

Novo Método de Medida de Evaporação e Evapotranspiração para Áreas de Plantio

Gúbio de Oliveira, Daniel M. Almeida, Vinicius T. Maia, Vinicius N. H. Silva, Andrés P. L. Barbero, Ricardo M. Ribeiro e Carlos R. Pereira

Resumo— Neste artigo apresentamos resultados preliminares da aplicação da Técnica de Triangulação de Potências Ópticas em meios turbulentos para realização de medidas de evapotranspiração. Mostramos que a variância da divagação de um feixe óptico (*Beam Wander*) ao se propagar em um meio com fluxo ascendente de vapor d'água é linearmente proporcional à taxa de evaporação. A técnica, se aplicada em áreas de plantio, poderá auxiliar na gestão dos recursos hídricos, diminuindo os gastos excessivos de água na agricultura.

Palavras Chave - *Evapotranspiração, Divagação do Feixe, Turbulência Atmosférica e Recursos Hídricos.*

Abstract—This article present preliminary results of the application of the Optical Triangulation Technique in turbulent medium to measure the evapotranspiration. It is shown that the beam radius variance is linear proportional to the evaporation ratio. The technique could help the management of the water resources in plantation.

Keywords—*Evapotranspiration, Beam Wander, Atmospheric Turbulence, Water Resources.*

I. INTRODUÇÃO

O fenômeno da evapotranspiração (EVT) é definido como a soma da evaporação da água dos rios, mares, lagos e da transpiração das plantas. Assim, mensurar o fenômeno indica a quantidade de água que uma região transfere para a atmosfera na forma de vapor. No caso de uma cultura, a medição da evapotranspiração pode vir a auxiliar na gestão eficiente dos recursos hídricos, evitando desperdícios [1].

Existem alguns métodos e equipamentos comerciais para medir a EVT. O lisímetro, uma estrutura na forma de um tanque colocada no solo, recoberto com vegetação local, possui uma balança no fundo para pesar a quantidade de água drenada e medir evapotranspiração através do balanço hídrico [2]. Outro equipamento é o tanque Classe A, colocado sobre o solo, cheio de água, mede a evaporação direta da lâmina de água [3]. O método do Eddy Covariance (EC) relaciona o fluxo vertical do vapor d'água com a velocidade ascendente do vento e a concentração de água [4]. Todos estes equipamentos realizam medidas pontuais de evapotranspiração, sendo necessária a extrapolação dos dados coletados quando se trata de grandes áreas como por exemplo plantações. No entanto, o cintilômetro (LAS –*Large Aperture Scintillometer*), que se utiliza do fenômeno de turbulência atmosférica para medir os fluxos de água, é capaz de medir a EVT em áreas da ordem de quilômetros quadrados [5].

Na atmosfera, a turbulência está relacionada com variações climáticas e apresenta três efeitos sobre a

propagação da luz: a Cintilação, o *Beam Wander* e o *Beam Spread*. A cintilação ocorre quando o feixe de luz passa através de uma região da atmosfera onde os vórtices turbulentos são relativamente menores do que o diâmetro do feixe. A frente de onda é deformada e aparecem manchas (*speckles*) pretas no plano receptor. O *Beam Spread* (alargamento do feixe) é quando o feixe de luz tem o raio efetivo da seção transversal a direção de propagação (W) aumentado ao passar por um meio turbulento. O *Beam Wander* ocorre quando os vórtices de turbulência são maiores do que o raio do feixe (W) [10]. Nesse caso, são observadas variações aleatórias na posição do feixe óptico no receptor. Assim, rastreando o feixe por meio da Técnica de Triangulação de Potências Ópticas consegue-se inferir e quantificar a turbulência atmosférica [6-9].

Este trabalho tem como objetivo mostrar experimentos preliminares demonstrando que é possível utilizar a Técnica de Triangulação de Potências Ópticas para medida direta de EVT. Sabendo que os efeitos de *Beam Wander* são mais presentes próximo a fonte geradora de turbulência, acredita-se que a técnica proposta apresentará melhores resultados quando comparada com o cintilômetro. Além disso, a própria técnica permite determinar a direção do fluxo de vapor d'água, o que não é possível com o LAS. Os experimentos realizados em laboratório apresentaram resultados conclusivos da capacidade da técnica e do dispositivo desenvolvido de medir fluxos de vapor d'água e EVT.

