

## Dinámicas del viento en quintas de cítricos y daño en los frutos

Cataldo José<sup>1</sup>, Durañona Valeria<sup>1</sup>, Pienika Rodolfo<sup>1</sup>, Gravina Alfredo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay. Correo electrónico: rpienika@fing.edu.uy*

<sup>2</sup>*Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Uruguay. Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. C.P. 11300.*

Recibido: 12/11/10 Aceptado: 15/9/11

### Resumen

En Uruguay las quintas de cítricos están protegidas con mallas naturales, conformadas por árboles altos. Si bien se consigue disminuir la velocidad media del viento, no se logra una disminución de la cantidad de fruta descartada debido al daño por viento. El roce de las hojas sería lo que genera el mayor daño sobre la superficie en las primeras etapas de crecimiento del fruto. Se realizó un trabajo de campo en un cuadro de una plantación de cítricos, en el que se instalaron mallas de manera de lograr una protección parcial del mismo. En las zonas protegidas por estas mallas se apreció un aumento de la cantidad de fruta de calidad exportable. A diferencia de las barreras naturales, cuando el viento escurre alrededor de estas mallas plásticas se produce turbulencia con escalas del tamaño de las hojas de los árboles y aún menores. Se estudió un árbol cítrico en el túnel de viento, con flujos de velocidad media entre 1 m/s y 6 m/s, y de diferente nivel de energía contenida en las estructuras vorticosas correspondientes a longitudes del tamaño de las hojas y menores. Para una velocidad media determinada, cuando el contenido de energía de las pequeñas escalas de la turbulencia era elevado, las hojas se movieron con una amplitud significativamente mayor a cuando el flujo presentó baja energía en las pequeñas escalas de la turbulencia. Esto lleva a concluir que la hoja permanecería alejada del fruto un tiempo significativamente mayor cuanto más elevada sea la energía contenida en las pequeñas escalas de la turbulencia, disminuyendo así la acción mecánica de las hojas y el consiguiente daño.

**Palabras clave:** daño por viento, frutos cítricos, turbulencia, pequeñas escalas de la turbulencia

### Summary

## Wind Dynamics in Citrus Orchards and Fruit Damage

In Uruguay, citrus orchards are protected by live fences, constituted by tall trees. While it manages to reduce the average wind speed, it does not reduce the amount of fruit discarded due to wind damage. The rubbing of the leaves' edges against the fruits would be the most significant source of damage in young fruits. A field test in a box of citrus plantations was performed, in which artificial fences were installed for wind protection. In the fence protected zones, an increase of the exportable quality fruit was detected. As a difference to live fences, artificial fences are designed to control the turbulence of tree leaves' size or smaller. Citrus tree's response under wind action was studied in a wind tunnel for flows with mean velocities between 1 m/s and 6 m/s, and with different energy content at small-scale turbulence. At a fixed mean velocity, if the energy at small-scale turbulence was high, the leaves moved with an amplitude significantly greater than when this energy is low. This leads us to infer that the leaf would remain significantly more time away from the fruit when the energy at the small-scales is greater than when the energy is low, reducing the leaves' mechanical action and thereby the resulting damage.

**Key words:** wind damage, citrus fruit, turbulence, small-scale turbulence

## Introducción

### Efectos del viento sobre la calidad de frutos cítricos

En Uruguay, entre el 10 % y el 40 % de la producción de frutos cítricos destinada a exportación, es descartada por la mala calidad de la piel de los frutos causada por el efecto denominado «rameado» (Martínez, 1995). El «rameado» hace referencia a impactos, rozamientos y cortes que debido al movimiento de las ramas y las hojas del árbol por la acción del viento dejan marcas en la piel de la fruta, afectando su calidad, lo cual se traduce en grandes pérdidas económicas. Albrigo (1976), Freeman (1976) y Green (1968) mencionan que el daño por viento en frutos cítricos está asociado a eventos de velocidad media de viento elevada (superiores a 5 m/s). Es de práctica usual entre los productores de cítricos la utilización de barreras eólicas vivas, las cuales se componen de árboles altos, ubicados en filas, a los efectos de disminuir la velocidad del viento en el recinto de plantación (Holmes y Farrell, 1993; Owen-Turner y Hardy, 2006). Por distintos motivos, estas barreras vivas no cumplen con el objetivo de disminuir los daños en las frutas, aunque logran disminuir la velocidad media del viento. En forma alternativa, algunos productores utilizan barreras eólicas constituidas por mallas. Estas mallas suelen ser de materiales plásticos y con un paso muy pequeño, de no más de 2 ó 3 mm, las cuales se comportan como una pared sólida (Cataldo y Durañona, 2005).

### Objetivos

En el año 2004 el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería y el Departamento de Producción Vegetal de la Facultad de Agronomía, ambos de la Universidad de la República, de Uruguay, iniciaron un programa de investigación destinado a analizar el daño provocado por el viento sobre los frutos cítricos en Uruguay. Se ha estudiado entonces la utilización de mallas artificiales de dimensiones y porosidad adecuadas, dispuestas dentro o en el perímetro de las quintas, con el objeto de modificar la velocidad media y la turbulencia del viento, de manera de disminuir el daño sobre los frutos. Se presentan los resultados de las mediciones de velocidad de viento

en una quinta y se describe el ensayo de un árbol cítrico en el túnel de viento del IMFIA.

