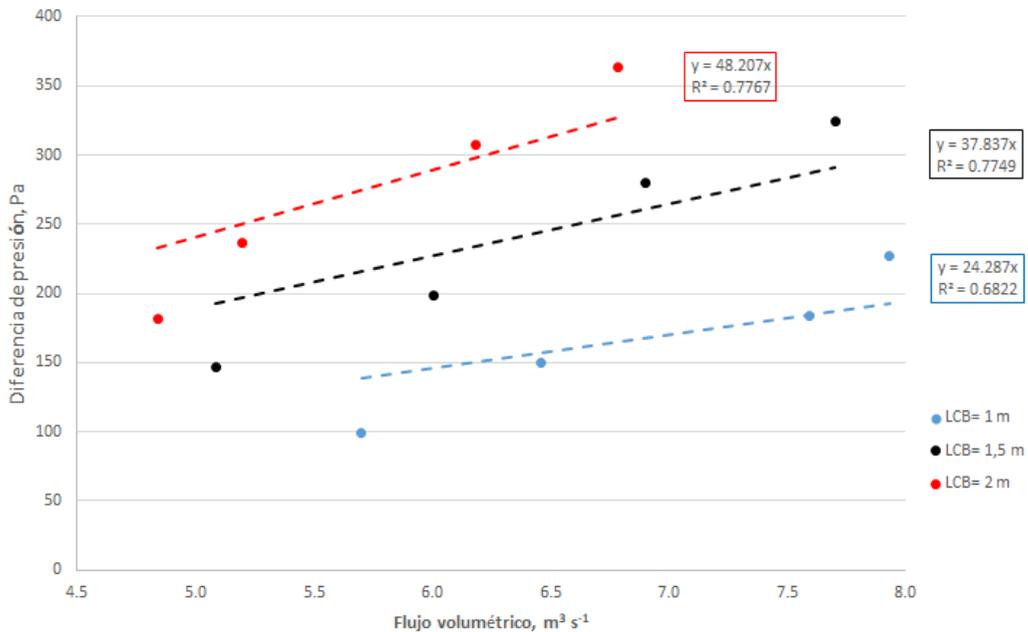


Fig. 4. Comportamiento de la diferencia de presión en función del flujo volumétrico.

Fig. 4. Behavior of the pressure difference as a function of volume flow.

(75,6 km h⁻¹) en el túnel aerodinámico; la mayor para la menor longitud y se obtuvo una velocidad máxima en el túnel de 24,6 m s⁻¹ (88,6 km h⁻¹).

Así mismo se obtienen modelos estadísticos lineales para la predicción de en función del flujo volumétrico del aire, con coeficientes de determinación de 0,68; 0,77 y 0,78 para los niveles de profundidad de 1; 1,5 y 2 m, respectivamente.

Estos resultados permiten la caracterización de setos de Bugambilia como medios porosos en el módulo del programa de Dinámica de Fluidos Computacional SolidWork Flow Simulation.

CONCLUSIONES

La porosidad aerodinámica de la cortina (ϵ_{ad}) arrojó valores medios entre 0,77±0,05; 0,70±0,07 y 0,64±0,08 para 1; 1,5 y 2 m de profundidad de la cortina respectivamente; con diferencias estadísticamente significativas para todos los casos.

La resistencia al paso del fluido a través de la cortina (k_p) arrojó valores entre 6,39; 9,96 y 12,69 s⁻¹ para 1; 1,5 y 2 m de profundidad de la cortina respectivamente; con diferencias estadísticamente significativas para todos los casos, garantizándose una densidad (ρ_{CB}) uniforme de 7,19±0,66 kg m⁻³ para los tratamientos evaluados.

El obtienen valores del coeficiente de arrastre entre 0,35 y 0,89 con tendencia a disminuir ante el aumento de la velocidad del viento y la porosidad de los setos de Bugambilia.

Se obtuvo modelos estadísticos lineales para la predicción de en función del flujo volumétrico, con coeficientes de determinación de 0,68; 0,77 y 0,78 para los tres niveles de profundidad de la cortina estudiado.

