

ISSN 0104-1347

Redução relativa da velocidade do vento com quebra-ventos de diferentes porosidades ¹

Relative windspeed reduction by windbreak with different porosities

Edgar Ricardo Schöffel¹, Clovis Alberto Volpe²

Resumo - Os quebra-ventos proporcionam proteção aos humanos, aos animais e às plantas. A eficácia dos quebra-ventos pode ser avaliada por alguns índices existentes na bibliografia. O propósito deste trabalho foi reavaliar a relação existente entre a redução relativa da velocidade do vento com a velocidade do vento a barlavento através de medidas de campo com quebra-ventos artificiais de diferentes porosidades. Foram utilizados quebra-ventos com porosidades de 82%, 70%, 50% e 30% e considerou-se apenas vento com ângulo de incidência superior a 70° em relação à barreira. A porosidade exerceu grande efeito sobre a redução relativa da velocidade do vento a sotavento. Quebra-ventos de baixa porosidade proporcionam maior redução da velocidade do vento a sotavento mas essa redução varia também em função da distância do quebra-vento e da magnitude da velocidade do vento a barlavento. Para velocidades do vento inferiores a 4 m s⁻¹ a redução relativa da velocidade do vento aumentou com o aumento da velocidade do vento a barlavento mas aumentou, também, a variabilidade desses dados.

Palavras-chave: redução do vento, barreira, densidade.

Abstract - Windbreaks provide protection to humans, animals and plants. The effectiveness of a windbreak can be evaluated by several indexes available in the literature. The objective of this work was to analyze and evaluate the relationship between relative windspeed reduction leeward with the windward windspeed, using field measurement with artificial windbreaks of different porosities. The experiment was carried out in Jaboticabal, São Paulo State, Brazil, using windbreaks with porosities of 82%, 70%, 50% and 30%, considering only winds with angle of incidence of 70° in relation to the the windbreak line. The porosity had great effect on the relative windspeed reduction at leeward. The windbreaks of low porosity provided larger reduction of the leeward windspeed, but such reduction also varied as a function of the distance of the windbreak line and of the magnitude of the windward windspeed. When the windward windspeed was less than 4 m s⁻¹, the relative windspeed reduction at leeward increased as the windward windspeed increased, but at this condition the variability of the data increased as well.

Key words: windspeed reduction, shelterbelt, density

¹ Pesquisa realizada com auxílio financeiro e bolsa de Pós-doutorado ao primeiro autor, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

¹ Eng. Agr., Dr., Prof. Departamento de Fitotecnia da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM/UFPEL). CEP 96010-900, Pelotas, RS. E-mail: ricardo_schoffel@ufpel.edu.br

² Eng. Agr., Dr., Prof. Departamento de Ciências Exatas da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/UNESP). CEP 14884-900, Jaboticabal, SP. E-mail: cavolpe@fcav.unesp.br

Introdução

Muitos fatores afetam a eficácia de um quebra-vento, como, por exemplos, as condições de estabilidade atmosférica, a geometria da superfície a ser protegida, representada pelo parâmetro de rugosidade do perfil da velocidade do vento, o ângulo de incidência do vento, a altura e a porosidade do quebra-vento (Mc NAUGHTON, 1988).

Em estudo com túnel de vento, WOODRUFF & ZINGG (1953) verificaram que barreiras de proteção com formas diferentes têm redução quase idêntica da velocidade do vento e da turbulência e que, portanto, as diferenças quanto a forma da barreira podem ser desprezadas. Posteriormente, isso também foi observado por WANG & TAKLE (1997), através de simulações numéricas de dados obtidos na literatura.

Acréscimos na rugosidade da superfície diminuem a velocidade do vento no perfil acima da cultura a ser protegida e, conseqüentemente, diminuem a eficácia do quebra-vento. A turbulência do fluxo de ar incidente tem influência na eficácia do quebra-vento. Quando as condições atmosféricas tornam-se mais instáveis a eficácia de um quebra-vento decresce (MILLER et al., 1975; VOLPE & SCHÖFFEL, 2001).