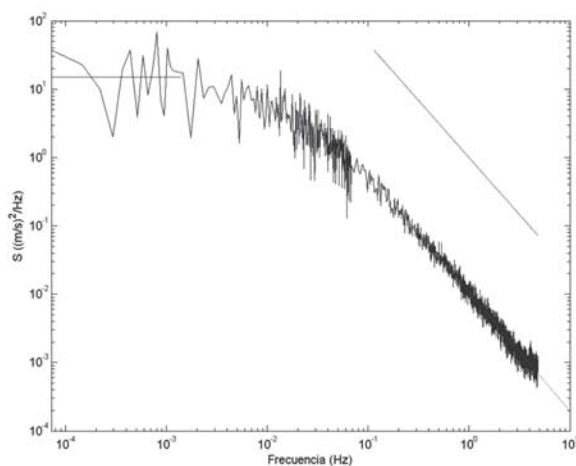
A partir del análisis del clima de vientos se identifica que las direcciones de viento más frecuentes en el Sur de Uruguay son NE y SE. Para viento medido a 10 m sobre el suelo se tiene que la media anual, en la zona suroeste del Uruguay resulta de 5 m/s, mientras que en la región noroeste del país la media anual es de 4,3 m/s. En dichas regiones se concentra la mayor producción cítrica del país.

Interesa caracterizar la interacción entre el viento y los árboles, así como el mecanismo a través del cual se produce el daño sobre la piel de la fruta. Se ha observado, a lo largo de la ejecución del mencionado programa, que resulta relevante determinar los daños que se producen durante la fase de crecimiento del fruto, primeras ocho a doce semanas luego de la caída del pétalo (Freeman, 1976; Gravina *et al.*, 2005), en donde se inicia el daño en la piel por efecto del viento y parece ser debido a la acción de las hojas sobre los frutos. Este hecho se verificó a partir de observaciones de una cantidad significativa de frutas situadas en diferentes partes de árboles localizados en distintas zonas del recinto. Se podría postular que las escalas de los movimientos de las diferentes partes del árbol, se pueden asociar con daño producido en distintas etapas del ciclo fenológico de los frutos. Por lo tanto, en las primeras etapas de crecimiento el daño se asociaría con el movimiento de las hojas, mientras que en frutos adultos el daño se asociaría con el movimiento de las ramas. A partir del seguimiento de la evolución del daño, llevado a cabo por el grupo de agrónomos de este proyecto, el daño producido en las primeras etapas de crecimiento fue encontrado como el más importante (daño que implica el descarte). Entonces el daño más importante está asociado al movimiento de las hojas (Gravina *et al.*, 2005).

Se ha visto necesario, a los efectos de analizar el daño en frutos cítricos, hacer una descripción detallada del clima de vientos en el interior de la quinta. Esta descripción debe incluir además del valor medio de la velocidad y la dirección más probable, la turbulencia y las escalas de la turbulencia, con el objeto de identificar las variables significativas en el proceso que da lugar al daño.

### Dinámica del viento e interacción con los árboles

La componente turbulenta del flujo de aire se la suele concebir integrada por una serie de vórtices de diferente escala espacial y con diferente periodo ó frecuencia característica. La densidad espectral  $S_u$  (Newland, 1984) permite entonces visualizar la forma en la cual se distribuye la energía contenida en la turbulencia, entre estas diferentes componentes que la integran (Tennekes y Lumely, 1972). En la Figura 1 puede observarse la curva espectral para un período analizado de cuatro horas de duración.



**Figura 1.** Espectro de turbulencia.  $S$ : densidad espectral de las fluctuaciones de velocidad longitudinal.

La escala integral de longitudes, es decir la dimensión de los vórtices que contienen la mayor parte de la energía de la turbulencia, suele presentar valores iguales o superiores a las dimensiones de un árbol, del orden de 3 m (Finnigan y Brunet, 1995; Finnigan, 2000; Raupach *et al.*, 1996; Scarabino, 2005). Por tal motivo, el pasaje de un vórtice de tal dimensión, generaría respuestas de movimiento en las diferentes partes del árbol de acuerdo a sus características elásticas, por lo que éstas se moverían con una frecuencia próxima a su frecuencia propia, induciendo impacto en los frutos. Este impacto sería más severo en los frutos de mayor tamaño. A los efectos de la interacción entre el viento y los árboles, éstas serían las grandes escalas de la turbulencia. La escala integral de longitudes puede ser estimada

a partir de las curvas espectrales (Farell e Iyengar, 1994; Tennekes y Lumley, 1972)

Por otro lado, interesa tener una idea de la energía que poseen los vórtices cuyo tamaño es del orden de las hojas de los árboles (aproximadamente 10 cm) y menores. Estos vórtices inducirían una respuesta de las hojas (movimiento), que solicitarían a los frutos de menor tamaño. Estas escalas de dimensión igual o menor al de una hoja serían las pequeñas escalas de la turbulencia. La energía disponible en los vórtices de tal escala se propone caracterizarla con el denominado «parámetro de las pequeñas escalas de la turbulencia», introducido por Melbourne (1979), que se define según la Ecuación 1.

$$\xi = \frac{f_{ss} \cdot S_u(f_{ss})}{\sigma_u^2} \cdot I_u^2 \cdot 10^6 = \frac{\text{Energía}(\lambda_{ss})}{\text{Energía}(\text{flujo medio})} \quad (1)$$

donde:

$f_{ss}$  es la frecuencia característica de las pequeñas escalas de la turbulencia (la cual se define en la Ecuación 2),

$\sigma_u$  es la raíz media cuadrática de las fluctuaciones de velocidad de viento,

$I_u$  es la intensidad de turbulencia del flujo (definida en la Ecuación 3).

$$f_{ss} = \frac{\bar{u}}{\lambda_{ss}} \quad (2)$$

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \quad (3)$$

Sea  $\lambda_{ss}$  la escala espacial de los vórtices del flujo incidente, que intercambian la mayor parte de energía con los vórtices de escala similar al tamaño de las hojas. Si los vórtices de escala presentaran mayor energía, una mayor carga se aplicaría sobre las hojas, las cuales se moverían con mayor amplitud, aumentando la distancia entre el fruto y las hojas. En consecuencia, las hojas y los frutos adyacentes estarían en contacto por menos tiempo.

## Materiales y métodos

### Ensayo en quinta

Se diseñó un experimento de campo. Se procedió a efectuar una protección parcial de un cuadro de una quinta, propiedad de la empresa AGRISUR ubicada en el paraje Kiyú, departamento de San José, al suroeste de Uruguay.

