

Revisión

El viento y la vida de las plantas

Wind and the life of plants

Alberto D. Golberg

CONTENIDO	Pág.
Introducción	222
¿Qué es el viento?	222
Acciones del viento sobre las plantas	223
Acción sobre la capa límite	223
Influencia del viento sobre la capa límite y el balance térmico de la hoja	224
Capa límite y transpiración	224
Capa límite y fotosíntesis	225
Efectos directos del viento	225
Interacciones del viento con otros factores del ambiente	227
Viento y crecimiento	229
Efecto del viento sobre el transporte de polen y la dispersión de semillas	232
Efectos adversos del viento	233
Vuelco	233
Daño en hojas	234
Daño en frutos	235
Dispersión de patógenos	235
Aspectos moleculares y hormonales relacionados con el viento	235
Efecto de fuertes vientos	236
Viento Zonda	237
Barreras eólicas	237
Reflexión final	238
Bibliografía	239
<i>Agradecimiento</i>	243

Estación Experimental Agropecuaria del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)
Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas". Ruta Nacional 5, km 580. C. C. 11. (6326) Anguil. La Pampa.
Argentina.
Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de La Pampa. Ruta 35, km 334. (6300) Santa Rosa.
La Pampa. Argentina. golberg@agro.unlpam.edu.ar

INTRODUCCIÓN

De todos los factores de estrés que actúan sobre los vegetales, el correspondiente a los efectos mecánicos, fundamentalmente los originados por el viento, son los que en Argentina menos atención han merecido; basta echarle una mirada a la información consignada en Internet para verificar la exactitud de esta aseveración.

Por el contrario, si no se restringe la búsqueda sólo a la literatura nacional sobre el tema se observará que el listado de publicaciones realizadas en el extranjero es muy extenso. Podrá advertirse, por ejemplo, que el tema de la acción del viento sobre las plantas ha merecido una reciente revisión (de Langre, 2008)

El viento, al igual que otros factores ambientales como el agua, la temperatura, la radiación, etc., puede jugar un doble rol:

- Positivo, si se tiene en cuenta su acción como vehículo en el transporte de polen y la diseminación de semillas.
- Negativo, ya que al aumentar el efecto de la limitación hídrica, el efecto mecánico puede llegar a desvalorizar la calidad de la madera de especies forestales, provocar la abscisión de hojas y de frutos, u originar el vuelco de especies herbáceas.

Teniendo en cuenta el escaso interés que ha despertado en Argentina la acción del viento sobre las plantas -poco explicable si se tiene en cuenta el fuerte impacto que ejerce sobre las comunidades vegetales de gran parte de su territorio, como la Patagonia y la región pampeana, y no sólo sobre comunidades naturales sino también en agroecosistemas (Golberg & Kin, 2003)-, el objetivo de este trabajo es examinar la literatura existente sobre los efectos del viento en la fisiología de las plantas, en especial de las especies cultivadas. También tiene la intención de motivar a los investigadores de distintas disciplinas relacionadas con la interacción viento-planta para aumentar el nivel de conocimientos que se posee en el país, teniendo en cuenta que, además del interés científico, pueden obtenerse resultados de índole práctica de aplicación en la actividad tanto agropecuaria como forestal.

Se realizará una revisión de la acción de este factor ambiental sobre la estructura de la capa límite, diferentes aspectos de su efecto debido al movimiento de la planta o de partes de ella, aspectos de la fisiología vegetal como la transpiración, fotosíntesis, su intervención en el transporte de polen y la propagación de las especies; se presentarán algunos trabajos referidos a las barreras eólicas, uno de los artificios más utilizados y difundidos para atenuar los efectos negativos del viento.

¿Qué es el viento?

El diccionario de la Real Academia Española en su vigésimo segunda edición lo define como "*corriente de aire producida en la atmósfera por causas naturales*". De acuerdo con Boldes *et al.* (2003), el viento puede considerarse como una corriente de aire con una velocidad media V_m que arrastra consigo estructuras turbulentas (remolinos) de diferentes tamaños e intensidad, cuyas velocidades se corresponden con los componentes fluctuantes u' .

La ecuación que relaciona ambos componentes y da la velocidad instantánea **V** en un punto es: **$V = V_m + u$**

Los remolinos de gran escala espacial (remolinos grandes) son de baja frecuencia, es decir, que están dotados de menor energía que los de menor escala espacial y mayor frecuencia. Puede considerarse también que los remolinos de gran escala espacial generan fluctuaciones de baja frecuencia y los de pequeña escala espacial, fluctuaciones de alta frecuencia. Tanto las fluctuaciones de baja frecuencia integran en conjunto el *espectro de la turbulencia*, el cual puede compararse con el espectro de audio de un equipo de alta fidelidad.

El viento turbulento está integrado por remolinos de diferentes frecuencias que fluctúan al azar, arrastrados por una corriente media. En ocasiones predominan vientos de amplia escala espacial (baja frecuencia) y en otras de pequeña escala (alta frecuencia).

ACCIONES DEL VIENTO SOBRE LAS PLANTAS

Acción sobre la capa límite

El concepto de capa límite ha sido de suma utilidad para comprender los procesos de intercambio de calor y de gases entre un cuerpo y la atmósfera circundante. En lo que respecta a la fisiología y ecofisiología vegetal, por ejemplo, permite introducir el término **resistencia de la capa límite**, la cual interfiere con los intercambios de calor y gases entre el interior de la hoja y la atmósfera exterior, interviniendo de esta manera en la regulación de la temperatura foliar, la transpiración y la fotosíntesis.

Desde el punto de vista físico, puede observarse que todo cuerpo sumergido en la atmósfera produce el frenado del aire por acción de las fuerzas de fricción sobre su superficie. De esta manera se genera sobre los contornos del cuerpo una capa de fluido más lenta: **la capa límite** (Boldes *et al.*, 2003). El espesor de esta capa está directamente relacionado con la velocidad del viento (es mayor cuando menor es la velocidad) (Roden & Pearcy, 1993) y con las características aerodinámicas del cuerpo en cuestión. En lo que respecta a las hojas, se constata que hojas de gran tamaño producen capas límites de mayor espesor que las pequeñas, dado que la existencia de tricomas en la superficie foliar provoca el frenado del viento y por consiguiente aumenta el espesor de la capa límite (Slayter, 1967; Taiz & Zeiger, 2006).

Teniendo en cuenta que la capa límite afecta tres procesos que están relacionados e interactúan de manera compleja (intercambio de calor entre la hoja y la atmósfera, pasaje de vapor de agua desde la cavidad sub-estomática hacia la atmósfera y absorción de CO₂ desde la atmósfera), pueden advertirse las dificultades que existen para tratar cada uno de ellos de manera aislada. No obstante la dificultad señalada, a continuación se presentarán algunas experiencias sobre la intervención de la capa límite en los procesos indicados anteriormente.

Influencia del viento sobre la capa límite y el balance térmico de la hoja

Se ha observado que el viento contribuye a disminuir la temperatura foliar, produciendo un descenso del déficit de presión de vapor (DPV) en la capa límite de la hoja, y consecuentemente reduciendo la tasa transpiratoria (Takashi *et al.*, 1997). Estudios realizados con especies de regiones desérticas, alpinas y subalpinas han mostrado que la capa límite ejerce una fuerte influencia sobre el intercambio de calor entre la hoja y la atmósfera circundante (Smith & Geller, 1980). Experiencias realizadas por Martin *et al.* (1999) en *Abies amabilis* mostraron que la resistencia de la capa límite a pesar de ser pequeña, aun en el caso de vientos de reducida velocidad y en períodos de calma, en comparación con la que puede alcanzar la resistencia estomática, resulta suficiente para determinar una temperatura foliar substancialmente mayor que la del aire cuando la irradiancia es alta y la velocidad del viento es reducida. De acuerdo con Woolley (1961) el viento puede influenciar la forma en la cual la hoja pierde energía debido a su influencia de la capa límite sobre la transpiración al remover el aire saturado de humedad de la superficie foliar. Por otra parte, se ha indicado que un incremento de la temperatura foliar puede disminuir la resistencia de la capa límite debido a que produce un efecto ascensional del aire que rodea la hoja (*buoyancy effects*) (Kitano *et al.*, 1995). Parlange & Wagonner (1972) han observado que la modificación de la estructura del viento de laminar a turbulenta, al producir el sacudimiento de las hojas, aumenta la conductancia de la capa límite la cual llega a ser hasta 2,5 veces superior que bajo el régimen laminar, produciendo de esta manera un rápido equilibrio de la temperatura foliar con la de la atmósfera exterior.

Capa límite y transpiración

En primera instancia, el viento ejerce su influencia sobre la tasa de transpiración debido a su efecto en la remoción de la capa límite, aunque también puede actuar de manera directa (Woolley, 1961; Smith & Geller, 1980; Pachepsky *et al.* 1999). Takashi *et al.* (1997) han observado en esquejes de tomate que existe interacción entre el déficit de presión de vapor (DPV), la resistencia de la capa límite de la hoja y la tasa transpiratoria: cuando el DPV es bajo, el de la capa límite es superior al del aire, y viceversa. A partir de estas observaciones, los autores concluyen que bajo la condición de aire calmo un aumento de la temperatura foliar aumenta el DPV de la capa límite y ocasiona de esta manera una disminución de la tasa transpiratoria.

