

Avaliação de modelos de *footprint* para análise de fluxos obtidos por *eddy-covariance* em pequenas-áreas.

Evaluation of footprint models for fluxes analysis using the eddy-covariance technique over small areas.

Ivan Mauricio Cely Toro, Ricardo Acosta Gotuzzo, Débora Regina Roberti e Jackson Ernani Fiorin

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

Resumo

São comparados dois modelos de cálculo do footprint de medidas de fluxo superficiais. Os cálculos estão baseados nos modelos analíticos de footprint de Kormann e Meixner (2001) [An analytical footprint model for non-neutral stratification. *Boundary-Layer Meteorology* 99, 207–224] e de Schuepp et al. (1990) [Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. *Boundary-Layer Meteorology* 50, 355–373]. As funções de densidade do footprint de um sensor de fluxo são determinadas utilizando os dados obtidos pelo método de eddy-covariance. Estas funções são integradas acima de áreas dadas como polígonos quadrangulares, como o caso campos de agricultura. Neste trabalho observam-se as características de cada modelo de footprint fazendo uso das medidas de fluxo com um sistema de eddy-covariance da rede SULFLUX, instalado em uma área de cultura agrícola. Finalmente se discute qual modelo descreve de maneira mais precisa as medições de fluxo em pequenas áreas.

Palavras-chave: Footprint, eddy-covariance, medidas de fluxo.

Abstract

Two models for footprint calculations are compared employing flux measurements in the planetary boundary layer. The calculations are based on the analytical models by Kormann e Meixner (2001) [An analytical footprint model for non-neutral stratification. *Boundary-Layer Meteorology* 99, 207–224] and by Schuepp et al. (1990) [Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. *Boundary-Layer Meteorology* 50, 355–373]. The footprint density functions of a flux sensor are determined using eddy-covariance data. Those functions are integrated over surfaces given by quadrangular rectangles, in this case an agricultural field. This work illustrates the features of each footprint model employing flux measurements with an eddy-covariance system of the SULFLUX network, installed on a agricultural field. Finally, it is presented the model that describes in a better way the flux measurements in small fields.

Keywords: Footprint, eddy-covariance, flux measurements..

1 Introdução

O estudo dos fluxos superficiais de energia, água e carbono tem sido cada vez mais utilizados para entender as interações biosfera-atmosfera em uma situação evidente de mudanças climáticas. A técnica de *eddy-covariance* (EC) tem sido amplamente empregada para obter medidas de fluxos superficiais, que pode ser aplicada ao monitoramento das emissões de gases do efeito estufa (GHG) tais como CO_2 e CH_4 , diretamente relacionados com o aquecimento global. A técnica EC necessita de medição de alta frequência, usualmente obtidas em torres micrometeorológicas.

A técnica de EC permite estimar fluxos sobre grandes áreas, diferentemente das câmaras de medição de fluxo, pois nestas, as informações obtidas estão confinadas em uma área fixa delimitada pelas paredes da mesma. Por outro lado, na técnica de EC a área que contribui significativamente nas medidas dos fluxos superficiais é uma função complexa que precisa ser avaliada em relação a: (i) altura em que são realizadas as medidas; (ii) rugosidade da superfície; (iii) altura e estrutura da cobertura; (iv) junto com condições micrometeorológicas (velocidade e direção do vento, intensidade da turbulência e estabilidade atmosférica entre outras).

O termo *footprint* define o "campo de visão" do sensor, ou seja, o contexto espacial de uma medida de fluxo superficial. Segundo Vesala et al. (2008), o *footprint* é o cálculo (nem sempre simples) necessário para conhecer a contribuição relativa de cada elemento de área na medição de fluxos verticais ou concentrações. É possível abordar este problema numericamente, com duas aproximações diferentes: (1) Métodos convencionais deterministas ou modelos analíticos, baseados na equação semi-empírica de difusão turbulenta, suposições de fechamento ou outros modelos de filtragem como grandes simulações, e (2) modelos estocásticos, baseados tanto em simulações do campo Euleriano de velocidades aleatórias ou modelos lagrangianos baseados em simulações de trajetórias lagrangianas.