Con el propósito de ubicar las mallas se utilizaron series históricas de datos de viento obtenidas en estaciones meteorológicas cercanas. Se identificaron las direcciones más probables y se seleccionó la ubicación de las mallas de manera de proteger una parte de un cuadro y dejar sin protección otra parte del mismo cuadro. El paso de la malla fue definido atendiendo el contenido de energía requerido en las pequeñas escalas de la turbulencia, seleccionándose una malla de 5 cm por 10 cm.

Se realizaron campañas de medición de velocidad de viento en dos sitios del cuadro, el sitio  $A_4$  (sobre la esquina NE del cuadro) no protegido, y el sitio  $A_5$  (sobre la esquina SE del cuadro) protegido con la actual ubicación de las mallas. Se entiende que la zona protegida por las mallas, es aquella en la cual se tiene un incremento de la energía de las pequeñas escalas de la turbulencia, y no una disminución de la velocidad media del viento (como es usual en sistemas de protección contra el viento), a pesar de lo cual esto último también se logró con las mallas usadas.

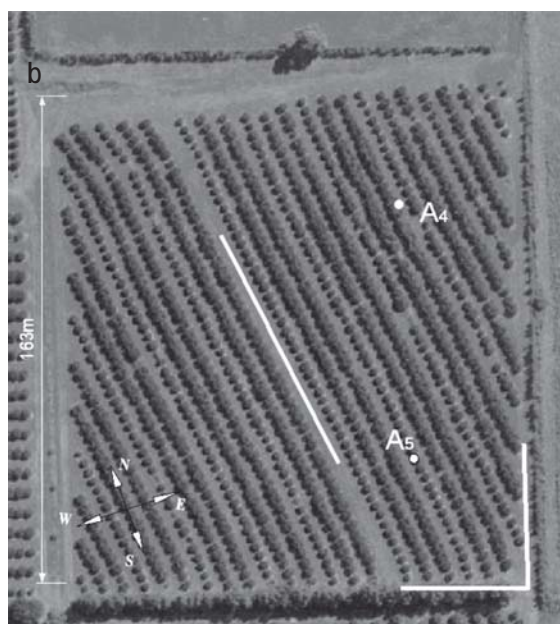
La velocidad del viento fue medida con un anemómetro ultrasónico YOUNG 81000, que resuelve

las tres componentes del vector velocidad. La frecuencia de adquisición se fijó en 10 Hz. Las campañas de medición incluyeron la colocación del anemómetro en un mástil a 3 m de altura, desde el 30/7/2008 al 20/10/2008 en el sitio  $A_4$  y desde el 27/10/2008 al 19/6/2009 en el sitio  $A_5$ , y en un mástil a 6 m de altura, durante 8 días en agosto de 2005 en un sitio ubicado fuera del recinto de plantación denominado sitio de referencia.

Cabe destacar que para un correcto análisis de la turbulencia, se debieron utilizar períodos de datos de velocidad de viento de al menos dos horas, en los cuales la velocidad media y la dirección se mantuvieran aproximadamente constantes.

### Ensayo en túnel de viento

Se obtuvo de la quinta estudiada una planta joven de naranja 'Navelate'. La altura y el ancho del follaje se seleccionaron de manera que la planta pudiera ser instalada en la zona de trabajo del túnel de viento de la Facultad de Ingeniería, la cual tiene una sección rectangular de 2,25 m de ancho y 2,10 m de alto. La planta presentaba una altura de 106 cm aproximadamente, medida desde la base del tronco (superficie de tierra en la cual se encontraba planta-



**Figura 2.** Imagen (a) y posición (b) de las mallas instaladas en Kiyú. En la Figura 2b, las líneas gruesas representan las mallas y los puntos representan los sitios de medición de viento.

da) hasta la parte superior de la copa. Se observa que la relación de alturas entre esta planta y los árboles de las quintas era aproximadamente de 1:3, mientras que el tamaño de las hojas no presentaba diferencias significativas con el de las hojas de los árboles de las quintas. En la Figura 3 se muestra una fotografía del árbol modelo instalado en el túnel de viento.

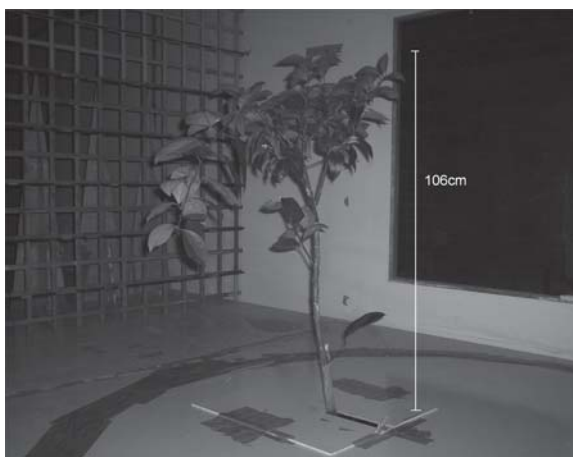


Figura 3. Imagen del árbol modelo en el túnel de viento.

En la medida que se buscó analizar el movimiento de las hojas, más que del tronco y ramas, y conociendo las restricciones que se tienen en la simulación de flujos atmosféricos (Pope, 2000), se priorizó la adecuada simulación de las estructuras vorticosas del flujo atmosférico que interactúan principalmente con las hojas, sin perjuicio de lo cual se verificaron todas las escalas de la turbulencia modeladas. Interesó, por lo tanto, simular flujos turbulentos cuyo valor del parámetro de las pequeñas escalas fuese similar a los obtenidos en la quinta.