Daudet *et al.* (1999) determinaron, mediante modelos de simulación y medidas de campo realizadas sobre especies de regiones desérticas, alpinas y subalpinas, que la influencia de la variación del espesor de la capa límite sobre la transpiración debido a diferencias en la superficie foliar o a la velocidad del viento eran de naturaleza muy compleja, ocasionando incremento o disminución de la transpiración, los cuales estaban relacionados con los efectos combinados del área foliar, la temperatura del aire, la absorción total de energía por parte de la hoja y la resistencia estomática.

Cuando el modelo de simulación integraba toda la planta, la reducción de la transpiración ocasionada por el aumento de la superficie foliar era debida al efecto de sombreado (Smith & Geller, 1980).

Por otra parte, Yasutake *et al.* (2001) han observado en pepino un efecto de la capa límite sobre la apertura estomática. Sus experiencias evidenciaron que en condiciones de bajo DPV de la capa límite (alta humedad), el aumento de la conductancia (inversa de la resistencia) de la capa límite puede activar la respuesta de los estomas a la irradiancia, produciendo una mayor apertura de éstos, aumentando la tasa transpiratoria, particularmente en la superficie abaxial. En esta experiencia pudo mostrarse también un comportamiento diferencial de ambas superficies foliares. Davies *et al.* (1978) observaron en *Cytisus scoparius* que el aumento abrupto de la velocidad del viento producía un incremento de la conductancia estomática en las primeras cuatro horas posteriores a la exposición y una disminución en las siguientes ocho horas.

Capa límite y fotosíntesis

El viento afecta positivamente la absorción de CO₂ al incrementar su turbulencia en la vecindad de la superficie foliar, aumentando de esta manera la conductancia de la capa límite. Este aumento de la turbulencia es debido a la rugosidad producida por las nervaduras y las condiciones aerodinámicas de las hojas. Por otro lado, el viento al producir el movimiento de las hojas puede contribuir a aumentar la conductancia de la capa límite, y de esta manera a incrementar el flujo de CO₂ al interior de la hoja (de Langre, 2008). Kitaya *et al.* (2004) observaron en plántulas de tomate que la insuficiencia del movimiento del aire alrededor de las plantas disminuye la tasa fotosintética al disminuir la difusión de gases debido a la resistencia de la capa límite: la tasa fotosintética bajo una velocidad del aire de 0,4 m s⁻¹ fue 1,3 veces superior que a 0,1 m s⁻¹. Estos resultados muestran la importancia de controlar el movimiento del aire en las experiencias en las cuales se determina la tasa de fotosíntesis.

Para finalizar el tratamiento del tema capa límite y resaltar la importancia de las interacciones que se establecen entre velocidad del viento-capla límite-temperatura-transpiración-fotosíntesis, se cita la conclusión de Woodrow *et al.* (1990): El juego de variables muestra un sistema de notable complejidad donde la temperatura foliar y la concentración de vapor de agua en el interior de la hoja y en la superficie representan las variables del sistema. En ese sistema deben considerarse cuatro procesos adicionales mediados por los estomas y la capa límite: la evaporación, la transferencia de calor latente, la transferencia de calor por convección y el intercambio de energía radiante. Estos procesos, al intervenir sobre la temperatura foliar y el intercambio de gases entre la atmósfera y el interior de la hoja, controlan la transpiración y la fotosíntesis.

Efectos directos del viento

Además de la acción indirecta del viento sobre la temperatura foliar, transpiración y fotosíntesis mediado por la capa límite, éste también tiene efectos que pueden considerarse directos. Entre los ejemplos que da la literatura cabe citar los siguientes:

- En relación con las temperaturas nocturnas de la hoja, se ha visto en limonero que el efecto deletéreo de las heladas es incrementado por la presencia de vientos, aun siendo éstos moderados, los cuales pueden incrementar la diferencia entre la temperatura foliar y la del aire, siendo la primera siempre inferior a la del aire.

- Respecto de la transpiración se ha observado también una interacción de la temperatura foliar con el viento: un aumento de su velocidad tendería a disminuir la transpiración cuando la pérdida de calor latente es mayor que la de calor sensible (Grace, 1977); a medida que la velocidad del viento aumenta, la hoja se enfría y la diferencia de presión de vapor entre el interior de la hoja y la atmósfera se reduce produciendo una disminución de la tasa transpiratoria (Sena Gomes & Kozlowski, 1989). También Woolley (1961) ha observado en maíz que la masa de aire aportada por el viento en contacto con la hoja puede estimular la transpiración debido a la remoción del aire saturado situado en su vecindad y también por el efecto directo sobre la temperatura foliar. Además, este autor señala otras acciones del viento que pueden incrementar la tasa transpiratoria: disminución de la presión del aire a sotavento de la hoja; ventilación de los espacios intercelulares, produciendo pasaje de aire a través de la lámina en las especies anfiestomáticas; doblado de la lámina por el viento lo cual causa la compresión de los espacios intercelulares y por consiguiente el bombeo del aire saturado de humedad fuera de la cavidad subestomática. Drake *et al.* (1970) han observado en hojas de *Xanthium strumarium* que a temperaturas superiores a 35°C el viento produce un significativo incremento de la transpiración.
- En relación con la fotosíntesis, Grace (1977) ha señalado que la acción del viento se manifiesta de manera diferente entre las especies. En una experiencia con árboles, Clark *et al.* (2000) observaron que la tasa fotosintética de *Fagus sylvatica* aumentaba con velocidades del viento entre 1 y 7 m s⁻¹, mientras que en *Fraxinus excelsior* y *Prunus serotina* disminuía y en *Abies alba* no mostraba diferencias ante un aumento de la velocidad del viento. Esta variabilidad de los efectos del viento depende entre otros factores de la morfología foliar (las características aerodinámicas de las hojas) y de la temperatura óptima de las enzimas fotosintéticas. En condiciones de calma o a bajas velocidades del viento, el nivel de CO₂ alrededor de la planta (o del cultivo) disminuye debido a la demanda de la fotosíntesis y a la reducción de la difusión desde la atmósfera hacia el mesófilo foliar (Kin & Ledent, 2003).

Por otra parte, el viento puede producir la disminución de la tasa fotosintética debido a los cambios en la radiación disponible cuando el ángulo foliar es alterado por efecto del viento y por consiguiente el ángulo de incidencia de la radiación respecto de la lámina foliar resulta modificado. El viento puede también reducir el área foliar efectiva al causar el agrupamiento de las hojas (Vogel, 1989).

En una interesante experiencia efectuada con cultivares de papaya (*Carica papaya* L.), Clemente *et al.* (2001) observaron que plántulas expuestas al viento presentaban una tasa fotosintética menor que sus testigos no sometidos al viento mientras que la respiración oscura podía incrementarse en un 120%. Estos autores concluían que la depresión de la fotosíntesis aunada al incremento de la respiración eran los responsables de la reducción del crecimiento observada en las plantas expuestas.

En relación con el efecto del viento sobre los estomas, Caldwell (1970) observó una acción diferencial del viento entre plántulas de *Rhododendron ferrugineum* L. y *Pinus cembra* L. expuestas a vientos de 15 m s^{-1} durante 24 horas. La primera especie mostraba una disminución del poro estomático poco tiempo después de iniciarse la exposición al viento, afectando la fotosíntesis y transpiración. Por su parte, la apertura estomática en *Pinus cembra* fue levemente afectada por el viento pero la tasa fotosintética sufrió una importante reducción debido a cambios en la disposición de las agujas a la irradiancia.

Teniendo en cuenta que el viento afecta la temperatura foliar, la resistencia estomática y la tasa transpiratoria, puede inferirse que también influye en el potencial hídrico y el contenido de agua ya sea del xilema caulinar como de la hoja.

- El viento afecta también el estado hídrico de las plantas: se ha observado en plántulas de *Theobroma cacao* que el potencial agua del xilema fue más negativo con vientos de 6 m s^{-1} que con 3 ó $1,5 \text{ m s}^{-1}$; el potencial agua en esta última velocidad fue un 24% inferior cuando se lo comparó con el testigo mantenido en condiciones de calma (Sena Gomes & Kozlowski, 1989). Asimismo, Grace & Russell (1982) en *Festuca arundinacea* sometida a un estrés combinado por exposición al viento y sequía, observaron que la acción del viento incrementaba la disminución del potencial hídrico ocasionado por la deficiencia hídrica. Otra experiencia de los mismos autores (Grace & Russell, 1977) con *Festuca arundinacea* mostró que la exposición al viento produce una disminución del potencial hídrico mayor que la ocasionada por la deficiencia hídrica. Las plantas sometidas a sequía habían adquirido la habilidad de conservar agua mientras que las que crecieron bajo la acción del viento no mostraban tal habilidad.