Este artigo está organizado como segue: Seção II apresenta a evapotranspiração e a teoria dos métodos de medida. A Seção III trata da Técnica de Triangulação Óptica e sua relação com a evapotranspiração por meio da turbulência atmosférica. A Seção IV apresenta o setup experimental montado em laboratório para a prova da capacidade do equipamento de medir os fluxos de vapor d'água. A Seção V apresenta os resultados encontrados e discussões e finalmente na seção VI, a conclusão.

II. EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evaporação pode ser entendida como um processo físico que acontece quando as moléculas d'água absorvem energia e passam do estado líquido para o estado gasoso, portanto um processo de transformação de calor sensível em calor latente. A transpiração é um processo biofísico pelo qual a água contida em um corpo é transferida para a atmosfera. Isso acontece devido à elevação da temperatura interna ou externa do corpo, fazendo a água fluir para a superfície do mesmo. No caso das plantas, este processo serve para a diminuição de sua temperatura e absorção de nutrientes do solo [11]. Logo, a evapotranspiração é o conjunto destes dois fenômenos e suas

Gúbio de Oliveira, Daniel M. Almeida, Vinicius T. Maia, Vinicius N. H. Silva, Andrés Pablo L. Barbero, Ricardo M. Ribeiro e Carlos R. Pereira, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói-RJ, Brasil, E-mails: gubio@hotmail.com.

medidas podem ser realizadas através do calor latente. Existem métodos de medida direta da evapotranspiração como o lisímetro e também métodos de medidas indiretas com o EC, e o LAS que levam em consideração os fluxos turbulentos ascendentes de calor latente em suas medidas.

A medida dos fluxos turbulentos devidos à evapotranspiração pode ser conduzida por meio de dois métodos: Método de Covariância de Vórtices Turbulentos e Método da Constante de Estrutura do Índice de Refração.

A. MÉTODO DE COVARIÂNCIA DE VÓRTICES TURBULENTOS

O Método de Covariância de Vórtices Turbulentos, ou *Eddy Covariance* (EC), é um método matemático para determinação de fluxos turbulentos. Primeiramente, mede-se o valor do fluxo de calor sensível H (W/m^2). Em seguida, o fluxo de calor latente λE (W/m^2) é calculado indiretamente por meio do balanço de energia [12]:

$$\lambda E = R_n - G - H \quad (1)$$

onde, R_n [Wm^{-2}] é a radiação líquida e G [Wm^{-2}] é o fluxo de calor do solo. H é dado por [13]:

$$H = \rho c_p \overline{w'T'} \quad (2)$$

onde ρ é a densidade de ar (kg/m^3), c_p o calor específico, w a velocidade do vento (m/s) e T a temperatura (K).

O EC para medidas do fluxo ascendente e determinação de R_n e G e T se utiliza-se de um anemômetro 3D e uma estação meteorológica.

B. MÉTODO DA CONSTANTE DE ESTRUTURA DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO

O Método da Constante de Estrutura de Índice de Refração lança mão de medidas de turbulência atmosférica para o cálculo da evapotranspiração. A grandeza que mede a turbulência atmosférica é a Constante de Estrutura do Índice de Refração, C_n^2 e se relaciona com a evapotranspiração pela relação [12]:

$$C_n^2 = C_T^2 \left(\frac{-0,78 \times 10^{-6} P}{T^2} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{0,03}{\beta} \right)^2 \right] \quad (3)$$

onde C_T^2 é a Constante de Estrutura de Temperatura e β é a razão de Bowen:

$$\beta = H / \lambda E \quad (4)$$

Verifica-se, observando (3) e (4), que a EVT pode ser determinada se medirmos a turbulência atmosférica (C_n^2). O trabalho mostra, nas próximas seções, como é possível medir a constante de estrutura de índice de refração e inferir o fluxo de vapor d'água através da Triangulação de Potências Ópticas. Mostraremos também a possibilidade, ainda que não explorada com riqueza de detalhes, de se aplicar a técnica no modelo de EC.