A distribuição da porosidade é, também, importante. Alta porosidade do quebra-vento perto do solo tem a vantagem de permitir o fluxo de ar, prevenindo contra a formação de diferença de pressão a sotavento, mas pode ter a desvantagem de atenuar pouco a velocidade do vento perto da superfície imediatamente a sotavento do quebra-vento (MILLER et al., 1975; BRENNER et al., 1995).

A distância da barreira na qual é efetiva a proteção do quebra-vento depende da sua altura. Quanto maior a altura da barreira, maior será a área protegida. A velocidade mínima do vento a sotavento decresce quando a porosidade decresce, mas a magnitude do decréscimo varia com a distância do quebra-vento e com a altura acima da superfície. A sotavento de um quebra-vento denso, a velocidade do vento iguala a velocidade do vento a barlavento em distância menor do que atrás de quebra-vento de densidade média, ou seja, de maior porosidade. Isto pode ser causado pelo desenvolvimento de um

gradiente de pressão atrás de um quebra-vento denso forçando a descida do ar, aumentando a turbulência e reduzindo, então, a amplitude da proteção (Mc NAUGHTON, 1988; VOLPE & SCHÖFFEL, 2001). Características individuais da folhagem e dos ramos das árvores usadas são importantes na determinação do grau de densidade do quebra-vento. Dessa forma, quebra-ventos mais porosos reduzem significativamente a velocidade do vento sem causar muita turbulência e, por isso, em comparação com os quebra-ventos menos porosos, são mais eficientes em distâncias maiores (ROSENBERG, 1974; BEAN et al., 1975; MILLER et al., 1975; LEAL, 1986).

Outro fator importante que afeta a eficácia do quebra-vento é o ângulo de incidência do vento (θ) no quebra-vento. A proteção máxima é esperada para ventos perpendiculares ao quebra-vento ($\theta = 90^\circ$), e a proteção mínima para ventos paralelos ($\theta = 0^\circ$) (VOLPE & SCHÖFFEL, 2001). Nesse sentido, WANG & TAKLE (1995) usaram simulações numéricas para estudar os processos físicos e dinâmicos pelos quais uma barreira de proteção influencia a direção de vento e concluíram que a alteração na direção do vento deve ser considerada, junto com a redução de velocidade, determinando os fluxos turbulentos próximo da barreira de proteção.

A eficácia de quebra-ventos pode ser avaliada de muitas maneiras. Vários índices já foram usados na literatura: velocidade relativa do vento η (SEGINER e SAGI, 1972), reduções relativas da velocidade do vento η_1 (van EIMERN et al., 1964; PLATE, 1971; WEI et al., 1987; ZHANG et al., 1995), o local, ou distância da barreira onde é mínima a velocidade do vento a sotavento (HEISLER e DEWALLE, 1988; LOEFFLER et al., 1992) e a distância máxima de proteção efetiva (WEI et al., 1987). Embora esses índices representem aproximações diferentes, todos eles são índices que avaliam a eficiência geral de quebra-ventos.

Dentre esses índices, a redução relativa da velocidade do vento (η_1) tem sido amplamente utilizada para referir a eficácia de quebra-ventos em reduzir a velocidade do vento. Para WEI et al. (1987) a η_1 pode variar de acordo com a velocidade do vento em área completamente aberta (μ_0), porém, existe uma η_1 limite que representa a η_1 mínima de um quebra-vento a uma distância particular, independente da μ_0 . Na prática, a distância efetiva de proteção de um

quebra-vento pode ser a distância a sotavento do quebra-vento para onde a velocidade do vento alcança uma velocidade ou uma porcentagem de μ_0 (por exemplo 60%), porém, tal distância é altamente dependente da porosidade da barreira (ROSENBERG et al., 1983). Quebra-ventos com altas porosidades tendem a dar maior distância de proteção mas, geralmente, menores η_1 (ZHANG et al., 1995).