Rees & Grace (2006) realizaron experiencias en *Pinus contorta* con el objetivo de examinar si el efecto del viento sobre el crecimiento y desarrollo de la planta era debido al estrés hídrico; los resultados no evidenciaron disminución del potencial osmótico y de turgencia. Kobriger *et al.* (1984) en plantas de viña expuestas a velocidades de viento de $3,6 \text{ m s}^{-1}$ durante 6 días o $10,7 \text{ m s}^{-1}$ por 3 días en fitotrón no observaron modificaciones del potencial hídrico ocasionado por el viento; en cambio, la conductancia estomática y la tasa transpiratoria disminuían en ambos tratamientos eólicos. Flückiger *et al.* (1978) expusieron diferentes clones de álamos de un mes y medio de edad a ráfagas de viento de 6 m s^{-1} y no observaron cambios en los parámetros hídricos; sin embargo, la misma velocidad aplicada de manera continua producía una significativa disminución del potencial hídrico.

Interacciones del viento con otros factores del ambiente

Tratar las interacciones que se establecen cuando se analizan de manera conjunta todos los factores reseñados, pondrá en evidencia la complejidad de esta situación y la gran dificultad que existe para construir un modelo que pueda contextualizar todo lo visto precedentemente. Para ejemplificar dicha complejidad, a continuación se presenta un diagrama que muestra las interacciones entre algunos de los factores y procesos tratados. Se ha asignado signo + cuando al aumento de la intensidad de un

factor le corresponde un incremento correlativo del otro, por ejemplo, el aumento del DPV produce un aumento de la transpiración. El signo negativo ha sido asignado a las interacciones en las cuales el aumento de un factor está asociado con la disminución del otro, por ejemplo, la disminución del contenido de agua en el suelo determina una disminución de la conductancia estomática.

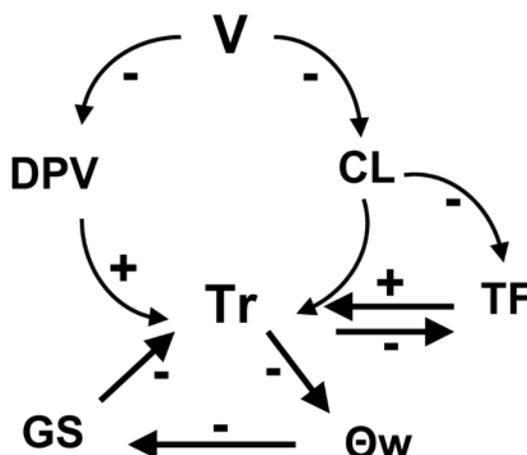


Diagrama causal de las interacciones entre el viento, otros factores ambientales y la planta. V: viento, DPV: déficit de presión de difusión, Tr: transpiración, CL: capa límite, Tf: temperatura foliar, Gs: conductancia estomática, Θ_w : contenido hídrico del suelo.

Causal diagramme of wind interactions with others environmental and plants factors. V: wind, DPV: Vapor Presion Deficit, Tr: Transpiration, CL: boundary layer, Tf: leaf temperature, Gs: stomatal conductance, Θ_w : soil water content.

Analizando el diagrama puede observarse, por un lado, que el viento al aumentar su intensidad produce una disminución del espesor de la capa límite foliar y por consiguiente de la resistencia que ésta ejerce en el intercambio de calor entre la hoja y la atmósfera, ocasionando una disminución de la temperatura foliar, la cual a su vez al disminuir la presión vapor de agua en la cavidad subestomática produce una disminución del gradiente de presión de vapor entre la hoja y la atmósfera y una concomitante reducción de la transpiración. Pero, en sentido inverso, un incremento de la transpiración producido por la disminución de la resistencia de la capa límite aumentará el efecto de enfriamiento que el pasaje del agua de fase líquida a vapor produce sobre la superficie de la hoja. También la disminución de la capa límite reduce la resistencia al intercambio de vapor de agua entre la hoja y la atmósfera e intensifica la tasa de transpiración. Pueden observarse aquí dos factores influidos por la capa límite que obran en sentido contrario: por un lado, la disminución de la temperatura foliar ocasionada por el adelgazamiento de la capa límite produce una disminución de la transpiración; por otra parte, ese mismo adelgazamiento ocasionará un incremento

de la transpiración al disminuir la resistencia al flujo de vapor de agua entre la hoja y la atmósfera. Un aumento del viento ocasiona una disminución del DPV de la atmósfera, un aumento del gradiente de presión de vapor entre la cavidad subestomática y la atmósfera y por ende un incremento de la transpiración. La disminución del contenido hídrico del suelo por un aumento de la tasa transpiratoria ocasiona una disminución de la conductancia estomática -disminuye el diámetro del ostiolo- y por consiguiente disminuye la transpiración. Un esquema semejante podría plantearse para exponer las interacciones de factores señalados precedentemente, el intercambio de CO₂ entre la atmósfera y la hoja y su efecto sobre el proceso fotosintético.

Viento y crecimiento

Existe conocimiento desde hace considerable tiempo del efecto del viento sobre el crecimiento de órganos y de la planta. Russell & Grace (1978) determinaron que la tasa de elongación foliar fue reducida marcadamente cuando se sometió la hoja a vientos de 7,4 m s⁻¹, y que el efecto no estaba relacionado con una disminución del potencial hídrico foliar ni con la producción de etileno (otra causa posible de la reducción del crecimiento).

Flückiger *et al.* (1978) en una experiencia en túnel de viento observaron que distintos clones de álamo colocados en macetas y sometidos a ráfagas de viento de 6 m s⁻¹ exhibían una reducción de su crecimiento que alcanzaba el 50%, y sugirieron que el movimiento frecuente que presentaban las plantas podía ser el responsable de esta reducción en el crecimiento.

Rees & Grace (1980) determinaron en túnel de viento que la extensión del tallo y de las ramas de árboles jóvenes de *Pinus contorta* Douglas era reducida entre un 20 y 30% bajo las condiciones del experimento.

Woodward (1983) observó que la elongación foliar y el potencial de turgencia de *Phleum alpinum*, una especie de zonas altas, no mostraban variaciones cuando las plantas eran expuestas a vientos entre 0,2 - 3 m s⁻¹, mientras que *Phleum pratense*, especie de la planicie, sometida a vientos de igual intensidad, mostraba disminución de ambos parámetros.

En experiencias realizadas en túnel de viento con plántulas de maíz, Kin & Ledent (2003) observaron que vientos de 7 m s⁻¹ produjeron una reducción tanto de la elongación foliar como de la longitud final de las hojas, la altura y el peso seco; advirtieron que el efecto era más significativo en plantas con un estado hídrico favorable.

Marler & Clemente (2006) estudiaron los efectos combinados del viento y el estrés hídrico sobre el crecimiento de dos variedades de plántulas de papaya (*Carica papaya*): la interacción de los dos factores de estrés (viento y sequía) redujo significativamente el peso seco, el área foliar y la altura en ambas variedades de manera aditiva. Estos resultados pusieron en evidencia desde el punto de vista metodológico que no era posible estudiar el efecto del viento sin controlar o cuantificar la humedad edáfica.

Desde el punto de vista práctico los autores concluyeron que la protección de las plantas jóvenes de papaya era más importante durante la estación seca que en la estación lluviosa o cuando el cultivo se realiza bajo riego.

Kin & Ledent (2003) expresaron que la disminución de la tasa de crecimiento ocasionada por el viento es una consecuencia de la derivación de fotosintatos para la formación de ligninas lo cual resulta en una utilización de hidratos de carbono y de energía para la constitución de dichos tejidos y una disminución concomitante del crecimiento.

Golberg *et al.* (2000), experimentando en túnel de viento con plantas de maíz pudieron establecer que la alteración en los patrones de crecimiento ocasionada por el viento no era una manifestación sólo de su velocidad sino también que intervenían las características turbulentas, pues cuando las plántulas eran expuestas a vientos de igual velocidad pero de distinta estructura turbulenta, el crecimiento de ambos tratamientos difería en la tasa de elongación foliar y en la biomasa aérea. Estos resultados pusieron en evidencia la necesidad de controlar las características turbulentas en las experiencias que se realicen para verificar efectos de la acción eólica sobre distintos aspectos de la fisiología vegetal.

Además de su acción sobre el crecimiento, el viento tiene importantes efectos **morfogenéticos** sobre las plantas; tales efectos están asociados en muchos aspectos con el fenómeno denominado **tigmomorfogénesis**, el cual fue definido por Jaffe (1973) como la respuesta de las plantas a los estímulos mecánicos evidenciados por la alteración de los patrones de crecimiento. Desde este punto de vista el viento ejercería su acción a través de los estímulos mecánicos percibidos por los órganos del vegetal, transferidos por medio del mecanismo de transducción de la señal y visualizado mediante cambios de sus patrones de crecimiento y desarrollo, los cuales producen cambios en la morfología de las plantas.