III. TÉCNICA DE TRIANGULAÇÃO DE POTÊNCIAS ÓPTICAS

Esta técnica vem sendo desenvolvida desde 2009 [6-9, 14] no Laboratório de Comunicações Ópticas da UFF e se utiliza do Beam Wander para o cálculo da turbulência atmosférica.

Considere um feixe óptico que se propaga na atmosfera até um plano receptor. Esta projeção tem sua posição modificada a medida que o feixe óptico é influenciado pela turbulência atmosférica. Esta movimentação da projeção do

feixe é o efeito do *Beam Wander*. A Figura 1 ilustra o efeito do Beam Wander.

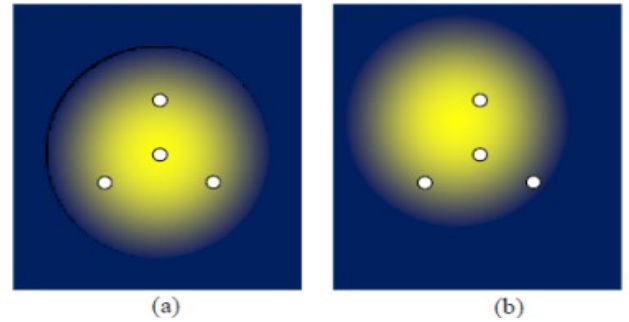


Fig. 1 - Distribuição gaussiana de potência do feixe óptico centralizado no plano receptor (a) e descentralizado devido a turbulência atmosférica (b).

Para determinar a posição do feixe três fotodetectores D_i , onde $i=1,2,3$, são posicionados de forma a constituírem os vértices de um triângulo equilátero. Assim, conhecendo a posição dos fotodetectores (x_i, y_i) , no plano receptor e medindo a potência óptica, P_i , em cada um deles, é possível determinar, a partir de um sistema de coordenadas de referência, a posição do feixe em um instante de tempo. Para isso basta considerar que a distribuição da potência óptica ($P(x, y)$) no plano receptor é gaussiana na forma:

$$P(x, y) = P_0 e^{-\left(\frac{r}{W}\right)^2} \quad (5)$$

onde W é a largura do feixe óptico gaussiano e P_0 potência central.

Assim, resolvendo o sistema de equações com as distâncias r_i , onde $r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$, pode-se calcular a posição (x_0, y_0) , que é o centro da projeção do feixe gaussiano [7]:

$$\begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - W^2(-\ln P_1) = 0 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 - W^2(-\ln P_2) = 0 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 - W^2(-\ln P_3) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Sabendo-se que $r_c = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$ é a distância entre o centro do feixe óptico e a origem do plano Cartesiano, realiza-se um tratamento estatístico destes dados encontrando-se o valor de C_n^2 [10]:

$$\langle r_c^2 \rangle = 2,72 C_n^2 L^3 W_0^{1/3} \quad (7)$$

onde $\langle r_c^2 \rangle$ representa o Beam Wander, L é a distância entre a fonte de luz e o plano receptor e W_0 o raio efetivo do feixe óptico. Sendo assim, pode-se relacionar o Beam Wander, a turbulência atmosférica e a evapotranspiração através das equações (3), (4) e (7).

IV. SETUP EXPERIMENTAL E RESULTADO

O SETUP experimental, na Figura 2, consiste na transmissão de uma fonte de luz (LASER- ThorLabs 980nm) acoplada a uma fibra monomodo em 980nm, essa por sua vez é conectada a um filtro modal para garantir uma distribuição gaussiana de potência na saída. A outra ponta da fibra é conectada a um colimador (F280 FC-B -Thorlabs) seguido de um expensor de feixe (BeamExpander 2X5 da Thorlabs) para ter um feixe com largura radial suficiente para medir os efeitos de Beam Wander. No plano receptor foram posicionados 4 fotodetectores (SFH 213 FA -OSRAM) com filtros em 980 nm e um ADC (Analogic Digital Converter –

National Instruments) para digitalizar os valores da potência óptica, em cada um dos fotodetectores e enviá-las a uma central de processamento para resolver o sistema de equações (6). A fonte de turbulência consistiu de um recipiente com capacidade de 7,3 L com água, que era aquecida por um ebulidor. O transmissor e receptor foram separados por 8,6 m e a fonte foi posicionada a 87 cm abaixo do feixe óptico, rente ao transmissor.