Por intermédio de medidas, a diferentes distâncias da barreira, da velocidade e da direção do vento, para dois sistemas de quebra-vento e três tipos de porosidade do quebra-vento, ZHANG et al. (1995) verificaram que a redução relativa da velocidade do vento a sotavento da barreira esteve relacionada com a velocidade do vento a barlavento. Ainda, observaram a existência de uma velocidade do vento limite de aproximadamente 5 m s^{-1} abaixo da qual η_1 variou mas, geralmente, diminuiu quando μ_0 aumentou; quando μ_0 foi maior do que 5 m s^{-1} a η_1 permaneceu inalterada (constante), não apresentando efeito sobre a redução relativa da velocidade do vento na zona protegida pela barreira. Destaca-se, também, que nesse trabalho a porosidade da barreira foi estimada por meio da digitalização óptica de fotografias do quebra-vento.

Informações quanto à eficácia do quebra-vento são fundamentais e devem ser consideradas na elaboração de projetos e na instalação de sistemas de quebra-vento. A maioria dos experimentos com quebra-ventos foi realizada em condições de clima temperado e de túneis de vento (ambiente fechado). Pesquisas a campo que avaliem os benefícios da utilização de quebra-vento junto a culturas de interesse agrícola e as mudanças microclimáticas provocadas pelo uso de quebra-ventos nas condições climáticas nacionais são, ainda, escassas. Por isso, no Brasil, a utilização de sistemas de quebra-vento em áreas agrícolas é, ainda, um recurso pouco explorado pelos produtores rurais. Dessa forma, este trabalho foi desenvolvido com a finalidade de reavaliar a relação existente entre a redução relativa da velocidade do vento (η_1) com a velocidade do vento a barlavento (μ_0) com base em medidas de campo com quebra-ventos artificiais, de diferentes e uniforme porosidades e em duas localizações a sotavento, instalado em uma superfície plana e com vento soprando com o ângulo de incidência (θ) superior a 70° em relação à barreira.

Material e métodos

A velocidade e direção do vento foram medidas durante os meses de abril a agosto de 2002, em uma área próxima ao Departamento de Ciências Exatas da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista (FCAV/UNESP), Campus de Jaboticabal, cujas coordenadas geográficas do local são: $21^\circ 14' 05'' \text{S}$, $48^\circ 17' 09'' \text{W}$ e altitude média de 613 m.

Foi construída uma barreira de 48,0 m de comprimento e 6,0 m de altura (H), na orientação $64^\circ - 244^\circ$, disposta perpendicularmente aos ventos predominantes do local (direção sudeste). A estrutura da barreira foi constituída por oito fustes de eucalipto nos quais foram fixadas telas de polipropileno com uniforme e conhecida abertura de malha (porosidade). Foram utilizadas quatro telas de polipropileno as quais apresentam, segundo o fabricante (Sombrite®), porosidade de 82 %, 70 %, 50 % e 30 %. Cada tela permaneceu nessa estrutura por um período de aproximadamente 30 dias.

A velocidade do vento foi medida em quatro pontos distantes a 1H e 2H do quebra-vento artificial (H=6,0 m), sendo que dois estavam situados a barlavento e os outros dois a sotavento dessa barreira, quando se considera a direção predominante.

Os sensores para a medição da velocidade e da direção do vento foram instalados em uma superfície plana, aberta (livre de obstáculos) e coberta com grama (*Paspalum notatum* L.). A direção do vento foi medida com anemômetro modelo 5703, fabricado pela R.M. Young (Arizona, EUA), cujo elemento sensor é um potenciômetro com 1° de resolução na medida, enquanto que a velocidade do vento foi medida através de um anemômetro de canecas, modelo 014A-L34 da Met-One (Oregon, EUA), que tem resolução de leitura de $0,11 \text{ m s}^{-1}$.

Esses sensores meteorológicos estavam ligados a um sistema de aquisição dos dados, modelo XL21 da Campbell Scientific (Utah, EUA), programado para efetuar medição a cada segundo, e para armazenar, a cada minuto, um valor médio de cada sensor para esse intervalo de tempo. Ele foi energizado a partir de uma placa solar (Campbell Scientific, MSX 10R).