El efecto tigmomorfogénico más frecuentemente citado por los autores es la reducción del crecimiento en altura del tallo e incremento en el diámetro. Hunt & Jaffe (1980) mostraron en plantas de poroto (*Phaseolus vulgaris*) que había una relación lineal entre la velocidad del viento y la acción tigmomorfogénica señalada precedentemente. Telewski & Jaffe (1986) observaron en *Abies fraseri* sometido a fuertes vientos, inhibición de la elongación de los tallos y de las agujas, aumento de su crecimiento radial preponderantemente en la dirección de la perturbación mecánica y también incremento en el diámetro de la base de las ramas. Los cambios estructurales que sufre el árbol por efecto del viento inducen disminución de la flexibilidad y de la elasticidad del tallo debido al aumento del crecimiento radial. Estos autores observaron que el incremento del crecimiento radial se debía a un aumento de la división celular del cambium vascular lo cual resultaba en un mayor número de traqueidas, mientras que la reducción en la elongación caulinar era debida a la disminución de la longitud de éstas. Como conclusión de sus experiencias Telewski & Jaffe (1986) señalaron que las plantas responden al viento y otras perturbaciones mecánicas de manera adaptativa, permitiéndoles de este modo la supervivencia en ambientes caracterizados por fuertes vientos. Existe un efecto de **rusticación** producido por el viento (Noel

& Harris, 1971) dado que los árboles que fueron expuestos a vientos moderados se tornan más resistentes a los de mayor intensidad; se ha observado que árboles que crecieron protegidos de la acción del viento tienden a ser más altos y sus troncos más delgados que los expuestos a él: estos individuos son volteados con relativa facilidad por vientos de gran intensidad (Knight, 1841). En plantas herbáceas se ha observado que hojas expuestas previamente al viento también pueden ser rusticadas y muestran menor sensibilidad ante otros de mayor intensidad (Kin & Ledent, 2003).

De acuerdo con Jaffe & Forbes (1993), otro agente de tigmomorfogénesis además del movimiento, es el frotamiento de una planta contra otra. Un efecto morfogénico del viento señalado por diferentes autores (Jaffe & Forbes, 1993; Noguchi, 1979; Rees & Grace, 1980) es la formación de los llamados **árboles bandera** los cuales se originan por la flexión del árbol hacia sotavento producida por los vientos dominantes que afectan ramas jóvenes muy plásticas; las ramas de dichos árboles tienden a crecer en un solo sector y a sotavento de los vientos dominantes (Jaffe & Forbes, 1993).

El viento también juega un papel importante en la formación de **leño de reacción** (Larson, 1965) originado por el movimiento del tronco cuando éste es desplazado de su posición vertical. Esta acción no se verifica cuando el árbol está expuesto a vientos cuyas frecuencias e intensidades son similares desde los diferentes puntos cardinales. Bannan & Bindra (1970) observaron que en el sitio de incidencia de los vientos dominantes sobre el tronco, los anillos de crecimiento eran más estrechos que a sotavento. En angiospermas es denominado leño de tensión, mientras que en gimnospermas se lo denomina leño de compresión. En ambos casos, la madera que exhibe tal crecimiento anormal no es apropiada para su utilización comercial pues las propiedades mecánicas de la tabla es heterogénea y además se seca de manera diferencial. Dunham & Cameron (2000) en plantaciones comerciales de abeto recomiendan el raleo de los individuos que exhiben leño de compresión; de acuerdo con estos autores la visualización de coronas asimétricas en los ejemplares permite inferir la presencia de dicho leño.

Pruyn *et al.* (2000) compararon la respuesta a la perturbación mecánica, producida mediante tratamientos de flexión, en dos híbridos de *Populus trichocarpa* x *Populus deltoides*, observando en ambos híbridos que los tratamientos producían un incremento significativo del crecimiento radial del tallo, especialmente en la dirección en la que se realizó la flexión; también se producía en los dos híbridos una disminución de la relación crecimiento en altura/crecimiento en diámetro, aumentaba la rigidez del tallo ante la flexión. Berthier & Stokes (2005) experimentaron con plantas jóvenes (dos años) de *Pinus pinaster* con el objetivo de determinar si los árboles respondían de igual manera desde el punto de vista mecánico a las cargas dinámicas (control: plantas inclinadas no sometidas a la acción del viento vs plantas inclinadas y sometidas a vientos unilaterales), observando que en las plantas sometidas al viento la reorientación hacia la vertical fue cuatro veces mayor en relación con el control; no se verificaron en la formación de leño de compresión entre tratadas y control por lo cual los autores atribuyeron la reorientación de los árboles a otros factores no determinados en su experiencia.

Efecto del viento sobre el transporte de polen y la dispersión de semillas

La posibilidad de que granos de polen sean depositados sobre los estigmas de una flor, iniciando de esta manera el proceso de fecundación, dependerá de factores como tamaño, densidad y carga eléctrica del grano de polen; tamaño y localización de las estructuras reproductivas; velocidad del viento; magnitud del campo eléctrico del medio y viscosidad del aire (Bowker & Crenshaw, 2007). En *Kochia scoparia*, Mulugeta *et al.* (1994) observaron que la deposición de los granos de polen era mayor en la dirección de los vientos dominantes; este patrón es responsable -según los autores citados- del flujo de genes desde la fuente, pudiendo alcanzar dicho flujo grandes distancias. Precisamente esta posibilidad de que el viento mediante el transporte de granos de polen sirva de vector al flujo de genes es un tema de máxima preocupación respecto de la bioseguridad, pues se teme que las nuevas características incorporadas en las variedades transgénicas puedan ser transmitidas a plantas emparentadas nativas o silvestres dando lugar a una descendencia híbrida con mayor potencial para convertirse en maleza.

Bravo *et al.* (2002) evaluaron en Bolivia (donde existen numerosas especies de *Solanum* emparentadas con *S. tuberosum*) el riesgo de diseminación de polen de cultivares de papas tetraploides con el objeto de fortalecer las normas de bioseguridad en relación con la liberación de genotipos transgénicos, y sus observaciones les permitieron determinar la importancia del viento en la dispersión del polen. Sauthier & Castaño (2004) realizaron una experiencia con maíz en Santiago del Estero con el objeto de evaluar distancias posibles de recorrido del polen mediante el conteo de granos a diferentes distancias de la fuente; se detectaron granos cuajados hasta 597 m, constatándose que la cantidad estuvo influenciada por la dirección de los vientos más frecuentes. De acuerdo con esta observación, los autores concluyeron que la distancia de aislamiento de 250 m establecida en Argentina por el Reglamento Técnico Nacional era insuficiente. Asimismo trabajos realizados en la Universidad de Exeter por Hoyle & Cresswell (2007) -usando datos de velocidad y dirección del viento de distintos sitios del continente europeo- sugieren que se está subestimando el potencial de traslado del polen, pudiéndose producir cruces entre cultivos genéticamente modificados con no modificados.

Los patrones de dispersión tienen implicancias importantes sobre la demografía y la estructura genética de las poblaciones vegetales. En lo que respecta a la dispersión por el viento, ésta puede adoptar dos formas: el flotamiento donde las semillas son llevada por los filetes de viento que conforman una brisa, o bien son transportadas sobre la superficie del suelo por medio de la agitación producida por el viento (Gurevitch *et al.*, 2006). Skarpaas *et al.* (2006) han documentado mediante experiencias realizadas en túnel de viento que en la dispersión de semillas actúan dos componentes eólicos: la velocidad horizontal y el flujo turbulento. La liberación de las semillas desde la planta madre incrementa con la velocidad laminar pero la turbulencia es capaz de liberar más propágulos a menor velocidad del viento. Nathan & Kabul (2005) observaron que además de la velocidad del viento, la altura en la que se produce la liberación de los propágulos es determinante en la dispersión a larga distancia. Sus experiencias mostraron también la influencia del Índice de Área Foliar (IAF) en la dispersión de semillas: canopeos de bajo IAF son favorables

para la dispersión a larga distancia probablemente debido a que los más espesos reducen la velocidad del viento. De estas observaciones los autores citados extraen una interesante conclusión respecto de la tendencia de muchas especies forestales de zonas templadas a restringir la liberación de las semillas sólo al inicio de la primavera o hacia las postrimerías del otoño cuando el valor del IAF es relativamente bajo.

Efectos adversos del viento

En las secciones anteriores se han analizado distintos efectos del viento en los que puede advertirse una acción dual: positiva sobre la biología de las plantas en algunos aspectos y negativa en otros. Así, si se analiza el efecto sobre el intercambio gaseoso y se recuerda que poblaciones vegetales en las cuales todos los factores que actúan en la fotosíntesis están en el óptimo o cercano a éste, un período de calma puede limitar el proceso fotosintético por falta de mezclado y, en otra situación, al aumentar la tasa transpiratoria el viento puede incrementar el efecto de una sequía. Los efectos morfo-genéticos: aumento del crecimiento en diámetro, reducción de la altura, producción de árboles bandera si bien son perjudiciales desde el punto de vista de la utilización de la madera, representan para el árbol fenómenos adaptativos que permiten la supervivencia en ambientes sometidos a fuertes vientos. En esta sección, en cambio, se verán efectos que no registran tal dualidad, tales como el daño de la epidermis foliar, vuelco y daño en frutos. Algunos de estos efectos pueden ser directos -por ejemplo el vuelco-, otros indirectos como el daño en hojas en el que el viento puede actuar por la propulsión de partículas de suelo que producen pulido de la superficie foliar.