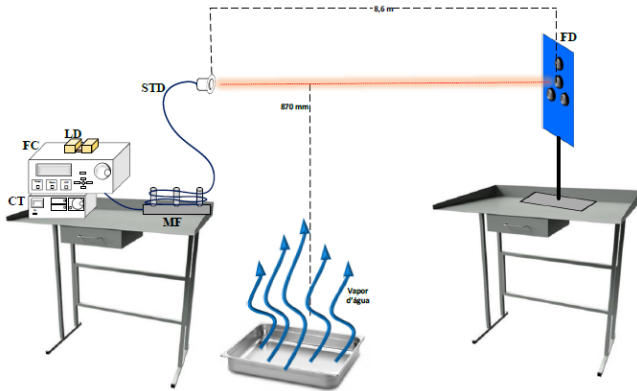


Fig. 2 - SETUP experimental.

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro passo é determinar o raio da projeção da gaussiana por meio do deslocamento do centro do feixe pelo fotodetector central ($W=12,5$ mm). Em seguida, os fotodetectores foram calibrados e todo o sistema alinhado. Em seguida, a água no recipiente foi aquecida para diferentes temperaturas. O vapor d'água turbilhonou o ar sobrejacente e os deslocamentos radiais do feixe foram medidos. Foram realizadas medidas nas seguintes temperaturas: 23 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C e 70 °C. Para cada temperatura foram verificadas duas grandezas: o fluxo de água a temperatura constante e a variância do deslocamento do feixe. A tabela I sumariza os dados encontrados:

TABELA I. RESULTADOS DAS VARIÂNCIAS DE R_c E DAS TAXA DE EVAPORAÇÃO PARA AS DIVERSAS TEMPERATURAS.

Temperatura (°C)	Taxa de evaporação (mg/h)	Variância (mm)
23	22,2	$1,697 \times 10^{-5}$
30	43,9	$3,434 \times 10^{-5}$
40	85,8	$1,936 \times 10^{-4}$
50	193,6	$3,545 \times 10^{-4}$
60	353,4	$4,148 \times 10^{-4}$
70	600,6	$1,657 \times 10^{-3}$

A Figura 3 e 4 mostram, respectivamente, a taxa de vaporização e a variância radial em função da temperatura.

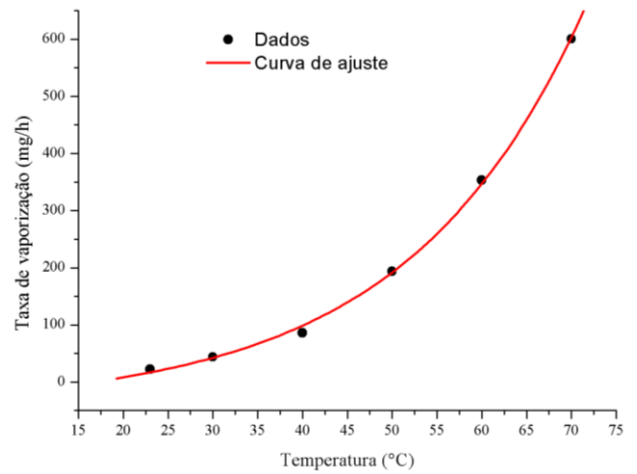


Fig. 3 - Variação da taxa de evaporação em relação à temperatura.

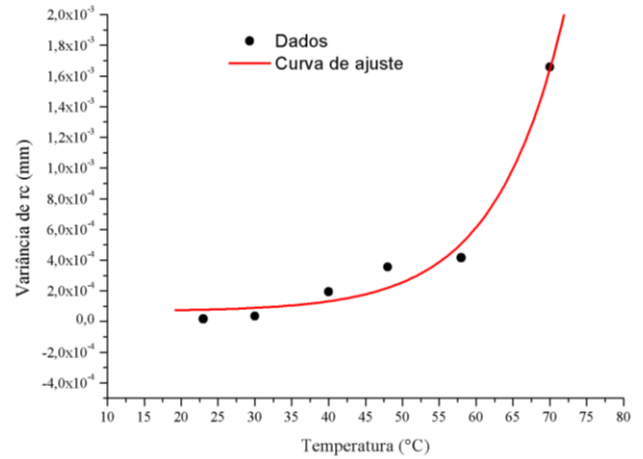


Fig. 4 - Variância de r_c em relação à temperatura.