Classificou-se a direção dos ventos considerando o ângulo de incidência (θ) em relação à barreira. Esse ângulo varia entre 0° , quando a direção do vento é paralela à barreira, até 90° , quando a direção do vento é perpendicular à barreira. Como as medições de vento são obtidas nos dois lados da barreira, é possível considerar os ventos que incidem de ambos os lados. Foram selecionados apenas os dados de vento com $\theta \geq 70^\circ$ (referentes aos ângulos de direção entre 134° a 174°). Além disso, foram excluídos os dados em que os registros de velocidade do vento foram inferiores a $0,5 \text{ m s}^{-1}$, com a finalidade de diminuir o erro instrumental, uma vez que esse tipo de sensor exige uma velocidade mínima para sair da inércia, conforme destacaram ZHANG et al. (1995).

Os dados médios, referentes ao intervalo de um minuto, de direção e de velocidade do vento obtidos para cada porosidade (82 %, 70 %, 50 % e 30 %) do quebra-vento foram relacionados e analisados aos correspondentes valores para cada ponto de observação (1H e 2H), com o auxílio de planilhas eletrônicas. Após a exclusão dos dados em que a direção do vento em relação ao quebra-vento formou $\theta < 70^\circ$ e dos dados em que a velocidade do vento foi inferior a $0,5 \text{ m s}^{-1}$, restaram ainda para a devida análise, em cada ponto de observação: 727 pares de dados para o quebra-vento (QV) com porosidade de 82 %, 931 pares de dados para QV com porosidade de 70 %, 348 pares de dados para o QV com porosidade de 50 % e 336 pares de dados para o QV com porosidade de 30 %.

Para obtenção dos valores médios e para a análise da variância utilizou-se o pacote estatístico STATISTICA, versão 5.0, da Statsoft (Oklahoma, EUA). Posteriormente, a redução relativa da velocidade do vento (η_1), em %, foi calculada por:

$$\eta_1 = \frac{(\mu_b - \mu_s) 100}{\mu_b}$$

em que μ_b é a velocidade do vento a barlavento e μ_s é a velocidade do vento a sotavento do quebra-vento.

Resultados e discussão

A redução relativa da velocidade do vento (η_1)

a sotavento do quebra-vento (QV) foi menor quando a porosidade desse foi maior, porém, mesmo considerando individualmente cada porosidade e cada distância em relação ao QV, não foi possível estabelecer um valor constante para η_1 mas, sim, valores em torno dos quais oscila esse índice. Como pode ser observado na Figura 1(a,b), para a porosidade de 82 % a η_1 variou com o aumento da velocidade do vento a barlavento (μ_b) do QV. À distância de 1H do QV o valor médio de η_1 foi de 28 % sendo que, considerando o desvio padrão, o seu valor variou entre 38 % e 18 % para o intervalo de μ_b entre $0,5 \text{ m s}^{-1}$ e $3,5 \text{ m s}^{-1}$. Para esse mesmo intervalo de μ_b e mesma porosidade do QV, a η_1 oscilou entre 33 % e 11 % com valor médio de 22 % para a distância de 2H (Tabela 1). Dessa forma, a redução relativa da velocidade do vento foi um pouco mais efetiva a 1H do que a 2H no QV com 82 % de porosidade.

Na Figura 1(c,d) pode ser observada a distribuição dos dados referentes ao QV com porosidade de 70 % onde a η_1 média foi de 33 % e de 29 %, respectivamente, a 1H e a 2H, valores estes que variaram entre 18 % a 48 % (1H) e entre 16 % a 42 % (2H). Para a porosidade de 50 % (Figura 1e,f) a η_1 média foi de 37 % (1H) e de 35 % (2H), as quais apresentaram valores que oscilaram entre 23% a 51% (1H) e entre 22 % a 48 % (2H). Quando utilizou-se o QV com 30% de porosidade (Figura 1g,h) a η_1 média foi de 48% (1H) e de 38 % (2H), as quais apresentaram valores entre 37 % a 59 % (1H) e entre 25 % a 51 % (2H), para μ_b entre $0,5 \text{ m s}^{-1}$ e $3,5 \text{ m s}^{-1}$.