Se utilizaron dos sistemas de simulación de turbulencia (uno para cada una de las dos franjas de valor del parámetro de las pequeñas escalas más frecuentemente observados en el flujo dentro de la quinta), conformados por mallas ocupando toda la sección del túnel en conjunto con prismas de sección transversal triangular (Farell y Youssef, 1996). En la Figura 3 se aprecia detrás de la planta, parte de uno de los sistemas de simulación utilizados.

Para medir la deformación en las ramas y hojas del árbol, se adhirieron medidores de deformación extensiométricos (strain gages) a las mismas. La velocidad se midió simultáneamente con un anemómetro de hilo caliente. Previamente se realizó un ensayo de deformación estática para determinar las frecuencias propias de las distintas partes del árbol.

Las partes del árbol modelo ensayadas se aproximaron a vigas cilíndricas de sección circular, empujadas en uno de sus extremos. Las dimensiones medias se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Dimensiones de las partes estudiadas del árbol modelo.

Parte del árbol	Diámetro medio (mm)	Largo (mm)
Tronco	16,8	375
Rama estructural 1	7,65	200
Rama estructural 2	9,15	200
Rama secundaria	2,98	350
Pecíolo	3,1	32

A partir de los datos de deformación, se calculó la densidad espectral de deformación  $S_x$  de forma similar al cálculo de  $S_u$ . En las curvas de  $S_x$  en función de la frecuencia, se puede apreciar un pico que corresponde a la frecuencia de resonancia de la parte del árbol estudiada, como se muestra a modo de ejemplo en la Figura 4.

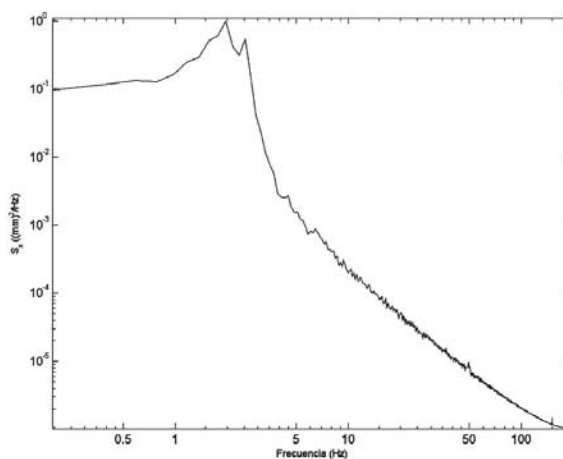


Figura 4. Espectro de deformación.  $S_x$ : densidad espectral de las fluctuaciones de deflexión.

## Resultados y discusión

### Ensayo en quinta

La velocidad de viento a 6 m de altura, en un sitio fuera del recinto, no perturbado por la presencia de las mallas ni de los árboles cítricos, presentó una media de 4,7 m/s.

Dentro del cuadro de la quinta, se puede apreciar a partir de las Figuras 5 y 6, la escasa o nula ocurrencia de eventos de velocidad media elevada (mayores a 3,5 m/s en  $A_4$  y a 5 m/s en  $A_5$ ), así como ciertas direcciones de viento predominantes (ENE en  $A_4$  y entre N y NE en  $A_5$ ).

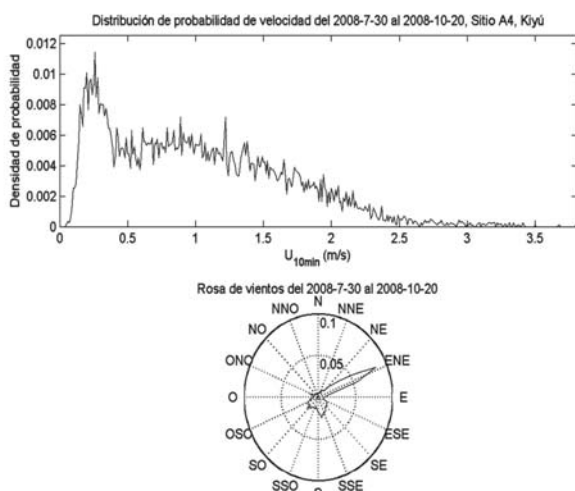


Figura 5. Histograma de velocidad y rosa de vientos en Sitio  $A_4$ .  $U_{10\text{min}}$ : Velocidad horizontal media en 10 minutos.

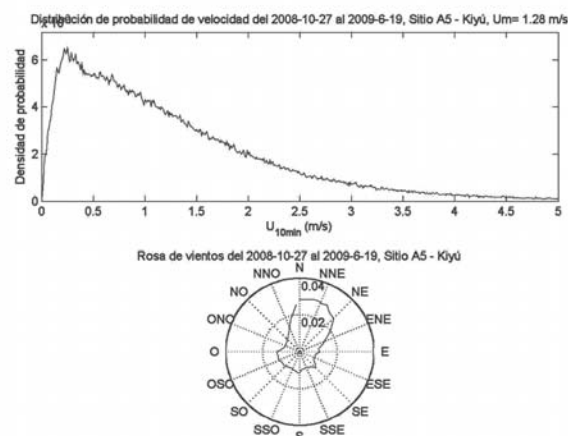


Figura 6. Histograma de velocidad y rosa de vientos en Sitio  $A_5$ .  $U_{10\text{min}}$ : Velocidad horizontal media en 10 minutos.

Los valores de la media cuadrática de la velocidad fluctuante ( $\sigma^2$ ) son representativos de la energía de la componente turbulenta del flujo, presentando valores similares para las componentes longitudinal ( $u$ ) y lateral ( $v$ ) y en ambos casos del orden de tres veces mayor al valor correspondiente a la componente vertical ( $w$ ). La escala integral longitudinal presenta valores del orden del alto de los árboles (3 m), y mayores.