A Figura 5 e 6 mostram, respectivamente, a medida menos turbulenta (23 °C) e a mais turbulenta (70 °C).

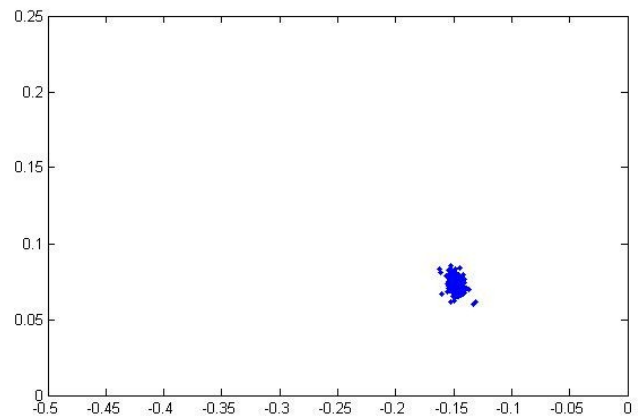


Fig. 5 - Dispersão dos centros instantâneos do feixe na medida menos turbulenta (medidas em mm).

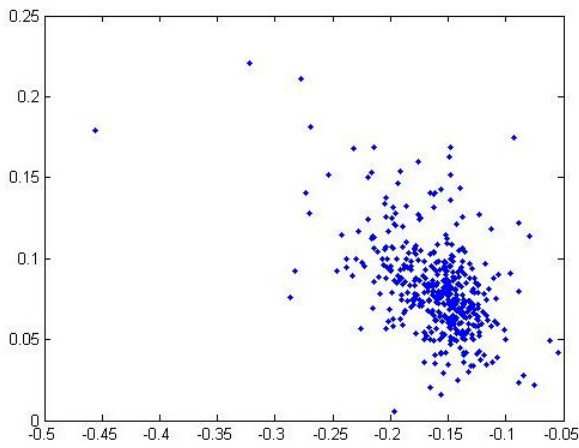


Fig. 6 - Dispersão dos centros instantâneos do feixe na medida mais turbulenta (medidas em mm).

O aumento do deslocamento radial do feixe é proporcional à intensidade da taxa de evaporação provocada pelo aquecimento da água existindo uma grande correlação entre as grandezas (0,94). A Figura 7 mostra uma relação linear, dentro da faixa de temperatura investigada, entre a variância de r_c e a taxa de evaporação.

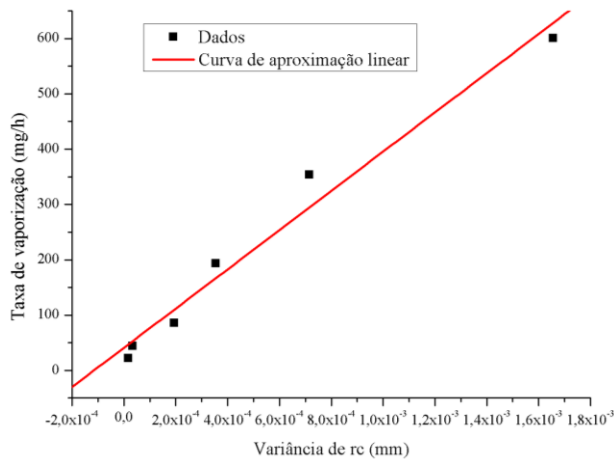


Fig. 7- Taxa de evaporação em função da variância de r_c .

Tendo em vista que existe relação entre a turbulência atmosférica e a umidade do ar, procederam-se duas medidas a 50°C, a primeira sem vapor, somente com a fonte de calor, e a segunda com vapor d’água, como já descrito. A medida sem vapor apresentou valor de variância de r_c de $2,201 \times 10^{-4}$ mm, já a medida com vapor d’água apresentou valor de $3,145 \times 10^{-4}$ mm. Um valor 40% maior de turbulência para a mesma temperatura e que está de acordo com Equação (3). Interessante observar na Figura 6 que a dispersão dos pontos está preferencialmente no eixo vertical, a mesma direção do vapor d’água. Isso nos possibilita a acreditar que a técnica é capaz de, não somente medir a EVT pelo método da Constante de Estrutura de Índice de Refração, mas também pelo método Eddy Covariance.