Vuelco

En las gramíneas el vuelco refleja el excesivo doblado a nivel del suelo o quebrado de los entrenudos basales del tallo (Kin & Ledent, 2003). Pinthus (1973) define al vuelco como el proceso mediante el cual los tallos de los cereales son desplazados de su orientación vertical. Se han reconocido dos formas de vuelco: el producido por el acostamiento de los tallos (Berry *et al.*, 2003) y el originado por el desplazamiento de las raíces en el suelo o vuelco de raíces (Ennos, 1991). Existe coincidencia entre diferentes autores de que vientos de cierta intensidad, sobre todo cuando son acompañados por fuertes lluvias, son los principales factores del medio que producen el volcado (Tams *et al.*, 2004; Tripathi *et al.*, 2004; Berry *et al.*, 2003). Otro factor concurrente del medio tiene que ver con la alta disponibilidad de nitrógeno en el suelo que produce plantas altas y con entrenudos frágiles, sobre todo los basales (Tripathi *et al.*, 2004). Entre las causas que favorecen el vuelco, e inherente a las planta, se cita su altura, la debilidad estructural de los internodios basales por ser éstos los llamados a resistir los movimientos de la planta (Entz, 2004); también el peso de los internodios superiores sumado al de las hojas y las espigas afecta la resistencia de la planta al vuelco: cuanto más pesadas resultan las porciones superiores de los tallos y mayor es la distancia desde el centro de gravedad a la base del tallo, más intensas serán las fuerzas actuantes sobre los internodios inferiores y las raíces y, por consiguiente, mayor será la propensión al vuelco (Government of Alberta, 2001). El vuelco afecta sensiblemente el rendimiento de los cultivos. La importancia de la merma está relacionada con el estado fenológico del cultivo siendo más significativa cuando ocurre dentro de los diez días que siguen a la emergencia de las espigas; en dicho estado las pérdidas de rendimiento pueden oscilar entre 15 y 40% (Government of Alberta, 2001).

Daño en hojas

Como sucede en otros casos vistos precedentemente, la acción perjudicial del viento en las hojas puede deberse a efectos producidos por su incidencia directa sobre la superficie foliar o a través de un agente transportado por éste. En el caso de *Acer pseudoplatanus*, por ejemplo, Wilson (1980) ha observado que el viento *per se* produce un daño permanente en la hoja el cual se manifiesta mediante lesiones que toman la tonalidad marrón, depresiones debidas a rupturas de tejidos epidérmicos y desgarro de los mismos. Las hojas más jóvenes mostraban mayor susceptibilidad a la acción del viento y el daño aumentaba de manera lineal con el incremento de la velocidad. Además se ha observado que gramíneas sometidas a fuertes vientos exhiben incrementos de la conductancia foliar (Grace, 1974; Grace & Russell, 1977; Pitcairn & Grace, 1982).

Se piensa que tal incremento es ocasionado por el efecto abrasivo del viento durante el frotamiento de una hoja con su vecina (Thompson, 1974; Mac Kerron, 1976; Wilson, 1984; Pitcairn & Grace, 1984; Pitcairn *et al.*, 1986). Las hojas expuestas a fuertes vientos y observadas microscópicamente aparecen con roturas en las células epidérmicas, con la superficie con apariencia alisada y con rupturas de las estructuras de las células epicuticulares (Thompson, 1974, Mac Kerron, 1976; Wilson, 1980). El daño a la capa de ceras epicuticulares, sin que ocurra otro daño de la superficie foliar, puede dar lugar a un incremento de la conductancia foliar y a un aumento de la transpiración (Pitcairn & Grace, 1984; Pitcairn *et al.*, 1986). Los daños indirectos producidos sobre la superficie foliar son ocasionados por el material transportado por el viento que actúa de manera abrasiva sobre ésta. Baker (2007) observó que en plantas de algodón expuestas a la acción de partículas de arena, en un túnel de viento, la tasa de crecimiento foliar, medida dos semanas después del tratamiento, exhibía una importante disminución; por otra parte, Baker (2007) afirmó que millones de acres de cultivo en Estados Unidos están expuestos a los efectos abrasivos de la arena transportada por el viento y en muchos casos el daño resulta tan severo que es necesario realizar su resiembra.

Kin & Ledent (1994, 1996) estudiaron en plántulas de maíz la importancia de la abrasión y las respuestas fisiológicas, y observaron que los daños causados por las partículas de arena proyectadas sobre el follaje aumentaban en la fase de alargamiento de las hojas, siendo mayor cuando el tratamiento se realizaba en los primeros estadios (una hoja expandida). En este caso las dos primeras hojas sufrieron necrosis seguida de desecamiento y muerte. También el daño producido en la cutícula por el viento puede crear vías de absorción de substancias, ya sea en fase gaseosa o líquida como, por ejemplo, absorción de agentes contaminantes (Hoad *et al.*, 1992; Jeffree *et al.*, 1994). El agua colectada en lugares expuestos al viento puede ser muy ácida, conteniendo altas concentraciones de sulfatos y nitratos; los efectos observados de la deposición de estos contaminantes en las plantas incluyen reducción del crecimiento en plántulas, daño de hojas, modificaciones del intercambio gaseoso y de los parámetros hídricos de la hoja y cambios en la producción y composición de las ceras epicuticulares (Hoad *et al.*, 1998).

Daño en frutos

Otra acción perjudicial se observa sobre los frutos en los que frecuentemente el efecto del viento deprecia su valor comercial debido a la producción de heridas ocasionadas por el frotamiento contra ramas, troncos e incluso hojas maduras; las heridas producidas pueden ser restauradas mediante tejidos cicatriciales que al cabo de varios días desarrollan una capa protectora de súber (Morales *et al.*, 2000; NSW Department of Primary Industries, 2003). En palto, por ejemplo, la fricción y el machucamiento originado por vientos aun de baja intensidad sobre los frutos tiernos es la causa de la generación de tejido suberoso sobre la epidermis del fruto (Hofshi & Arpaza, 2002).

Dispersión de patógenos

La dispersión de esporas realizada por el viento resulta especialmente relevante sobre los cultivos, pues dichos vectores pueden ser transportados a través de cientos o miles de kilómetros, causando la difusión de varias enfermedades de gran importancia comercial a una escala continental y aún global. Entre las enfermedades más importantes que son propagadas de esta manera pueden mencionarse las diferentes royas y los mildius (Brown & Hovmoller, 2002).

ASPECTOS MOLECULARES Y HORMONALES RELACIONADOS CON EL VIENTO

Muchos de los efectos relacionados con la percepción del viento por las plantas se pueden agrupar como **acciones mecánicas**, dentro de las cuales pueden mencionarse -además del viento- factores tan variados como las respuestas a las heridas, los tropismos, la acción de barreras físicas como la impedancia del suelo, respuestas inducidas por el paso de la maquinaria o del ganado, o bien el plegamiento de los folíolos de *Mimosa pudica* cuando se tocan (Chebab *et al.*, 2009).

Lo que a continuación se expone, referido a las respuestas fisiológicas respecto de la percepción de los estímulos mecánicos, ha sido extraído de la revisión efectuada por Telewski (2006): "La primera respuesta detectable a una señal mecánica es un cambio en los potenciales de acción y en la resistencia eléctrica, lo cual ocurre segundos después de que la planta haya sufrido la perturbación, mientras que el balanceo del tallo produce el bloqueo del transporte por el floema entre uno y dos minutos después. La siguiente modificación que puede observarse es el incremento de la concentración de Ca^{2+} intracelular, dicho incremento parece ser ocasionado por la dilatación de los canales de calcio en respuesta al estrés mecánico lo cual facilita su pasaje a través del canal. El aumento de las Especies Reactivas de Oxígeno (ROS, según su conocida abreviatura en inglés) y el incremento del Ca^{2+} citosólico parecen ser concurrentes y los ROS regulan la entrada del calcio a los canales específicos".

Se ha reportado que en *Phaseolus vulgaris* un estrés mecánico puede causar la completa cesación de la elongación celular seis minutos después de la aplicación de la fuerza. En tomate se ha observado también detención del crecimiento cuando la fuerza fue aplicada en los internodios basales. Esto puede ser la evidencia de la existencia de una señal rápidamente transmitida en sentido acrópeto desde el punto

en el cual se produjo la flexión hacia la zona situada debajo del meristema apical. Se descartó que este mensajero fuera el etileno como se pensó durante cierto tiempo; sin embargo, se ha observado que el viento y otros factores de estrés mecánicos inducen la síntesis de etileno y se ha señalado que esta hormona está involucrada en la respuesta **gravitrópica**, la cual, como el viento, se halla incluida dentro de los estímulos mecánicos. Respecto del posible mensajero, actualmente las evidencias parecen indicar a compuestos del tipo de las **fitoalexinas** como los más probables compuestos que transmiten la señal tigmomórfica.