Para el sitio  $A_4$  en Kiyú se observa que  $\xi$  presentó mayores valores cuando el viento provino del sector comprendido entre las direcciones ESE y SO, direcciones en las cuales el viento fluye aproximadamente paralelo a las líneas de árboles y atraviesa gran parte del cuadro hasta llegar al sitio de medición. No se considera que las mallas tengan un efecto significativo sobre la turbulencia del viento en este sitio, ya que el mismo se ubica más de 15 veces la altura efectiva aguas debajo de la malla (Freeman, 1976; Holmes y Farell, 1993; Owen-Turner y Hardy, 2006). Recordando que  $\xi$  representa la energía contenida en las pequeñas escalas, se deduce que al pasar el flujo por la quinta, los vórtices del orden de dicha escala presentaron un incremento de energía en términos relativos. En el sitio  $A_5$  de Kiyú se puede apreciar que los mayores valores de  $\xi$  se dieron cuando el viento provino del sector comprendido entre las direcciones E y SO, direcciones en las cuales el viento atraviesa la malla ubicada en la esquina SE del cuadro. Estos resultados están resumidos en la Figura 7, en forma de rosa de vientos. Las direcciones que presentan valores nulos de  $\xi$  corresponden a direcciones para las cuales no se tuvieron suficientes datos como para ser tenidas en cuenta en este análisis.

Los diferentes valores de  $\xi$  fueron agrupados en dos clases. Los que se ubicaron en el entorno de 1000 (adimensionado), se agruparon en la clase de baja energía de las pequeñas escalas de la turbulencia. Los valores de  $\xi$  en el entorno de 5000 (adimensionado), se agruparon en la clase de alta energía de las pequeñas escalas de la turbulencia.

De forma alternativa, se estudió también otro parámetro representativo de la energía de las pequeñas escalas. Dicho parámetro es el valor de la densidad espectral evaluada en la frecuencia de reso-

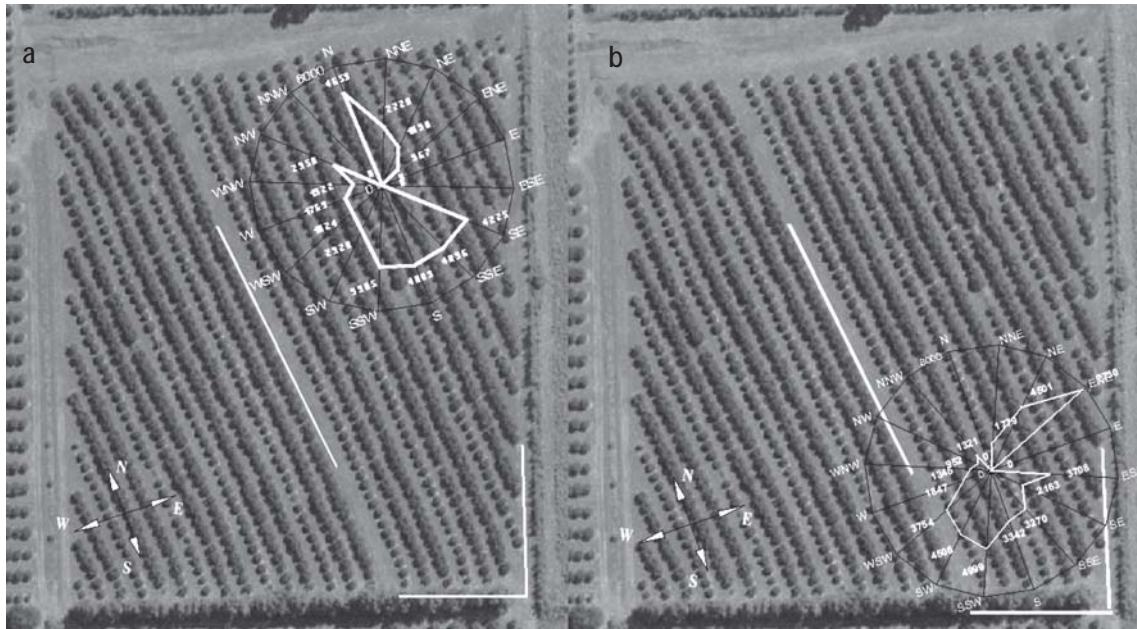


Figura 7. Rosa de vientos de valores de  $\xi$  (parámetro de las pequeñas escalas de la turbulencia) para el sitio  $A_4$  (a) y  $A_5$  (b).

nancia del peciolo,  $S_u(f_{res})$ , el cual no depende explícitamente de la energía del flujo medio, a diferencia del parámetro de las pequeñas escalas. Los valores de  $S_u(f_{res})$  se presentan de forma similar a los de  $\xi$  en

una rosa de vientos para los dos sitios de la quinta, en la Figura 8.

Los valores de  $S_u(f_{res})$  presentaron un comportamiento similar al observado para los del parámetro de las pequeñas escalas.



Figura 8. Rosa de vientos de valores de  $S_u(f_{res})$  (densidad espectral correspondiente a la frecuencia de resonancia del peciolo) para el sitio  $A_4$  (a) y  $A_5$  (b).

Se encontró menor proporción de fruta descartada en el sitio A<sub>5</sub> (protegido) que en el sitio A<sub>4</sub> (no protegido). Se considera descarte, cuando la fruta presenta marcas que ocupan más del 5 % de la superficie de la misma. En la cosecha 2008-2009, el 20 % de la fruta presentó daño severo (que implica descarte) en A<sub>5</sub>, mientras que dicha proporción aumentó al 42 % en A<sub>4</sub>. Resultados similares se habían obtenido para la cosecha 2007-2008. Mayor información acerca de la evaluación de campo, en cuanto a metodologías y presentación de resultados de rendimiento, calidad y daño en frutos en diferentes sitios del cuadro estudiado, se encuentran en Gravina *et al.* (2008, 2011).

#### Ensayo en túnel de viento

A partir de los ensayos de deformación estáticos, se obtuvieron las curvas de evolución de deformación en el tiempo de varias partes del árbol, mostradas en las Figura 9. De dichas curvas se desprendió que la frecuencia propia del tronco resultó 1,7 Hz, la

de la rama estructural 3,3 Hz, la de la rama secundaria 2,7 Hz y la del peciolo 3,7 Hz.