Como poderia ser esperado, confirmado pelos valores médios de η_1 , os quebra-ventos mais densos (menos porosos) proporcionam maior redução da velocidade do vento a sotavento, no entanto, a análise dos dados representados na Figura 1 e os valores apresentados na Tabela 1 indicam que a redução na velocidade do vento a sotavento varia em resposta não apenas às alterações na porosidade e na distância do QV, mas com as variações na velocidade do vento a barlavento (μ_b). Nota-se na Figura 1, que houve tendência de aumento de η_1 com o aumento da μ_b mas, concomitante a isso, verifica-se, também, uma tendência de aumento da dispersão dos valores de η_1 em função desse aumento da μ_b . Para o intervalo de velocidade do

Tabela 1. Eficácia de quebra-ventos de diferentes porosidades na redução da velocidade do vento medida em duas distâncias. Jaboticabal, SP, 2002.

Porosidade (%)	Distância (H)	η_1^* (%)	σ_{η_1}	Intervalo de μ_b (m s ⁻¹)	$\Delta\eta_1$ (%)
82	1	28	10	0,5 - 3,5	17,5
	2	22	11	0,5 - 3,5	22,2
70	1	33	15	0,5 - 4,3	16,5
	2	29	13	0,5 - 4,3	16,3
50	1	37	14	0,5 - 2,8	23,9
	2	35	13	0,5 - 2,8	23,6
30	1	48	11	0,5 - 3,5	12,1
	2	38	13	0,5 - 3,5	17,0

* (η_1) redução relativa da velocidade do vento; (σ_{η_1}) desvio padrão de η_1 ; (μ_b) velocidade do vento a barlavento do quebra-vento; ($\Delta\eta_1$) mudança na redução relativa da velocidade do vento; (H) equivalente à altura do quebra-vento.

vento registrado neste trabalho, esta tendência sugere maior variabilidade dos dados sob condições de velocidades do vento maiores.

Para determinar a adequada eficácia do QV em reduzir a velocidade do vento individualmente para cada porosidade e distância do QV, avaliou-se a mudança do valor de η_1 em função da alteração da μ_b . Assim, essa variação de η_1 ($\Delta\eta_1$) foi calculada pela razão entre o intervalo de variação relativa da velocidade do vento (η_1), obtida através do desvio padrão (σ) em relação ao valor médio de η_1 , e o limite máximo do intervalo de η_1 , isso tudo, dividido pela diferença entre o intervalo da velocidade do vento a barlavento (μ_b) nos quais foram realizadas as observações. Por exemplo, à distância de 1H do quebra-vento com porosidade de 82 % (Figura 1a,b) a $\Delta\eta_1$ foi estimada como: $\Delta\eta_1 = [(38-18)/38] / (3,5-0,5) = 0,175$ ou 17,5 %. Nesse caso, isso significa que para cada alteração unitária, em m s⁻¹, de μ_b haverá tendência de aumento de 17,5 % no valor da η_1 .

Na análise dos dados referente a porosidade de 70 % (Figura 1c,d), verifica-se que a relação entre $\Delta\eta_1$ e a distância do QV foi similar aquela observada para o QV com porosidade de 82 %, ou seja, $\Delta\eta_1$ foi de 16,5 % a 1H e de 16,3 % a 2H (Tabela 1). Para as porosidades de 50 % (Figura 1e,f) e de 30 % (Figura 1g,h) $\Delta\eta_1$ foi, respectivamente, de 23,9

% e de 12,1 % a 1H e de 23,6 % e de 17,0 % a 2H do QV (Tabela 1). Esses resultados indicam que a velocidade do vento em área protegida (sotavento) não pode ser assumida como valor independente da velocidade do vento a barlavento, uma vez que η_1 pode variar com as alterações na μ_b (Tabela 1) e, portanto, não é um bom índice para analisar a eficácia do QV.