Neste trabalho, comparam-se dois modelos analíticos de predição do *footprint* sobre uma cultura de aveia (*Avena Sativa*) no sul do Brasil, na região de Cruz Alta - RS. Por se tratar de uma área experimental de comparação de diferentes manejos do solo, a cultura avaliada foi plantada em uma parcela experimental de 40m x 60m. No entanto, os fluxos superficiais podem ser afetados por uma região maior do que a área do plantio, interferindo na real representação da cultura a ser estudada. A importância em se fazer um estudo sobre a comparação de modelos para calcular o *footprint* Foken e Leclerc (2004), reside na tentativa de explicar qual dos modelos descreve de maneira melhor adequada a contribuição do sinal oriunda da vegetação de interesse, para o posterior tratamento e análises dos fluxos medidos em pequenas áreas de cultura. Waldo et al. (2016).

2 Metodologia

2.1 Cálculo do footprint

A definição fundamental da função de *footprint* ϕ está dada pela integral da equação de difusão Pasquill (1972). Onde o fluxo turbulento vertical $F(0,0,z_m)$, medido na origem de um sistema horizontal de coordenadas ($x = 0, y = 0$), na altura z_m está relacionado com o correspondente fluxo superficial $F(x,y,z_m)$ (razão de emissão fonte ou sumidouro) contra a direção do vento da medida pontual por:

$$F(0,0,z_m) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} F(x,y,0)\phi(x,y,z_m) dx dy \quad (1)$$

Onde o eixo x aponta na direção contrária à velocidade média horizontal do vento. A já nomeada função *footprint* $\phi(x,y,z)$ descreve a influência de uma unidade pontual de fonte em qualquer localização da superfície (x,y) do fluxo medido em $(0,0,z)$. A tabela 1 resume os termos empregados neste trabalho.

2.1.1 Modelo de Kormann e Meixner (2001)

De acordo com Neftel et al. (2008), o marco de referência matemático deste modelo é baseado na formulação de um gradiente de difusão estacionário (2),

$$f(x,z) = -\frac{K}{\bar{u}} \frac{\partial D_z}{\partial z} = -K \frac{\partial c(x,z)}{\partial z} \quad (2)$$

assumindo a não dependência da altura com a dispersão do vento lateral (3)

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = -\frac{\partial f}{\partial z} \quad (3)$$

A chave para obter a solução analítica da função *footprint* é o uso da lei de potências para a distribuição vertical dos perfis de velocidade do vento (4a) e de difusividade turbulenta (4b)

$$u(z) = Uz^m \quad (4a)$$

Tabela 1: Notação.

Símbolo	Quantidade
$c(x,z)$	Concentração integrada do vento lateral
d	Plano de deslocamento zero
D_y	Função de distribuição do vento lateral
$f(x,z)$	Fluxo de <i>footprint</i> do vento lateral
$F(x,y,z)$	Fluxo
k	Constante de von kárman ($k = 0.4$)
$K(z)$	Perfil vertical de difusividade turbulenta
L	Comprimento de Obukhov
m	Expoente da lei de potências da velocidade do vento
n	Expoente da lei de potências da difusividade turbulenta
$r = 2 + m - n$	Fator de forma
U	Constante na lei de potências do perfil de difusividade turbulenta
u_*	Velocidade de atrito
$\bar{u}(x)$	Velocidade efetiva da pluma
z_m	Altura da medida
$\bar{z}(x)$	Altura média da pluma
κ	Constante na lei de potências da velocidade do vento
$\mu = (1 + m)/r$	Constante
$\xi(z)$	Comprimento de escala de fluxo
σ	Dispersão do vento lateral
$\phi(x,y,z)$	Fluxo de <i>footprint</i>
$\Gamma(x)$	Função Gamma

$$K(z) = \kappa z^n \quad (4b)$$

a equação da concentração do vento lateral integrado (por uma fonte de unidade pontual) (5)

$$c(x,z) = \frac{A}{z^r} \exp \left[- \left(\frac{Bz}{z} \right)^r \right] \quad (5)$$

definindo o comprimento de escala do fluxo e $\xi(u) = \frac{Uz^r}{r^2k}$ e a constante $u = (1 + m)/r$, então a equação (5) pode ser reescrita como

$$c = \frac{1}{\Gamma(\mu)} \frac{r}{Uz^{(1+m)}} \frac{\xi^\mu}{x^\mu} e^{-\frac{\xi}{x}} \quad (6)$$

Finalmente, juntando a equação (2), com as equações (4a), (4b) e (6), se obtêm

$$f = \frac{1}{\Gamma(\mu)} \frac{\xi^\mu}{x^{1+\mu}} e^{-\frac{\xi}{x}} \quad (7)$$

que descreve o fluxo do vento lateral integrado na distância a favor do vento $x > 0$ e na altura z (contida em ξ). Tomando a distribuição Gaussiana do vento lateral (8) de Pasquill (1972)

$$D_y(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

assim se deduz o fluxo de *footprint*, $\phi(x,y,z) = D_y f$ necessários para resolver a equação (1) juntos com as equações (7) e (8).