En los Cuadros 2 y 3 se resumen los valores de frecuencias propias estimadas a partir del pico espectral y de amplitud de la deformación ( $\sigma_x^2$ ), para las partes del árbol sometido a flujos de viento de entre 1 y 3 m/s. El Cuadro 2 corresponde al ensayo de baja energía turbulenta en las pequeñas escalas, mientras que el Cuadro 3 al ensayo de alta energía.

Se presta especial interés a los resultados de los ensayos con velocidad de viento de 1m/s, ya que es la velocidad media de viento ensayada que se presentó más frecuentemente dentro de las quintas, a 3 m del suelo (Cataldo y Durañona, 2007; Cataldo y Pienika, 2008). Se pudo apreciar, que la amplitud del movimiento del peciolo fue significativamente mayor cuando los niveles de energía turbulenta de las pequeñas escalas fueron mayores. Por otro lado, se observa que los niveles de movimiento de las demás componentes del árbol, en particular el tronco y las ramas estructurales, no presentaron diferencias

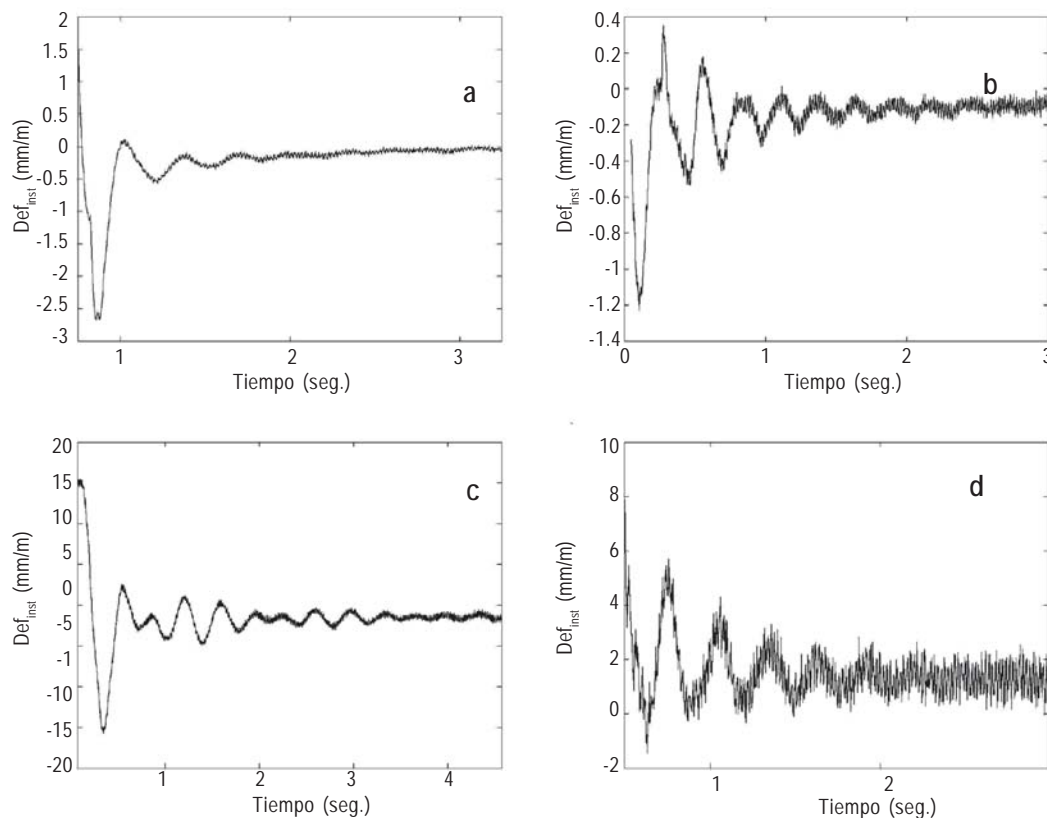


Figura 9. Curvas de deformación estática para: a) tronco, b) rama estructural, c) rama secundaria y d) peciolo.



**Cuadro 2.** Resultados del ensayo de baja energía de las pequeñas escalas.  $f_{res}$ : frecuencia de resonancia;  $\sigma_x^2$ : media cuadrática de la deflexión. Las condiciones del ensayo 1 fueron velocidad longitudinal media de 1 m/s, media cuadrática de la velocidad longitudinal de 0,021 (m/s)<sup>2</sup>, y parámetro de las pequeñas escalas igual a 1116 (adimensionado). Las condiciones del ensayo 2 fueron velocidad longitudinal media de 2 m/s, media cuadrática de la velocidad longitudinal de 0,093 (m/s)<sup>2</sup>, y parámetro de las pequeñas escalas igual a 1075 (adimensionado). Las condiciones del ensayo 3 fueron velocidad longitudinal media de 3 m/s, media cuadrática de la velocidad longitudinal de 0,212 (m/s)<sup>2</sup>, y parámetro de las pequeñas escalas igual a 1126 (adimensionado).