No trabalho desenvolvido por SUDMEYER & SCOTT (2002), a magnitude da redução da velocidade do vento, em pontos distantes a 5H e a 12H do QV, mostrou-se constante para a faixa entre 3 a 8 m s⁻¹, mas decaiu para velocidades do vento menores do que 2 m s⁻¹. Destacam os autores que esses resultados podem ter acontecido porque erros na medição são proporcionalmente maiores a velocidades do vento menores e, também, devido ao decréscimo da estabilidade atmosférica com conseqüente aumento da turbulência, como sustentam ZHANG et al. (1995). No entanto van EIMERN et al. (1964) e WEN & WANG (1991) constataram em seus trabalhos que a influência da estabilidade atmosférica sobre a redução da velocidade do vento na área protegida foi relativamente menos importante em comparação com a porosidade e a distância do quebra-vento. Nesse sentido, Cao, citado por ZHANG et al. (1995), demonstra que o efeito da estabilidade atmosférica sobre a redução da velocidade do vento em área

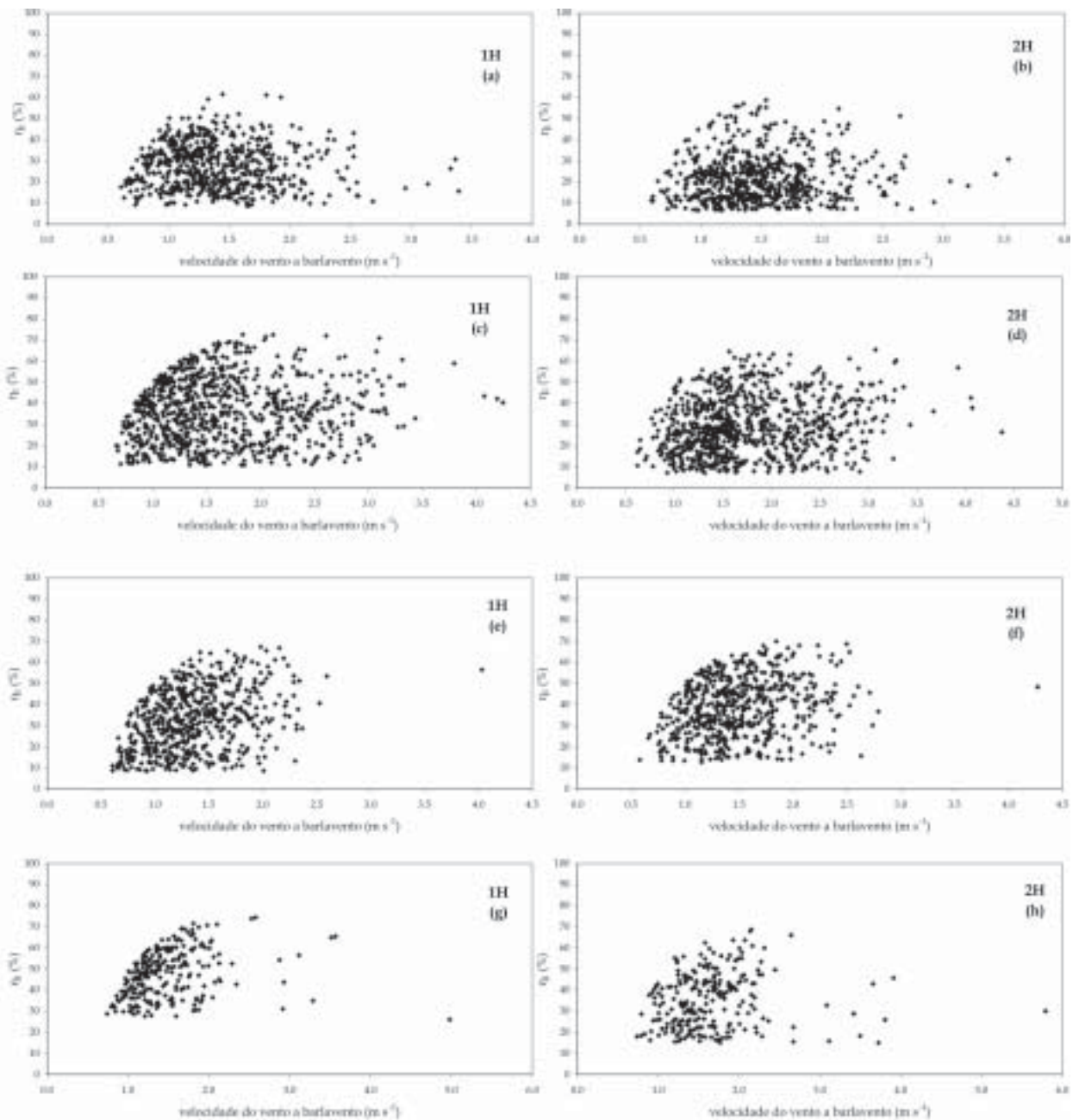


Figura 1. Redução relativa da velocidade do vento (η_1) a duas distâncias (1H e 2H) a sotavento de quebra-vento (QV) com porosidade de 82 % (a,b), 70 % (c,d), 50 % (e,f) e 30% (g,h). Jaboticabal, SP, 2002.

protegida foi consideravelmente pequeno para quebra-ventos com porosidades superiores a 35 %.

Com relação a possíveis erros instrumentais nas medições da velocidade do vento, ZHANG et al. (1995) descrevem que anemômetros de canecas exigem velocidade do vento mínima para sair da

inércia e podem proporcionar resultados errôneos quando a velocidade do vento for pequena. Para o modelo de anemômetro de canecas avaliado naquela pesquisa, os autores relatam que o cálculo da redução da velocidade do vento pode ser incorretamente alto, com erros de aproximadamente 17 % na determinação de η_1 quando a velocidade do vento