2.1.2 Modelo de Schuepp et al. (1990)

O termo fluxo de *footprint* foi empregado pela primeira vez por Schuepp et al. (1990). Este estudo foi o primeiro a apresentar um modelo de *footprint* diferencial definido por (1), para fluxos escalares sob condições de estabilidade neutras.

Como descrito no seu trabalho Kornmann e Meixner (2001), a equação (7) inclui a solução particular dada por Schuepp et al. (1990), com o expoente da lei de potências $n = 1$ da difusividade turbulenta (4a) para condições de estabilidade neutras e o expoente da lei de potências $m = 0$ para a velocidade do vento conjugada. Deste modo, aplicando estas condições dos expoentes nas equações (2), (4a), (4b) e (6) se obtêm:

$$f = -\frac{U(z-d)}{u_* k x^2} e^{-\frac{U(z-d)}{u_* k x}} \quad (9)$$

a equação (9) define o *footprint* unidimensional proposto em seu trabalho por Schuepp et al. (1990). Esta relação explica a contribuição relativa das fontes na direção contrária ao vento a distâncias x das medidas de fluxo no ponto (x,y) .

A vantagem desta proposta para prever o *footprint* reside na sua simplicidade mecânica e analítica, resultado das suposições acerca da velocidade do vento, por tanto se pode afirmar que serve como uma primeira estimativa para tal predição.

2.2 Sítio experimental

O sítio experimental deste estudo está localizado mesorregião do Noroeste Rio-Grandense, na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa (FUNDACEP), Cruz Alta, RS, nas coordenadas: (28°36' S, 53°40' W, 409 m a.s.l.). O sítio foi estabelecido em 1985, como um centro de pesquisa agrícola cujo objetivo é comparar sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC). A montagem experimental consiste de uma matriz de dez campos ou parcelas, numeradas de 1 até 5 e distribuídas em duas colunas como mostrado Figura 1, as dimensões aproximadas de cada parcela são 40 m × 60 m. Duas torres de fluxo de *eddy covariance* foram instaladas no centro dos campos número 4, para realizar o monitoramento das trocas de massa e energia entre sistemas de diferentes culturas e a atmosfera.

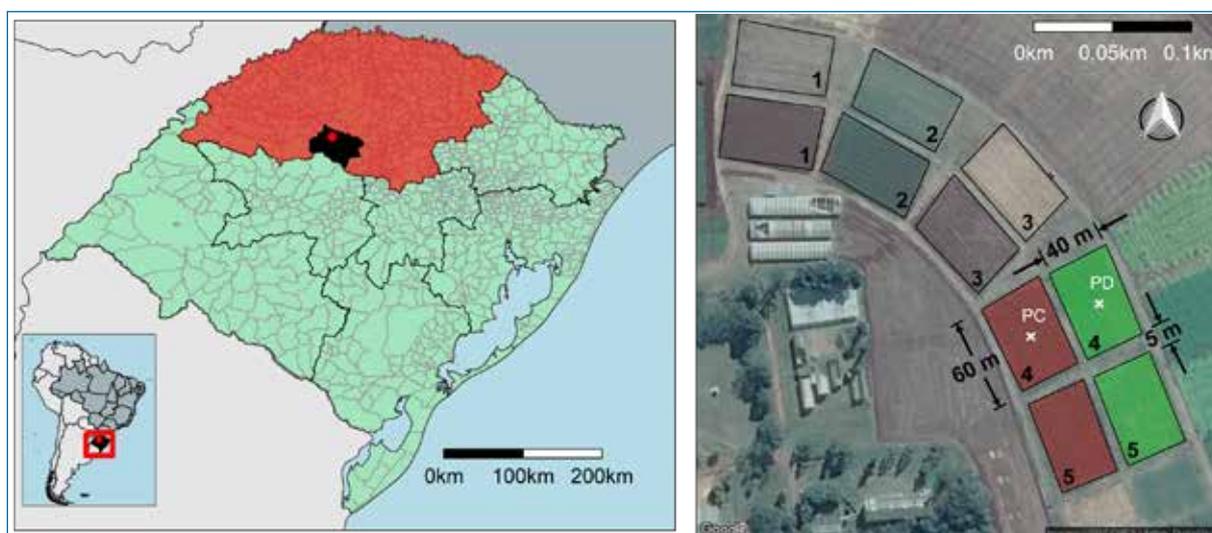


Figura 1: Localização do sítio experimental de Cruz Alta - RS. Os retângulos em verde representam as parcelas com o sistema de plantio direto (PD) e os retângulos em vermelho as áreas com o plantio convencional (PC). As cruces em branco representam as torres de medição de fluxo.