En cuanto a las auxinas, desde hace mucho tiempo se las ha señalado como involucradas en las respuestas gravitrópicas. Aparte de estas observaciones existen muy pocas experiencias relacionadas con la acción de estas hormonas en las respuestas tigmomorfogénicas, aunque hay evidencias de la acumulación de sustancias auxínicas y de altos niveles de **Ácido Abscísico** en respuesta a la flexión de los ejes.

Un hecho muy interesante relacionado con los aspectos fisiológicos de la percepción del estímulo mecánico se refiere a la memoria de dicha percepción: Telewski (2006) señala que Valinger *et al.* (1994) obtuvieron la primera evidencia de una posible memoria en *Pinus sylvestris*, los cuales habían sido sometidos a estrés mecánico por flexión mientras eran conservados a -6°C (es decir, que se impidió el crecimiento). Cuando los árboles fueron colocados en condiciones apropiadas para retomar su ritmo de crecimiento, mostraron respuestas tigmomorfogénicas.

EFECTO DE FUERTES VIENTOS

En esta sección se tratará brevemente el efecto de vientos que pueden calificarse de **catastróficos** (Everham & Brokaw, 1996), como es el caso de los huracanes. Asimismo, se hará un breve comentario acerca del viento Zonda, el cual si bien no llega a tener la intensidad de los huracanes, en Argentina reviste gran importancia pues produce significativos quebrantos económicos principalmente en provincias como Mendoza y San Juan, en las cuales ocurre más frecuentemente.

Everham & Brokaw (1996) designan como vientos catastróficos los huracanes, vendavales, ventarrones, ciclones y tornados. Estos vientos producen un rango importante de daños sobre la vegetación, en especial caída de árboles en un área que puede llegar a tener una extensión muy considerable, la cual estará determinada tanto por factores bióticos como abióticos que influyen sobre la severidad del daño. Dentro de los primeros se encuentran la altura y el diámetro del tallo, la especie, las condiciones del stand (entre los que se incluye la estructura del canopy y la densidad) y la presencia de patógenos. Los abióticos incluyen la intensidad del viento, la existencia de disturbios previos, la topografía y las características del suelo.

Cook *et al.* (2010) dan cuenta de un ciclón ocurrido en Australia en 2006 el cual alcanzó un área de sabana distante hasta 50 km de la costa, decapitando árboles o desraizándolos en una superficie muy importante. Estos autores concluyen que los

vientos de características catastróficas tienen importantes implicancias en los procesos ecológicos de las sabanas australianas, relacionados con la dinámica flujos de carbono y agua. Brooks (1946) informa de un huracán que azotó el Estado de Florida (Estados Unidos) e impactó en una zona dedicada a la producción de paltas, limas y mangos; los vientos alcanzaron una velocidad máxima de 240 km/h y la categoría de huracán se mantuvo durante 50 minutos. Las observaciones de campo mostraron que, en el caso de los paltos, el daño era variable y estaba relacionado con la altura de los árboles, el tamaño y la estructura del canopeo, y en menor grado con la variedad. En cuanto al efecto de la protección brindada por cortinas rompevientos, se observó que éstas ejercían sus efectos frente a vientos que no superaban los 160 km/h.

Viento Zonda

Es el nombre regional que se le da en Argentina a un viento que se lo conoce en todo el mundo bajo la denominación de Foehn, el cual es característico de las regiones montañosas de Austria y Alemania. Precisamente el Zonda es típico del pedemonte en las provincias de Mendoza, San Juan y Catamarca donde se observa frecuentemente un viento fuerte cálido y muy seco que desciende desde la montaña hacia el valle o llano. Este viento se produce cuando la presión es relativamente alta a barlovento y el aire es forzado a subir por la montaña con su consecuente expansión y enfriamiento adiabático a razón de 0,65°C cada 100 m. Durante el descenso, al llegar a la planicie la temperatura ambiente puede aumentar de manera abrupta en 15 a 20°C y la temperatura del punto de rocío desciende en 15 a 20°C en pocas horas, produciendo una brusca e importante disminución de la humedad relativa del aire; la velocidad del viento en superficie puede alcanzar un rango entre 54 y 72 km h⁻¹ (Seluchi *et al.*, 2002).

La adversidad meteorológica suele producirse con mayor frecuencia entre agosto-noviembre, período en el que la vid, el olivo y otros frutales florecen (Caretta *et al.*, 2004). Los cultivos son dañados debido al brusco descenso de la humedad relativa e incremento notable de la temperatura, lo que produce una marcada deshidratación de los órganos florales, principalmente de los estigmas, evitando la adherencia y germinación del grano de polen y posterior fecundación del óvulo (Silva *et al.*, 2004). El ascenso de la temperatura produce la aceleración de los procesos fisiológicos relacionados con la madurez de los órganos florales, interrumpiendo el desarrollo del tubo polínico y abortando la flor. También deshidrata el grano de polen y produce daños mecánicos en el árbol. Cuando las temperaturas son superiores a 27°C los procesos de envejecimiento del óvulo se aceleran y pueden producirse problemas de infertilidad si la polinización no es inmediata a la apertura de la flor. Asimismo, ocurren impedimentos relacionados con los insectos polinizadores pues se verifica que las abejas no realizan vuelos cuando la velocidad del viento supera los 35 km h⁻¹.

BARRERAS EÓLICAS

Es una denominación genérica que designa a sistemas biológicos (árboles, arbustos, hierbas) o no biológicos (mamparas, paredes, empalizadas) utilizados con el propósito de reducir la intensidad del viento y proveer de esta manera protección

a los cultivos, al ganado o al hombre; además propicia el resguardo del suelo en aquellas áreas cuya cobertura vegetal es escasa o nula y, por lo tanto, susceptibles a la erosión eólica (Golberg *et al.*, 2003).

El término barrera eólica incluye la denominación **cortina rompeviento** o directamente rompeviento (equivalente al término inglés *windbreak* y francés *brise vent*) y también a la de barrera protectora (equivalente a *shelterbelt* en inglés).

En Heisler & Dewalle (1988) se realizan las siguientes consideraciones en relación con el diseño de los rompevientos: **1-** La extensión horizontal de la protección es generalmente proporcional a la altura de la cortina. **2-** Las máximas reducciones de la intensidad del viento están relacionadas con la **porosidad (\emptyset)**. Esta característica constituye el descriptor más difundido de la estructura interna de la cortina la cual podría definirse como la relación existente entre el área perforada (los claros de la barrera que permiten el paso del viento) en relación con el área total. Desde el punto de vista de la \emptyset las cortinas pueden dividirse en impermeables -aquellas cuya porosidad está en el rango de 0-25%- y permeables cuando \emptyset va de 45-55%. Los resultados de ensayos realizados a campo y en túnel de viento por Schwartz *et al.* (1995) muestran que, para una amplia gama de barreras, una porosidad del 45% ofrece una protección óptima verificada en función de la reducción de la velocidad del viento y la distancia a la que se extiende la protección, la cual -como regla general- alcanza hasta 10 veces la altura (H) de la cortina. **3-** Barreras naturales de un ancho menor o igual a H producen mayor reducción del viento y un área de protección más grande que las que exceden H. **4-** La mayor eficiencia de la protección se alcanza cuando la cortina se ubica de manera perpendicular a los vientos dominantes en la región.

En cuanto a los **efectos de los rompevientos en la disminución de los daños sobre las plantas**, se citan los siguientes: disminución del daño mecánico, aumento de la precocidad del cultivo, mejora del estado hídrico de las plantas, incremento de los rendimientos de los cultivos (Golberg *et al.*, 2003). La respuesta de los distintos cultivos a la protección es disímil (Stoeckeler, 1965); desde este punto de vista existen especies cuya respuesta es baja como los cereales de invierno y maíz; otros de respuesta moderada como la alfalfa, gramíneas forrajeras, lupino, trébol y arroz; y de respuesta alta, como árboles frutales, tabaco, té, lenteja.

REFLEXIÓN FINAL

Se ha intentado dar un panorama amplio de los efectos del viento sobre las plantas: se han tratado de mostrar los múltiples aspectos en los que interviene en la biología de los vegetales, no sólo como agente de estrés sino ejerciendo una importante influencia en la propagación de las poblaciones y en la fecundación de especies anemófilas. Se ha incluido también una sección relacionada con la protección de los cultivos mediante barreras eólicas, tratándose de enfatizar la importancia que pueden tener estos artificios en el crecimiento vegetal y el incremento del rendimiento de los cultivos.

