

# DISURG — DINÂMICA DA SUB-CAMADA RUGOSA SOBRE FLORESTAS DYNAMICS OF THE ROUGHNESS SUBLAYER OVER FORESTS

Nelson Luís Dias

Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná

Marcelo Chamecki

Department of Meteorology, Pennsylvania State University.

**Palavras-chave:** subcamada rugosa, interação superfície-atmosfera, meteorologia florestal, fluxos de escalares

**Keywords:** roughness sublayer, surface-atmosphere interaction, forest meteorology, scalar fluxes

31 de março de 2016

---

Esta proposta não está vinculada a um INCT.

## **Elementos da proposta, de acordo com a Chamada de Projetos MEC/MCTI/CAPES/CNPq/FAPs Nº 03/2014**

Esta proposta consta de:

- a) resumo do projeto de pesquisa proposto, incluindo objetivos e metas a serem cumpridas, com os respectivos indicadores de desempenho (Resumo, e seções 1, 2 e 3);
- b) cronograma de execução do projeto e das visitas anuais do pesquisador visitante ao país (seção 4);
- c) orçamento detalhado, especificando a aplicação do auxílio à pesquisa do projeto (seção 5);
- d) grau de interesse e comprometimento de empresas ou instituições com o escopo da proposta, quando for o caso (seção 6);

- e) descrição das atividades a serem desenvolvidas pelos demais participantes do projeto, em especial pelos beneficiários da(s) cota(s) adicional(is) de bolsa (doutorado sanduíche no exterior e pós-doutorado júnior) (seção 7);
- f) disponibilidade efetiva de infra-estrutura e de apoio técnico para o desenvolvimento do projeto (seção 8);
- g) previsão dos ganhos e benefícios para a instituição no País com a vinda do Pesquisador Visitante Especial (seção 9); e
- h) deverá constar da proposta, em sua capa ou contra capa, o vínculo do proponente do projeto com o INCT, caso a instituição de execução seja vinculada ao INCT.

### Resumo

Em meteorologia da Camada-Limite Atmosférica, a sub-camada rugosa (SCR) é a região turbulenta diretamente em contato com os elementos de rugosidade da superfície, e fortemente afetada pelos mesmos. O comportamento do escoamento nessa região é consideravelmente mais complexo do que mais acima, nas sub-camadas dinâmica, dinâmico-convectiva e de convecção livre da camada superficial. Embora a extensão da SCR seja relativamente pequena para superfícies aquáticas ou quando a vegetação é de pequeno porte, a SCR pode estender-se a cerca de 3 vezes a altura dos elementos de rugosidade: para florestas altas (árvores de 30 a 40 metros de altura) isso significa que a SCR pode ocupar mais de 100 metros a partir do solo: na prática, é quase impossível realizar medições micrometeorológicas *fora* da SCR. Apesar de sua importância, a física da SCR ainda é muito pouco compreendida. As teorias atuais não incorporam os efeitos da estratificação térmica, ou o fazem adaptando *ad-hoc* a Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov (TSMO). Mesmo assim, muitas das técnicas atualmente utilizadas para estimar os fluxos de escalares na SCR baseiam-se na TSMO, o que reduz o seu desempenho e sua capacidade preditiva. Esta proposta desdobra-se em duas vertentes principais: (i) o estudo da similaridade/dissimilaridade de escalares na SCR, e a avaliação da nossa capacidade de prever o comportamento do transporte turbulento de substâncias com pesos moleculares muito diferentes dos pesos moleculares de  $H_2O$  e de  $CO_2$ ; e (ii) a busca de novas teorias, incluindo, principalmente: a análise de efeitos até agora pouco estudados, tais como o ângulo zenital, a própria estratificação de densidade e a variação do coeficiente de arrasto da vegetação com a velocidade do vento, no desempenho de teorias de similaridade para a SCR. Os estudos incluirão a análise de dados micrometeorológicos clássicos coletados nos experimentos ATTO e GOAMAZON, e a realização de estudos específicos com simulação numérica direta de turbulência e simulação de grandes vórtices.

## Abstract

In Boundary-Layer Meteorology, the roughness sublayer (RSL) is the turbulent region directly in touch with the roughness obstacles of the surface, and highly influenced by them. The behavior of the flow in this region is much more complex than higher above, in the dynamic, convective-dynamic and free convection layers of the Atmospheric Surface Layer. Although the RSL is relatively thin for water surfaces or short vegetation, the RSL can extend up to three times the height of the roughness obstacles: for tall forests (trees 30–40 m high) this means that the RSL can occupy more than 100 meters from the soil surface: in practice, over forests it is next to impossible to perform micrometeorological measurements out of the RSL. In spite of its importance, the physics of the RSL is still not well understood. Current theories do not include very well the effects of thermal stratification, usually simply adapting, *ad-hoc*, the Monin-Obukhov Similarity Theory (MOST). Yet several of the current techniques used to estimate scalar fluxes in the RSL are based on MOST, which reduces their performance and predictive ability. The current proposal follows two main lines: (i) the study of similarity/dissimilarity of scalars in the RSL, and the assessment of our ability to predict the turbulent transport of substances with molecular weights significantly different from those of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>; and (ii) the search for new theories for the RSL, including, mainly the effects of the following phenomena: the zenith angle, density stratification in connection with the roughness length, and the variation of the vegetation drag coefficient with wind speed. Those new theories should necessarily be based on dimensional analysis, and their performance will be assessed. The research will involve the analysis of micrometeorological data collected during the ATTO and GOAMAZON experiments, and specific numerical studies using DNS (direct numerical simulation) and LES (large eddy simulation) of turbulent flows.