Nº ensayo Parte del árbol	1		2		3	
	$f_{res}$ (Hz)	$\sigma_x^2$ (mm) <sup>2</sup>	$f_{res}$ (Hz)	$\sigma_x^2$ (mm) <sup>2</sup>	$f_{res}$ (Hz)	$\sigma_x^2$ (mm) <sup>2</sup>
Tronco	1,9	1,31E-05	1,9	5,92E-05	1,7	6,43E-04
Rama estructural 1	2,5	1,73E-05	3,2	4,49E-05	3,5	1,73E-04
Rama estructural 2	1,2	1,52E-05	3,5	4,56E-05	3,5	1,64E-04
Rama secundaria	2	3,88E-02	2,5	7,68E-01	2	1,13E+00
Pecíolo	3,7	2,81E-01	3	3,99E+00	3,7	2,18E+01
Rama secundaria	2	3,88E-02	2,5	7,68E-01	2	1,13E+00
Pecíolo	3,7	2,81E-01	3	3,99E+00	3,7	2,18E+01

**Cuadro 3.** Resultados del ensayo de alta energía de las pequeñas escalas.  $f_{res}$ : frecuencia de resonancia;  $\sigma_x^2$ : media cuadrática de la deflexión. Las condiciones del ensayo 4 fueron velocidad longitudinal media de 1 m/s, media cuadrática de la velocidad longitudinal de 0,132 (m/s)<sup>2</sup>, y parámetro de las pequeñas escalas igual a 6092 (adimensionado). Las condiciones del ensayo 5 fueron velocidad longitudinal media de 2 m/s, media cuadrática de la velocidad longitudinal de 0,728 (m/s)<sup>2</sup>, y parámetro de las pequeñas escalas igual a 7705 (adimensionado). Las condiciones del ensayo 6 fueron velocidad longitudinal media de 3 m/s, media cuadrática de la velocidad longitudinal de 1,46 (m/s)<sup>2</sup>, y parámetro de las pequeñas escalas igual a 7646 (adimensionado).

Nº ensayo Parte del árbol	4		5		6	
	$f_{res}$ (Hz)	$\sigma_x^2$ (mm) <sup>2</sup>	$f_{res}$ (Hz)	$\sigma_x^2$ (mm) <sup>2</sup>	$f_{res}$ (Hz)	$\sigma_x^2$ (mm) <sup>2</sup>
Tronco	1,9	1,20E-04	1,5	1,16E-03	1,6	3,06E-03
Rama estructural 1	3,5	4,55E-05	3,3	8,68E-04	3,1	4,94E-03
Rama estructural 2	3,3	6,15E-05	3,1	8,13E-04	3,2	2,04E-03
Rama secundaria	2,3	1,87E+00	2	7,15E+00	2,5	6,55E+00
Pecíolo	3,7	1,47E+01	3,5	1,17E+02	4	2,96E+02

significativas entre el flujo de baja energía y el de alta energía, a una velocidad media de 1 m/s. Se deduce que entre la baja y la alta energía turbulenta, la única diferencia apreciable en el comportamiento del árbol fue el movimiento de los pecíolos, y por consiguiente el movimiento de las hojas. En la Figura 10 se muestra el cambio en la amplitud del movimiento de las distintas partes del árbol, cuando se pasó de

un flujo con baja energía turbulenta a un flujo con alta energía, manteniendo la velocidad media en 1 m/s. Tanto la amplitud del movimiento como la energía de las pequeñas escalas fueron adimensionalizadas previo al trazado de la curva.

Se introdujo la hipótesis de que el roce continuo, aunque leve, de una hoja sobre un mismo punto de la superficie de una fruta joven, produce más daño

sobre la superficie que golpes fuertes, pero intermitentes, de una hoja sobre puntos aleatorios de la superficie de la fruta. En visualizaciones llevadas a cabo en el túnel de viento, se pudo concluir que para velocidades medias de 1 m/s y baja energía en las pequeñas escalas, una hoja que se encontraba apoyada sobre un fruto joven presentó un movimiento prácticamente imperceptible, asimilado como un roce leve. Cuando la energía de las pequeñas escalas se aumentó pero se mantuvo el valor de velocidad media, se apreció claramente que el movimiento de la hoja fue mayor alejándose del fruto adyacente.

Se supuso que si el movimiento de la hoja presenta una amplitud menor al 10 % del tamaño del

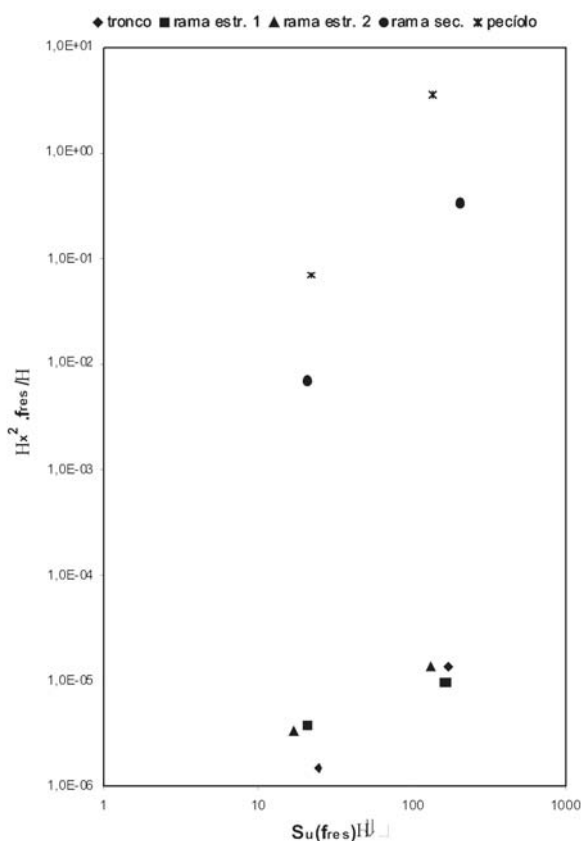
fruto, es decir menor a 1 mm, provocaría un mayor daño sobre el fruto que un movimiento de mayor amplitud, ya que en este último caso el tiempo de contacto sería sensiblemente menor. El tiempo que la hoja se mantuvo próxima al fruto, para el ensayo de baja energía, se estimó en el 94% del tiempo, mientras que en el caso de un flujo de alta energía, el tiempo de contacto se estimó en el 21,2 % del tiempo.