for de até 3 m s^{-1} . Quando a velocidade do vento for de 5 m s^{-1} esse erro é reduzido por 6 %. Dessa forma, em condições de baixas velocidades, problemas associados à inércia do sensor de velocidade do vento podem contribuir para que η_1 varie.

De modo geral, ao analisar a Figura 1 nota-se que as velocidades do vento registradas a barlavento, na sua quase totalidade, não foram altas sendo que o valor máximo registrado em todo o período de observações foi de $5,79 \text{ m s}^{-1}$, sendo este classificado como vento moderado pela escala de vento proposta por Beaufort (VOLPE & SCHÖFFEL, 2001), e em média a velocidade foi de aproximadamente $1,70 \text{ m s}^{-1}$. Isto pode ser justificado em parte porque esses valores representam a média transcorrida durante o tempo de um minuto e não o valor máximo absoluto ocorrido, mas, principalmente, porque a presença do QV proporciona redução da velocidade do vento também a barlavento de locais próximos à barreira. Quando o vento encontra uma barreira, no caso um quebra-vento, parte da sua energia é transferida a ela, parte ultrapassa para o outro lado através da sua porosidade e outra parte retorna provocando a desaceleração e a ascensão do vento incidente, formando a barlavento uma zona de instabilidade e turbulência.

A dispersão dos dados da Figura 1 reside, também, na dificuldade de classificar adequadamente a direção do vento para um intervalo de tempo de medidas próximas à superfície. Nesse sentido, destaca-se que para as condições desse experimento, a direção do vento é uma média estatística e como tal representa a direção na qual é esperada uma maior porcentagem de ocorrência do fenômeno em relação ao total de observações. No entanto, o valor médio registrado pode não ter acontecido em valores absolutos. Grandes dispersões nos dados de η_1 são comuns quando a velocidade do vento a barlavento for pequena, como pode ser consultado nos trabalhos de van EIMERN et al. (1964), ZHANG et al. (1995) e SUDMEYER & SCOTT (2002).