Para este estudo foram empregados os dados coletados na torre sobre o sistema de plantio direto (PD). O período escolhido para fazer a análise dos modelos foi 15 de Setembro de 2012. As variáveis micrometeorológicas foram registradas numa frequência de 10 Hz e processadas para gerar series de dados cada 30 minutos com o software *LI-COR EddyPro*[®], os sensores estavam instalados a 2.5m de altura.

3 Resultados

Foram calculadas as médias diárias das seguintes variáveis micrometeorológicas obtendo $u_* (ms^{-1}) = 0.30$, $z_m/L = 0$ e $U (ms^{-1}) = 3.05$ para aplicar em cada modelo de *footprint*. Foi escolhido este dia visto que as condições de estabilidade atmosféricas eram quase neutras, requerimento indispensável para a avaliação do modelo Schuepp et al. (1990). Neste período a altura da cultura era de 62 cm, por tal motivo o plano de deslocamento zero d foi estimado como 2/3 da altura da cultura Garratt (1992). O processamento e análises de dados e estatístico foi feito com a linguagem e ambiente de desenvolvimento integrado *R* R Core Team (2017). Os dois modelos de *footprint* foram determinados com o pacote *FREddyPro* Xenakis (2016), desenhado para o modelagem de *footprint* após o processamento geral de dados obtidos com sistema EC pelo software *LI-COR EddyPro*[®].

A figura 2, apresenta a pluma do *footprint* sobre as parcelas dos dois modelos analíticos estudados para condições de estabilidade neutras. É necessário ressaltar a diferença de cada pluma. Na figura 2(a) se observa que é mais "fechada", ou seja grande parte de sua superfície, está delimitada dentro das áreas de cada cultura, por outro lado o inverso ocorre com o modelo