## Conclusiones

Se analizó el clima de viento dentro de un cuadro de plantación de cítricos, y se encontraron las características del viento más significativas en cuanto al proceso que da lugar al daño en frutos cítricos. Se ensayó un árbol modelo en el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería, bajo flujos de distintas características, representativos de los que se encontraron a partir de las mediciones de campo. En el ensayo de laboratorio se encontró que para flujos de baja energía en las pequeñas escalas de la turbulencia y velocidades medias similares a las observadas dentro de las quintas (1 m/s), una hoja que estuviese apoyada sobre un fruto joven, se mantendría sensiblemente apoyada sobre el mismo punto implicando un roce continuo sobre el fruto. Por el contrario, al aumentar la energía contenida en las pequeñas escalas, la hoja se mantendría alejada del fruto por un tiempo mayor. Se desprende pues, que el daño en el fruto provocado por el movimiento de las hojas adyacentes, sería mayor con niveles bajos de energía turbulenta de las pequeñas escalas, que con niveles altos. Las mallas propuestas para la protección generan un incremento en dicha energía.

## Agradecimientos

El trabajo fue financiado principalmente por el INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria) y también se desea agradecer a la ANII (Agencia Nacional de Investigación e Innovación) por la beca de iniciación brindada a uno de los autores del presente artículo y a las empresas AGRISUR y COSTA DE ORO, por permitir instalar las mallas en quintas de su propiedad.



**Figura 10.** Curva adimensionalizada de la amplitud del movimiento en función de la energía de las pequeñas escalas.  $\sigma_x^2$ : media cuadrática de la deflexión;  $f_{res}$ : frecuencia de resonancia;  $S_u(f_{res})$ : densidad espectral correspondiente a la frecuencia de resonancia del peciolo;  $\nu$ : viscosidad cinemática del aire.

## Bibliografía

- Albrigo LG. 1976. Influence of prevailing winds and hedging on citrus fruit wind scar. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 89: 55 - 59.
- Cataldo J, Pienika R. 2008. Estudio y control del daño por viento en frutos cítricos [Cd-Rom]. En: I Congreso Latinoamericano de Ingeniería del Viento; 4 - 6 Noviembre 2008; Montevideo, Uruguay.
- Cataldo J, Durañona V. 2007. Wind study, its characteristics and citric fruit quality: Preliminary results [Cd-Rom]. En: *Proc. of the 12th International Conference on Wind Engineering*; 1 - 6 julio 2007; AWES, Cairns, Australia.
- Cataldo J, Durañona V. 2005. Estudio del viento, cortinas de abrigo, sus características y efectos sobre la calidad de los frutos cítricos: Resultados preliminares [Cd-Rom]. En: II Simposio Investigación y Desarrollo Tecnológico en Citrus; 14 - 15 noviembre 2005; Montevideo, Uruguay.
- Farell C, Youssef S. 1996. Experiments on Turbulence Management Using Screens and Honeycombs. *Journal of Fluids Engineering*, 118(1):26 - 33.
- Farell C, Iyengar A. 1994. Time series analysis with application to velocity fluctuation data measured in a wind tunnel atmospheric boundary layer. Minneapolis: St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory. 124p. (Project Report: 363).
- Finnigan J.J. 2000. Turbulence in plant canopies. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32: 519 - 571.
- Finnigan JJ, Brunet Y. 1995. Turbulent airflow in forests on flat and hilly terrain. En: *Wind and Trees*. Coutts MP, Grace J [Eds.]. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 3 - 40.
- Freeman B. 1976. Artificial windbreaks and the reduction of windscar of citrus. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 89: 52 - 54.
- Gravina A, Cataldo J, Gambetta G, Pardo E, Fornero C, Galiger S, Pienika R. 2011. Relation of peel damage in citrus fruit to wind climate in orchard and its control. *Scientia Horticulturae* 129 (2011) 46-51.
- Gravina A, Pardo E, Soria L, Durañona V, Cataldo J. 2008. Wind damage of citrus fruit in southern Uruguay: study and characterization. En: *International Citrus Congress 2008*; 26 - 31 octubre 2008; Wuhan, China.
- Gravina A, Espino M, da Cunha Barros M. 2005. Evaluación del viento, cortinas de abrigo, sus características y efectos sobre la calidad de los frutos cítricos: II. Análisis del efecto del viento en la calidad externa de los frutos cítricos [Cd-Rom]. En: II Simposio Investigación y Desarrollo Tecnológico en Citrus; 14 - 15 noviembre 2005; Montevideo, Uruguay.
- Green, GC. 1968. Windbreaks for citrus orchards. *Farming in South Africa*, 44, 6:9-15.
- Holmes M, Farrell D. 1993. Orchard microclimate as modified by windbreaks: A preliminary investigation. *South African Avocado Growers' Association Yearbook*, 16: 59-64.
- Martínez D. 1995. Causas de descarte zafra 1995. *Citrus*, 27: 18-19.
- Melbourne WH. 1979. Turbulence effects on maximum surface pressures - a mechanism and possibility of reduction. *Wind Engineering, Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Wind Eng., Fort Collins, Colorado, USA*, Pergamon Press, pp. 541-551.
- Newland D. 1984. *An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis*. New York: Longman. 285p.
- Owen-Turner J, Hardy S. 2006. Windbreaks for citrus [En línea]. In: CITTgroups Australia [Ed.]. Citrus fact sheet. Consultado 18 octubre 2011. Disponible en: [http://www.dpi.nsw.gov.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0005/137858/Windbreaks-for-citrus.pdf](http://www.dpi.nsw.gov.au/_data/assets/pdf_file/0005/137858/Windbreaks-for-citrus.pdf).
- Pope S. 2000. *Turbulent Flows*. Cambridge: Cambridge University Press. 771p.
- Raupach MR, Finnigan JJ, Brunet Y. 1996. Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing layer analogy. *Boundary-Layer Meteorology*, 78: 351-382.
- Scarabino A. 2005. Características de la turbulencia atmosférica en un bosque de coníferas. (Tesis de doctorado) La Plata: Universidad Nacional de La Plata. 89p.
- Tennekes H, Lumley J. 1972. *A First Course in Turbulence*. Massachusetts: MIT Press. 299p.