BIBLIOGRAFÍA

- Baker, J. T. 2007. Cotton seedling injury and recovery from Wind Blown Sand Abrasion: I. Duration of exposure. *Agronomy Journal*. 99, 556-561.
- Bannan, M. W.; Bindra, M. 1970. The influence of wind on ring width and cell length in conifer stems. *Canadian Journal of Botany*. 48, 255-259.
- Berry, P. M.; Spink, J. H.; Gay, A. P.; Craigon, J. 2003. A comparison of root and stem lodging risks among winter wheat cultivar. *The Journal of Agricultural Science*: 141, 191-202.
- Berthier, S.; Stokes, A. 2005. Rightin response of artificially inclined maritime pines (*Pinus pinaster*) saplings to wind loading. *Tree Physiology*. 26, 73-79.
- Boldes, U.; Colman, L.; Marañón Di Leo, J. 2003. Características del viento. En: Viento, suelo y plantas. Golberg, A. D.; Kin, A. G. eds. Ediciones INTA, 9-20.
- Bravo, W.; Franco, J.; Main, G.; Carrasco, E.; Gabriel, J. 2002. Evaluación de la dispersión de polen como medida de bioseguridad para la liberación de plantas transgénicas de papa a campo. *Revista Latinoamericana de la Papa*. 13, 95-103.
- Brooks, J. R. 1946. Hurricane damage to commercial fruit trees in Dade County. *Florida State Horticultural Society*. p. 149-151.
- Brown, J. K. M.; Hovmoller, M. S. 2002. Aerial dispersal of pathoogens on the global and continental scales and its impact on plant disease. *Science*, 297, 537-541.
- Caldwell, M. M. 1970. Plant gas exchange at high speeds. *Plant Physiology*. 46, 535-537.
- Caretta, A.; Ortega, A.; Ortiz Maldonado, A. 2004. Probabilidades de daño por Viento Zonda en la floración de frutales, vid y olivos. Mendoza, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo*. 36(2): 49-58.
- Chebab, W.; Eich, E.; Braam, J. 2009. Thigmomorphogenesis: A complex plant response to Mechano-Stimulation. *Journal of Experimental Botany*. 60, 43-56.
- Clark, A. J.; Landolt, W.; Bucher, J. B.; Strasser, R. J. 2000. How wind affects the photosynthetic performance of trees: Quantified with chlorohyll a fluorescence and open-top chambers. *Photosynthetica* 38, 349-360.
- Clemente, H. S.; Marler, T. E.; Thomas, E. 2001. Trade winds reduce growth and influence gas exchange patterns in Papaya seedlings. *Annals of Botany*. 7, 379-385.
- Cook, G. D.; Clemence, M. A.; Goyens, C. 2008. The impact of wind on trees in Australian Tropical savannas: lessons from Cyclone Monica. *Austral Ecology*. 33, 462-470.
- Daudet, F. A.; Le Roux, X. ; Sinoquet, H ; Adam, B. 1999. Wind speed and leaf boundary layer conductance variation within tree crown. Consequeneces on leaf to atmosphere coupling and trees functions. *Agricultural and Forest Meteorology*. 97, 171-185.
- Davies, W. J.; Gill, K.; Halliday, G. 1978. The influence of wind on the behaviour of stomata of photosynthetic stems of *Cytisus scoparius* (L.) Link. *Annals of Botany*, 42, 1149-1154.
- de Langre, E. 2008. Effects of wind on plants. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 40, 141-168.
- Drake, B. G.; Raschke, K.; Salisbury, F. B. 1970. Temperature and transpiration resistances of Xanthium leaves as affected by air temperature, humidity, and wind speed. *Plant Physiology*. 46, 324-330.
- Dunham, R. A.; Cameron, A. D. 2000. Crown stem and word properties of wind-damaged and undamaged Stika Spruce. *Forest Ecology and Management*. 135(1-3): 73-81.
- Ennos, A. R. 1991. The mechanics of anchorage in wheat, *Triticum aestivum* L.: the anchorage of wheat seedlings. *Journal of Experimental Botany*. 42, 1601-1606.
- Entz, P. 2004. Lodging in cereals.http://umanitoba.ca/afs/agronomistsconf/proceedings/2004/ent2p_lodging_in_cereals.pdf . 24/2/2010.
- Everham, E. M.; Brokaw, N. V. L. 1996. Forest damage and recovery from catastrophic wind. *The Botanical Review*. 62, 113-185.

- Flückiger, W.; Oertli, J. J.; Flückiger Keller, H. 1978. The effect of wind gusts on leaf growth and foliar water relations of Aspen. *Oecologia*. 34, 101-106.
- Golberg, A. D.; Boldes, U.; Colman, J. 2000. Influence of the turbulence length scales of the incident wind on the leaf elongation rate (LER) of wheat seedling. *Latin American Applied Research*. 30, 69-74.
- _____; Kin, A. G. 2003. Viento, suelo y plantas. Ediciones INTA. 130 p.
- _____; Boldes, U.; Colman, J. 2003. La protección de los cultivos de los efectos del viento. En: Viento, suelo y plantas. Golberg, A. D.; Kin, A. G. eds. Ediciones INTA. p. 75-130.
- Grace, J. 1974. The effect of wind on grasses. I. Cuticular and stomatal transpiration. *Journal of Experimental Botany*. 25, 542-551.
- _____. 1977. Plant response to wind. Academic Press. London, New York, San Francisco. 204 p.
- _____; Russell, G. 1977. The effect of wind on grasses. III. Influence of continuous drought or wind on anatomy and water relations in *Festuca arundinacea* Schreb.
- _____; Russell, G. 1982. The effect of wind and reduced supply of water on the growth and water relations of *Festuca arundinacea* Schreb. *Annals of Botany*, 49, 217-225.
- Govenement of Alberta. Agriculture and Rural Development. 2001. Lodging of cereal crops. [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdoc.nts/all/crop1271](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdoc.nts/all/crop1271). 14/12/2009.
- Gurevitch, J.; Scheiner, S. M.; Fox, G. A. 2006. The ecology of plants. 2nd Edition. Sinauer ed. 518 p.
- Heisler, G. M.; Dewalle, D. R. 1988. Effects of windbreak structure on wind flow. *Agricultural Ecosystems Environment*. 22/23, 41-69.
- Hoad, S. P.; Jeffree, C. E.; Grace, J. 1992. Effects of wind and abrasion on cuticular integrity in *Fagus sylvatica* L. and consequences for transfer of pollutants through leaf surfaces. *Agricultural Ecosystem Environment*. 42, 275-289.
- Hoad, S. P.; Marzoli, A.; Grace, J.; Jeffree, C. E. 1998. Response of leaf surface and gas exchange to wind stress and acid mist in Birch (*Betula pubescens*). *Trees*. 13, 7-12.
- Hofshi, R.; Arpaza, M.L. 2002. Avocado fruit abnormalities and defects revisited. *California Avocado Society Yearbook*. 86, 147-162.
- Hoyle, M.; Cresswell, J. E. 2007. Polinización cruzada entre cultivos GM y cultivos tradicionales. *Ecología Aplicada*. 17, 1234-1243.
- Hunt, E. R.; Jaffe, M. J. 1980. Thigmomorphogenesis: The interaction of wind and temperature in the field on the growth of *Phaseolus vulgaris* L. *Annals of Botany*. 45, 665-672.
- Jaffe, M. J. 1973. Thigmomorphogenesis: The response of plant growth and development to mechanical stimulation. *Planta*. 114, 143-157.
- _____; Forbes, S. 1993. Thigmomorphogenesis: the effect of mechanical perturbation on plants. *Plant Growth Regulation*. 12, 313-324.
- Jeffree, C. E.; Grace, J.; Hoad, S. P. 1994. Spatial distribution of sulphate uptake by wind-damaged beech leaves. In: Percy, K. E.; Cape, J. N.; Jagels, R.; Simpsons, C. J. eds. *Air pollutants and the leaf cuticle*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York. p. 183-193.
- Kin, A. G.; Ledent, J. F. 2003. Efectos del viento sobre las plantas. En: Viento, suelo y plantas. Golberg, A. D. & A.G. Kin, eds. Ediciones INTA. p. 45-72.
- _____; Ledent, J. F. 1994. Effect of strong winds on young maize seedlings. In: *Proceedings of the 3rd Congress of The European Society for Agronomy*. M. Borin & M. Sattin eds. Abano, Padova, Italy. 18-22 September. p. 376-377.
- _____; Ledent, J.F. 1996. Le vent, un facteur limitant en culture de maïs. En : *Guide de Maïs 1995-1996*. Service Technique CIPF. Capellen, O.; Ledent, J. F. eds. Louvain La Neuve. p. 144-150.
- Kitano, M.; Tateishi, J.; Eguchi, H. 1995. Evaluation of leaf boundary layer conductance of a whole plant by application of abscisic acid Inhibiting transpiration. *Biotronics*, 24, 51-58.