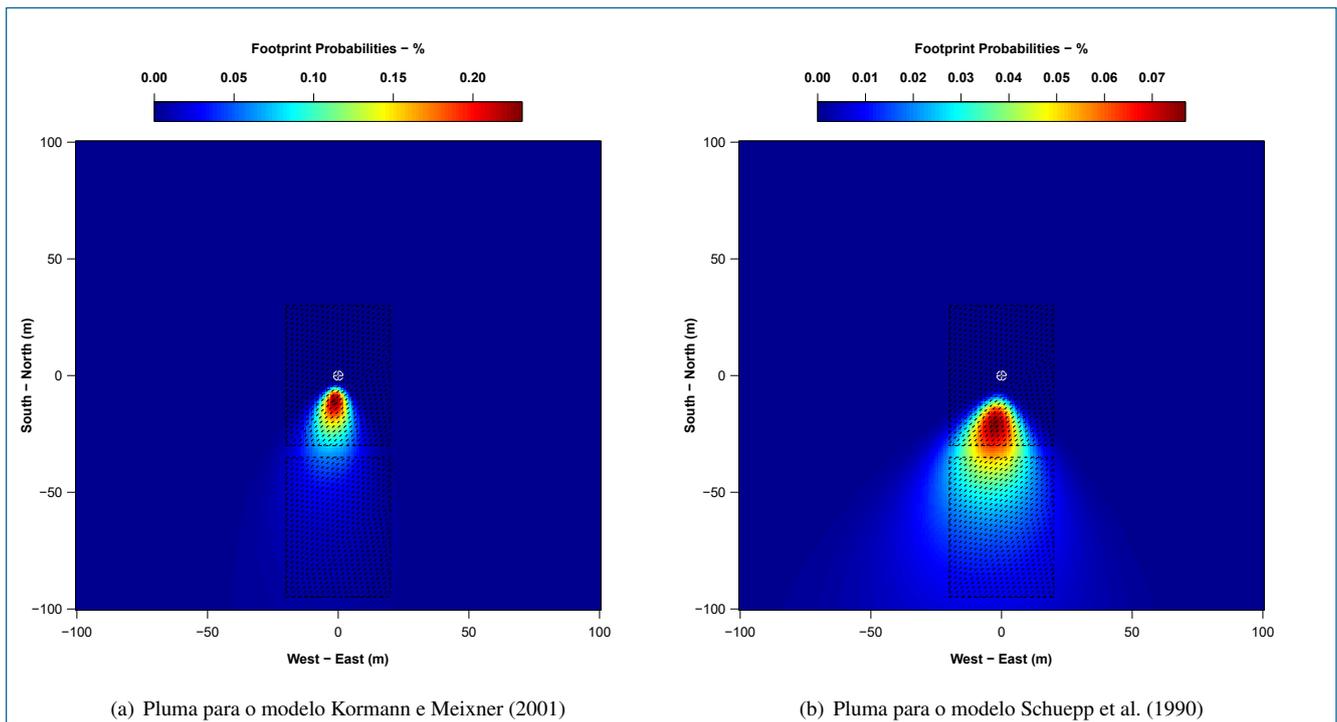


Figura 2: Ilustração da pluma do *footprint* para cada modelo sobre os dois plantios. As áreas mais vermelhas indicam as distâncias ao sensor onde a contribuição do *footprint* é mais sensível. As áreas pretas representam as parcelas.

representado na figura 2(b), em que a pluma está mais dispersa. Calculando a contribuição ("área de cada pluma"), contida nos dois retângulos que representam o sinal oriundo das culturas, se obtêm que para o modelo de Kormann e Meixner (2001) a quantidade da pluma nas culturas é de aproximadamente 82% enquanto para o modelo de Schuepp et al. (1990) é de aproximadamente 69%.

Na figura 3(a) observa-se a contribuição relativa da superfície ao fluxo para condições de estabilidade neutras para cada modelo. Para o modelo de Kormann e Meixner (2001) se pode ver que o pico do *footprint* (linha vermelha), que representa a área na qual a contribuição das medições de fluxo é maior, está perto dos 20.35m, enquanto que, para o modelo de Schuepp et al. (1990) (linha verde) está a 31.15m do sensor. Também se analisou que o modelo de Kormann e Meixner (2001) supera em 35% a contribuição relativa em comparação com o outro modelo, para este caso em particular.

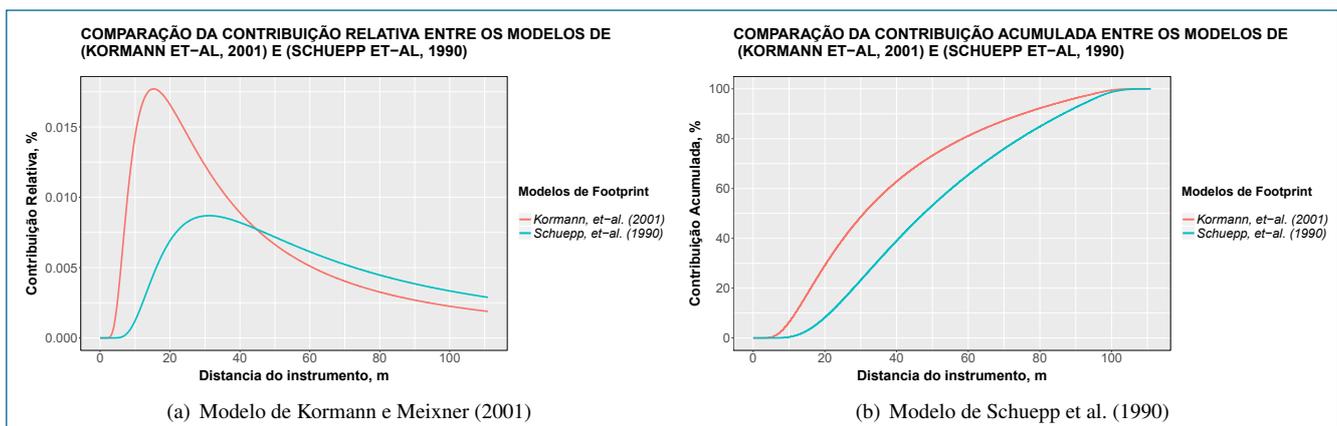


Figura 3: Comparação da contribuição relativa e acumulada entre os modelos de predição do *footprint* de (Kormann et-al, 2001) e (Schuepp et-al, 1990). Figura 3(a) mostra a contribuição relativa da superfície ao fluxo para condições de estabilidade neutras. Figura 3(b) apresenta contribuição acumulada normalizada como função da distancia em direção oposta ao vento.