LITERATURA CITADA

- Bitog, J.P., I. B. Lee, H.S. Hwang, M.H. Shin, S.W. Hong, I.H. Seo, et al. 2011. A wind tunnel study on aerodynamic porosity and windbreak drag. *Forest Science and Technology* 7(1):8-16 ISSN-2158-0103.
- Dafa-Alla, M.D. and N.K.N. Al-Amin. 2016. The influence of optical porosity of tree windbreaks on windward wind speed, erosive force and sand deposition. *Journal of Forest and Environmental Science* 32(2):212-218.
- Davel, M., D. Arquero, P. Peri, M. Serventi, y G. Díaz. 2021. Cortinas forestales de álamos en los valles de Patagonia Norte. Manual N° 22. Editado por CIEFAP.
- Ferreira, A.D. and P.D. Sanchez. 2009. Numerical and experimental evaluation of the wind-field behind living shelterbelts. 5 European & African Conference on Wind Engineering-Conference Proceedings: 509-511.
- Frank, C. and B. Ruck. 2005. Double-Arranged Mound-Mounted Shelterbelts: Influence of Porosity on Wind Reduction between the Shelters. *Environmental Fluid Mechanics* 5:267-292.
- Gillies, J.A., W.G. Nickling, and J. King. 2002. Drag coefficient and plant form response to wind speed in three plant species: Burning Bush (*Euonymus alatus*), Colorado Blue Spruce (*Picea pungens glauca*), and Fountain Grass (*Pennisetum setaceum*). *Journal of Geophysical Research* 107 (D24,4760):1-15. doi:10.1029/2001jd001259
- Grala, K.R. 2004. An evaluation of the benefits and costs of in-field shelterbelts in Midwestern USA, Retrospective, Theses and Dissertations, Available at <https://lib.dr.iastate.edu/rtd/1163> (Accessed December 2016).
- Guan, D., Y. Zhang, and T. Zhu. 2003. A wind-tunnel study of windbreak drag. *Agric. Ecosyst Environ.* 118:75-84.
- Guo, Z., X. Yang, X. Wu, X. Zou, C. Zhang, H. Fang, et al. 2021. Optimal design for vegetative windbreak using 3D numerical simulations. *Agricultural and Forest Meteorology* 298-299:108-290.
- Heisler, G.M., and D.R. Dewalle. 1988. Effects of windbreak structure on wind flow. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 22-23:41-69
- Laffita L.A., R.A. Martínez, G.E. Ávila, y M.O.L. Rangel. 2020. Validación de un modelo experimental de simulación basado en Dinámica de Fluido Computacional. *Revista Ingeniería Agrícola* 29(4):14-21
- Laffita L.A., M.A. Rodríguez, H.P.A. Valdés, F.A. Alonso, y D.R. Acosta. 2021. Evaluación de cortinas rompevientos para la protección de paneles fotovoltaicos enclavados en zonas rurales. *Revista Ingeniería Agrícola* 11(3):27-34
- López L.A., F.E.D. León, P.V.B. Elena, y O.J. Cataldo. 2016. Estudio de coeficientes de presión en paneles solares frente a la acción del viento. *Revista Cubana de Ingeniería* VII(3):35-44.
- Miri, A., D. Dragovich, and Z. Dong. 2018. The response of live plants to airflow Implication for reducing erosion. *Aeolian Research* 33:93-105. doi:101016/J.AEOLIA.2018.06.002

- Oberschelp, J., L. Harrand, C. Mastrandrea, C. Salto, y P.M. Flores. 2020. Cortinas forestales: rompevientos y amortiguadoras de deriva de agroquímicos. Ediciones INTA, Estación Experimental Agropecuaria Concordia.
- Ramírez M.I. 2012. Las Bugambilias: De Suramérica para el mundo. Desde el Herbario CICY 4:69-70.
- Řeháček, D., T. Khel, J. Kučera, J. Vopravil, and M. Petera. 2017. Effect of windbreaks on wind speed reduction and soil protection against wind erosion. *Soil and Water Research* 12(2):128-135. doi: 10.17221/45/2016-SWR
- Ríos, M. 2017. Agricultura cubana en recuperación progresiva tras huracán Irma. Portal de Radio Habana Cuba. 20/09/2017. Disponible en: <https://www.radiohc.cu/noticias/economia/141924-agricultura-cubana-enrecuperacion-progresiva-tras-huracan-irma> (Consulta enero 2021).
- Speckart, S.O., and E.R. Pardyjak. 2014. A method for rapidly computing windbreak flow field variables. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 132:101-108
- Vigiak, O., G. Sterk, A. Warren, and L.J. Hagen. 2003. Spatial modeling of wind speed around windbreaks. *Catena* 52:273-288
- Wang, H., and E.S. Takle. 1997. Model-Simulated Influences of Shelterbelt Shape on Wind-Sheltering Efficiency. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 36:695-704.
- Wang, H., E. Takle, and J. Shen. 2001. Chapter 2. Shelterbelts and windbreaks: Mathematical modeling and Computer simulations of turbulent flows. *Annual Review of Fluid Dynamics* 33:549-586.
- Wu, X., X. Zou, N. Zhou, C. Zhang, and S. Shi 2015. Deceleration efficiencies of shrub windbreaks in a wind tunnel. *Aeolian Research* 16:11-23. doi:10.1016/J.AEOLIA.2014.10.004
- Wu, T., P. Zhang, L. Zhang, J. Wang, M. Yu, X. Zhou, et al. 2018. Relationships between shelter effects and optical porosity: A meta-analysis for tree windbreaks. *Agricultural and Forest Meteorology* 259:75-81. doi:10.1016/J.AGRFORMET.2018.04.013
- Zhou, X.H., J.R. Brandle, C.W. Mize, and E.S. Takle. 2004. Three-dimensional aerodynamic structure of a tree shelterbelt: Definition, characterization and working models. *Agroforestry Systems* 63:133-147