- Kitaya, Y.; Shibuya, T.; Yoshida, M.; Kiyota, M. 2004. Effects of air velocity on photosynthesis of plant canopies under elevated CO₂ levels in a plant culture system. *Advances in Space Research*. 34, 1466-1469.
- Kobriger, J. M.; Kliewer, W. M.; Lagier, S. T. 1984. Effects of wind on water relations of several grapevine cultivars. *American Journal of Enology and Viticulture*. 35, 164-169.
- Knight, T. A. 1841. Citado por Jaffe, M.J.; Forbes, S. 1993. Thigmomorphogenesis: the effect of mechanical perturbation on plants. *Plant Growth Regulation*. 12, 313-324.
- Larson, P. R. 1965. Stem form of young larch as influenced by wind and pruning. *Forest Science*. 11, 412-424.
- Mac Kerron, D. K. L. 1976. Wind damage to the surface of strawberry leaves. *Annals of Botany*. 40, 351-354.
- Marler, T. E.; Clemente, S. H. 2006. Papaya seedling growth response to wind and water deficit is additive. *Horticultural Science*. 41, 96-98.
- Martin, T.A.; Hinckley, T. M.; Meinzer, F. C.; Sprugel, D. C. 1999. Boundary layer conductance, leaf temperature and transpiration of *Abies amabilis* branches. *Tree Physiology* 19, 435-443.
- Morales, P.; Davies, F. S.; Litell, R. C. 2000. Pruning and skirting affected canopy microclimate yields and fruit quality of "Orlando" tangelo. *Horticultural Science*, 30-35.
- Mulugeta, D.; Maxwell, B. D.; Fay, P. K.; Dyer, W. E. 1994. *Kochia (Kochia scoparia)* pollen dispersion, viability and germination. *Weed Science*. 42, 548-552.
- Nathan, R.; Katul, G.G. 2005. Foliage shedding in deciduous forests lifts up Longdistance seed dispersal by wind. *Proceedings of the National Academy of Science of USA*. 102, 8251-8256.
- Noel, P. L.; Harris, R. W. 1971. Motion-induced inhibition of elongation and induction of dormancy in *Liquidamber*. *Science*. 173, 58-59.
- Noguchi, Y. 1979. Deformation of trees in Hawaii and its relation to wind. *Journal of Ecology*. 67, 611-628.
- NSW Department of Primary Industries. 2003. Growing lemons in Australia -a production manual- Reader's Note. <http://www.dpi.nsw.gov.au/agriculture/citrus/lemon-manual>. 5 p. 9/12/2009
- Pachepsky, L. B.; Ferreyra, R. A.; Collino, D.; Acock, B. 1999. Transpiration rates and leaf boundary layer parameters for Peanut analyzed with two-dimensional model 2DLeaf. *Biotronics*, 28, 1-12.
- Parlange, J. Y.; Waggoner, P. E. 1972. Boundary layer resistance and temperature distribution on still and flapping leaves. II. Field Experiments. *Plant Physiology*. 50, 60-63.
- Pinthus, M. J. 1973. Lodging in wheat, barley and oats: the phenomenon, its caused and preventive measure. *Advances in Agronomy*. 25, 209-263.
- Pitcairn, C. E. R.; Grace, J. 1982. The effect of wind and a reduced supply of Phosphorus and Nitrogen on the growth and water relations of *Festuca arundinacea* Schreb. *Annals of Botany*. 49, 649-660.
- _____; Grace, J. 1984. Wind and surface damage. In: *The effect of Shelter on the physiology of plants and animals*. J. Grace ed. p. 115-126. Swets & Zeitlinger. Lisse.
- _____; Jeffre, C.E.; Grace, J. 1986. Influence of polishing and abrasion on the diffusive conductance of leaf surface of *Festuca arundinacea* Schreb. *Plant. Cell and Environment*. 9, 191-196.
- Pruyn, M. L.; Ewers, B. J.; Frank, W. T. 2000. Thigmomorphogenesis: changes in the morphology and mechanical properties of two *Populus* hybrids in response to mechanical perturbation. *Tree Physiology* 20, 535-540.
- Rees, D. J.; Grace, J. 1980. The effect of wind on the extension growth of *Pinus contorta* Douglas. *Forestry*. 53, 145-153.
- _____; Grace, J. 2006. The effect of wind and shaking on the water relations of *Pinus contorta*. *Physiologia Plantarum*. 51, 222-228.

- Roden, J. S.; Pearcy R. W. 1993. The effect of flutter on the temperatura of poplar leaves and its implications of carbon gain. *Plant Cell Environ.* 16, 571-577.
- Russell, G.; Grace, J. 1978. The effect of wind on grasses. V. Leaf extension, diffusive conductance, photosynthesis in the wind tunnel. *Journal of Experimental Botany.* 29, 1249-1258.
- Sauthier, M. A.; Castaño, F. D. 2004. Dispersión del polen en un cultivo de maíz. *Ciencia, Docencia y Tecnología.* 29, 229-246.
- Schwartz, R. C.; Fryrear, D. B.; Harris, B. L.; Bilbro, J. D.; Juo, A. S. R. 1995. Mean flor and shear stress distributions as influenced by vegetative windbreak structure. *Agricultural Forest Meteorology.* 75, 1-22.
- Seluchi, M. E.; Norte, F. A.; Satyamurty, P.; Chan Chou, S. 2002. Análisis of three situations of the Foehn effect over the Andes (Zonda Wind) Using the Eta-CPTEC Regional Model. *Weather and Forecasting.* 18, 481-501.
- Sena Gomes, A. R.; Kozłowski, T. T. 1989. Responses of seedlings of two varieties of *Teobroma cacao* to wind. *Tropical Agriculture.* 66, 137-141.
- Silva, S.; Caloggero, S.; Raigón, J. M. 2004. Incidencia del Viento Zonda y heladas en la producción de almendros en San Juan. X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología. Mar del Plata, octubre 2004. p. 45-48.
- Skarpaas, O.; Auhl, R.; Shea, K. 2006. Environmental variability and the initiation of dispersal: turbulence strongly increase seed release. *Proceedings of the Royal Society. B.* 273, 751-756.
- Slatyer, R. O. 1967. *Plant-Water relationships.* Academic Press. Pp. 240-245.
- Smith, W. K.; Geller, G. N. 1980. Leaf and environmental parameters influencing transpiration: theory and field measurements. *Oecologia (Berl),* 46, 308-313.
- Stoekeler, J. H. 1965. The design of Shelterbelts in relation to crop yield improvement. *World Crops.* March 1965. 3-8.
- Taiz, L.; Zeiger, E. 2006. *Plant physiology.* 4th Edition. Sinauer Associated Inc. 764 p.
- Takashi, N.; Masayuki, O.; Hidezaku, S. 1997. Effects of wind and vapor pressure deficit on transpiration of tomato scions. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science.* 66, 105-112.
- Tams, A. R.; Mooney, S. J.; Berry, P. M. 2004. The effect of lodging in cereals on morphological properties of the Root-Soil Complex. The Regional Institute Ltd. SuperSoil 2004. 8 p.
- Telewski, F. W.; Jaffe, M. J. 1986. Thigmomorphogenesis: field and laboratory studies of *Abies fraseri* in response to wind or mechanical perturbation. *Physiologia Plantarum.* 66, 211-218.
- Telewski, F. W. 2006. A unified hypothesis of mechanoperception in plants. *American Journal of Botany.* 93, 1466-1476.
- Thompson, J. R. 1974. The effect of wind on grasses. II Mechanical damage in *Festuca arundinacea* Schreb. *Journal of Experimental Botany.* 25, 965-972.
- Tripathi, S. C.; Sayre, K. D.; Kaul, J. N.; Narang, R. S. 2004. Lodging behavior and yield potential of spring wheat (*Triticum aestivum* L.): Effects of etephon and genotypes. *Field Crop Research.* 87. Issues 2-3, p. 207-220.
- Valinger, E.; Lundqvist, L.; Sundberg, B. 1994. Mechanical stress during dormancy stimulates stem growth of scot pine seedlings. *Forest Ecology and Management.* 67, 299-303.
- Vogel, S. 1989. Drag and reconfiguration of broad leaves in high winds. *Journal of Experimental Botany.* 217, 941-948.
- Wilson, J. 1980. Macroscopic features of wind damage to leaves of *Acer pseudoplatanus* L. and its relationship with season, leaf age and windspeed. *Annals of Botany.* 46, 303-311.
- Woodward, F. I. 1983. The significance of interspecific differences in specific leaf area to the growth of selected herbaceous species from different altitudes. *New Phytologist.* 95, 313-323.
- Woodrow, I. E.; Ball, J. T.; Berry, J. A. 1990. Control of photosynthetic carbon dioxide fixation by the boundary layer, stomata and ribulose 1, 5 Biphosphate Carboxylase/Oxygenase. *Plant, Cell and Environment.* 13, 339-347.

- Woolley, J. T. 1961. Mechanisms by which wind influences transpiration. *Plant Physiology*, 36, 112-114.
- Yasutake, D.; Kitano, M.; Araki, T.; Nagasuga, K. Kawano, T.; Hamakoga, M. 2001. Stomatal response to wind on abaxial and adaxial surfaces of Cucumber leaf under different humidity conditions. *Biotronics*, 30, 103-114.

Agradecimiento

A los doctores Ulfilas Boldes y Jorge Colman y a todos los investigadores del Laboratorio de Fluidodinámica del Departamento de Aeronáutica-Universidad Nacional de La Plata, por haberme enseñado qué es el viento.