VI. CONCLUSÕES

Mostrou-se que a Técnica de Triangulação de Potências Ópticas pode ser usada para as medidas de EVT tanto pelo método de balanço de energia, como diretamente por meio da modelagem da relação existente entre o efeito do Beam Wander e do fluxo de vapor d’água. Foram realizadas medidas de turbulência sob influência de fluxo de vapor d’água para

simular a evapotranspiração. Como resultado foi encontrada forte correlação (0,94) entre o fluxo de vapor d’água e a variância de r_c (Beam Wander). Os resultados encontrados corroboram com a teoria que elenca a influência dos fluxos de vapor d’água sobre a turbulência atmosférica, apresentando acréscimo de 40% em seu valor.

REFERÊNCIAS

- [1] “UN water,” united nations, 2016. [Online]. Available: http://www.unwater.org/fileadmin/user_upload/unwater_new/docs/1_UN-Water_Annual_Report_2015_web.pdf.
- [2] L. CAMPECHE, Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida 'Tahiti' (Citrus latifolia Tan.). Tese (Doutorado), Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2002.
- [3] R. G. ALLEN, L. S. PEREIRA, D. RAES e M. SMITH, “FAO Irrigation and Drainage Paper - Crop Evapotranspiration,” 2006.
- [4] G. BURBA e D. ANDERSON, A Brief Practical Guide to Eddy Covariance Flux Measurements, Lincoln, Nebraska, EUA: LI-COR Biosciences, 2010.
- [5] S. LIU, M. HUANG e Q. ZHU, “A study of surface sensible heat fluxes with large aperture scintillometers,” em *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2003.
- [6] G. d. Oliveira, *Caracterização da constante de estrutura do índice de refração (Cn2) através de triangulação de potências ópticas*, Niterói, 2014.
- [7] V. N. H. SILVA, A. P. L. BARBERO e R. M. RIBEIRO, “A new triangulation-like technique for the evaluation of the refractive index structure constant (Cn2) in free-space optical links.,” *IEEE Journal of Light Technology*, vol. 29, pp. 3603-3610, 2011.
- [8] G. D. OLIVEIRA, V. T. MAIA, R. M. ALBINO, V. N. H. SILVA, A. P. L. BARBERO e R. M. Ribeiro, “Experimental Measurements of Atmospheric Turbulence Through Optical Triangulation Method for FSO applications,” em *Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Porto de Galinhas - PE, 2015.
- [9] G. d. Oliveira, V. N. H. Silva, A. P. L. Barbero, R. M. Ribeiro, T. V. N. Coelho e A. B. d. Santos, “Measurements of the Indoor/Outdoor Atmospheric Turbulence Through Optical Triangulation Method,” *Measurement Science and Technology*, vol. 28, 2017.
- [10] L. C. A. e R. Philips, *Laser Beam Propagation Through Random Media*, SPIE Press, 2005.
- [11] C. A. P. de e C. M. B. P. de, “Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial,” *Bragantia*, vol. 59, nº 2, pp. 125- 137, 2000.
- [12] W. M. L. MEIJNINGER, O. K. HARTOGENSIS e W. KOHSIEK, “DETERMINATION OF AREA-AVERAGED SENSIBLE HEAT FLUXES,” *Boundary-Layer Meteorology*, 2002.
- [13] D. D. BALDOCCHI, “Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future,” *Global change biology*, nº blackwell publishing, pp. 1-17, 2003.
- [14] V. N. H. SILVA, A. P. L. BARBERO e R. M. RIBEIRO, “Experimental development of a new technique to measure atmospheric turbulence in horizontal optical links through free space,” em *Workshop telecommun.*, São Paulo, 2009.

[15] C. A. Larry e L. P. Ronald, Laser Beam Propagation Through Random Media, Spie Press, 2005.