Conclusões

A porosidade do quebra-vento exerce grande efeito sobre a redução da velocidade do vento a sotavento. Vento com ângulo de incidência superior a 70° em relação à barreira tem a sua velocidade a

sotavento reduzida proporcionalmente à densidade da barreira e à distância do quebra-vento. A sotavento de um quebra-vento a redução relativa da velocidade do vento não deve ser usada de forma independente, pois esse índice depende da velocidade do vento a barlavento, da porosidade e da distância das medidas em relação ao quebra-vento, mesmo a curtas distâncias (1H e 2H). Para intervalos com baixas velocidades do vento a barlavento (4 m s^{-1}) a redução da velocidade do vento aumenta com o aumento da velocidade do vento mas, concomitantemente a isso, aumenta a variabilidade dessa redução.

Referências Bibliográficas

- BEAN, A.; ALPERI, R.W.; FEDERER, C.A. A method for categorizing shelterbelt porosity. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, n. 14, p. 417-429, 1975.
- BRENNER, A.J.; JARVIS, P.G.; BELT, R.J. Windbreak- crop interactions in the Sahel. 1. Dependence of shelter on field conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, n. 75, p. 215-234, 1995.
- HEISLER, G.M.; DEWALLE, D.R. Effects of windbreaks structure on windflow. **Agriculture Ecosystems Environment**, Amsterdam, v.22/23, p. 41-69, 1988.
- LEAL, A.C. **Quebra-ventos arbóreos: aspectos fundamentais de uma técnica altamente promissora**. Curitiba: IAPAR, 1986. (Informe da pesquisa, n. 67).
- LOEFFLER, A.E.; GORDON, A.M.; GILLESPIE, T.J. Optical porosity and windspeed reduction by coniferous windbreaks in southern Ontario. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v.17, n.2, p. 119-133, 1992.
- Mc NAUGHTON, K.G. Effects of windbreaks on turbulent transport and microclimate. In: BRANDLE, J.R.; HINTZ, D.L.; STURROCK, J.W. **Windbreaks Technology**, Amsterdam: Elsevier, 1988. p. 17-39.
- MILLER, D.R.; ROSENBERG, N.J.; BAGLEY, W.T. Wind reduction by a highly permeable tree shelterbelt. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, n. 14, p. 321-333, 1975.

- PLATE, E.J. The aerodynamics of shelter belts. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v.8, p. 203-222, 1971.
- ROSENBERG, N.J. **Microclimate: the biological environment**. New York: John Wiley and sons, 1974. 315 p.
- SEGINER, I.; SAGI, R. Drag on a windbreak in 2-dimensional flow. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v.9, n.5/6 p. 323-333, 1972.
- SUDMEYER, R.A.; SCOTT, P.R. Characterisation of a windbreak system on the south coast of western Australia. 1. Microclimate and erosion. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v.42, p. 703-715, 2002.
- van EIMERN, J.; KARSCHON, R.; RAZUMOVA, L.A.; ROBERTSON, G.W. **Windbreaks and shelterbelts**. World Meteorological Organization, 1964. 188p. Tech note n. 59.
- VOLPE, C.A; SCHÖFFEL, E.R.. Quebra-vento. In: RUGGIERO, C. **Banicultura**. Jaboticabal: FUNEP, 2001. p.217-232.
- WANG, H; TAKLE, E.S. Model-simulated influences of shelterbelt shape on wind-sheltering efficiency. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v.36, n. 6, p. 695-704, 1997.
- WANG, H; TAKLE, E.S. Numerical simulations of shelterbelt effects on wind direction **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v.34, n. 10, p. 2206-2219, 1995.
- WANG, H; TAKLE, E.S. The statistical analysis of shelterbelt structure and windproof efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.53, p. 257-266, 1991.
- WEI, L.; JIANG, A.; ZHANG, Y. On the effective protecting distance of shelterbelts. **Kexue Tongbao**, Oxford, v. 32, n. 9, p.605-609, 1987.
- WOODRUFF, N.P.; ZINGG, A.W. Wind tunnel studies of shelterbelt models. **J. Forest**, v. 53, n.1, p. 173-178, 1953.
- ZHANG, H.; BRANDLE, J.R.; MEYER, G.E.; HODGES, L. A model to evaluate protection efficiency. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v.32, n.3, p. 297-311, 1995.