Da figura 3(b) se pode inferir a contribuição acumulada para cada método de predição do *footprint*, tomando 90m como a distância do sensor até o extremo inferior do segundo terreno (onde não está a torre), nota-se que para o modelo de Kormann e Meixner (2001) a contribuição acumulada é de 95% e bem próxima do modelo de Schuepp et al. (1990) com 92%. Depois calcula-se para o talhão onde está o sensor, (30m desde a torre até o extremo inferior do retângulo) e a contribuição respectiva para

cada modelo foi 38% e 23%.

Assim, é possível estabelecer que o modelo de Kormann e Meixner (2001) apresenta certas vantagens sobre o modelo de Schuepp et al. (1990), já que serve como predição do *footprint* para áreas pequenas, por exemplo áreas de agricultura. Cabe ressaltar também que o modelo de Kormann e Meixner (2001) é aplicável sem importar as condições de estabilidade diferente ao modelo de Schuepp et al. (1990) que unicamente descreve fenômenos em condições de neutralidade como foi abordado neste trabalho. Apesar da existência de modelos de *footprint* mais complexos (modelos estocásticos), a aplicação dos modelos aqui analisados é plausível como uma primeira estimativa para áreas com culturas de baixa altura.

4 Conclusões

A técnica de *eddy-covariance* (EC) é de grande importância para obter medidas de fluxos verticais, que pode ser aplicada ao monitoramento das emissões de gases do efeito estufa (*GHG*). Foram avaliados dois modelos analíticos de *footprint* com dados obtidos com a técnica de *eddy-covariance*. Os modelos precisam de parâmetros de entrada que são obtidos pela técnica EC. Se discutem as vantagens sobre os modelos tomando em conta certas variáveis meteorológicas e as propriedades de cada modelo para ser aplicado em áreas pequenas.

Se ressalta a utilidade do modelo de Kormann e Meixner (2001) apesar de considerar certas simplificações próprias dos modelos analíticos, este modelo pode ser usado para estimar o *footprint* sobre áreas com dosséis de vegetação curtos e além podem ser implementados em procedimentos de controle de qualidade de medições de fluxos obtidos com EC. Em comparação a modelos de *footprint* mais complexos (modelos estocásticos), os modelos avaliados servem como uma primeira estimativa sobre superfícies específicas. As propriedades de contribuição relativa e acumulada foram discutidas.

Referências

- Foken, T., Leclerc, M. Y. (2004). Methods and limitations in validation of footprint models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 127(3-4), 223–234.
- Garratt, J. R. (1992). *The atmospheric boundary layer / J. R. Garratt*. Cambridge University Press Cambridge ; New York, URL <http://www.loc.gov/catdir/toc/cam031/91034340.html>.
- Kormann, R., Meixner, F. X. (2001). An analytical footprint model for non-neutral stratification. *Boundary-Layer Meteorology*, 99(2), 207–224, 0005074v1.
- Neftel, A., Spirig, C., Ammann, C. (2008). Application and test of a simple tool for operational footprint evaluations. *Environmental Pollution*, 152(3), 644–652.
- Pasquill, F. (1972). Some aspects of boundary layer description. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 98(417), 469–494.
- R Core Team (2017). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, URL <https://www.R-project.org/>.
- Schuepp, P. H., Leclerc, M. Y., MacPherson, J. I., Desjardins, R. L. (1990). Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. *Boundary-Layer Meteorology*, 50(1), 355–373, URL <https://doi.org/10.1007/BF00120530>.
- Vesala, T., Kljun, N., Rannik, Ü., Rinne, J., Sogachev, A., Markkanen, T., Sabelfeld, K., Foken, T., Leclerc, M. Y. (2008). Flux and concentration footprint modelling: State of the art. *Environmental Pollution*, 152(3), 653–666.
- Waldo, S., Chi, J., Pressley, S. N., O’Keeffe, P., Pan, W. L., Brooks, E. S., Huggins, D. R., Stöckle, C. O., Lamb, B. K. (2016). Assessing carbon dynamics at high and low rainfall agricultural sites in the inland Pacific Northwest US using the eddy covariance method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 218-219, 25–36.
- Xenakis, G. (2016). *FREddyPro: Post-Processing EddyPro Full Output File*. URL <https://CRAN.R-project.org/package=FREddyPro>, r package version 1.0.

Ricardo Acosta Gotuzzo

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil
E-mail: ricardo.acosta@gmail.com

Débora Regina Roberti

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil
E-mail: debora@ufsm.br

Jackson Ernani Fiorin

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil
E-mail: jackson.fiorin@ccgl.com.br