## 1 Introdução

Em meteorologia da Camada-Limite Atmosférica, a subcamada rugosa (SCR) é a região turbulenta diretamente em contato com os elementos de rugosidade da superfície, e fortemente afetada pelos mesmos (Garratt, 1980, 1983; Simpson et al., 1998; Harman e Finnigan, 2007). O comportamento do escoamento nessa região é consideravelmente mais complexo do que mais acima, nas sub-camadas dinâmica, dinâmico-convectiva e de convecção livre (Wynngaard et al., 1971; Kader e Yaglom, 1990) da camada superficial. Embora a extensão da SCR seja relativamente pequena para superfícies aquáticas ou quando a vegetação é de pequeno porte, a SCR pode estender-se a cerca de 3 vezes a altura dos elementos de rugosidade (Williams et al., 2007): para florestas altas (árvores de 30 a 40 metros de altura) isso significa que a SCR pode ocupar mais de 100 metros a partir do solo: na prática, sobre florestas é quase impossível realizar medições micrometeorológicas *fora* da SCR.

A subcamada rugosa é considerada parte da Camada Superficial da Camada-Limite Atmosférica, mas está demasiadamente próxima dos elementos de rugosidade para que valha, nela, a Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov (TSMO). Algum progresso tem sido obtido em sua parametrização (Mölder et al., 1999; Harman e Finnigan, 2007; Arnqvist e Bergström, 2014), mas a universalidade dos resultados até agora obtidos permanece desconhecida.

Apesar de sua importância, a física da SCR ainda é muito pouco compreendida. As teorias atuais não incorporam os efeitos da estratificação térmica, ou o fazem adaptando *ad-hoc* a Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov (TSMO).

Por exemplo, Mölder et al. (1999) adaptam de forma simples (multiplicando os gradientes adimensionais da teoria clássica por uma constante) as relações fluxo-perfil da TSMO para uma floresta boreal, embora a um custo significativo em termos de uma considerável dispersão dos pontos medidos em torno das curvas ajustadas, enquanto que Bowling et al. (1998) mediram a emissão de COV's (Compostos Orgânicos Voláteis de Carbono) próximo do dossel usando um método denominado *Relaxed eddy accumulation*, que supõe que a similaridade entre COV's e a temperatura é perfeita, embora essas medições tenham sido feitas na SCR, onde nem sempre isso é verdade.

## 2 Contextualização do problema

**Os próximos resultados mostrados, oriundos da pesquisa em curso de um dos proponentes (NLD), estão ainda sendo submetidos para publicação em coautoria com numerosos pesquisadores do projeto ATTO (Andreae et al., 2014), e não são exclusivos dos autores da presente proposta. Eles são mostrados aqui apenas como uma forma de exemplificar os problemas que pretendemos estudar.**

Existem abundantes exemplos da falha da TSMO na SCR. Aqui, nós mostramos evidências fortes de que um fator de ajuste simples do tipo  $z/z_*$  (onde  $z_*$  é a altura da SCR), tal como usado por Mölder et al. (1999), não é capaz de “colapsar” as variáveis adimensionais do “método da variância”,

$$\phi_w(\zeta) \equiv \frac{\sigma_w}{u_*}, \quad (1)$$

e

$$\phi_a(\zeta) \equiv \frac{\sigma_a}{a_*}, \quad (2)$$

onde  $\sigma_w$  é o desvio-padrão da velocidade vertical,  $u_*$  é a velocidade de atrito,  $\sigma_a$  é o desvio-padrão de um escalar e  $a_*$  é sua escala de turbulência (ver (3)–(4) a seguir). Em (1)–(2),  $\zeta$  é a variável de estabilidade de Obukhov, calculada com um deslocamento de plano zero  $d_0 = 2h_0/3$ ,  $h_0 = 40$  m.

No sítio experimental do projeto ATTO, uma torre de 85 m de altura foi erguida em 2°08'40" S e 59°00'10" W. Sistemas de medição de covariâncias turbulentas foram instalados: anemômetros sônicos *Campbell Scientific Instruments* CSAT-3 e analisadores infravermelhos *Licor* LI7500 foram posicionados nos níveis de 23, 39.5 e 81.6 m. A altura das árvores no sítio é de

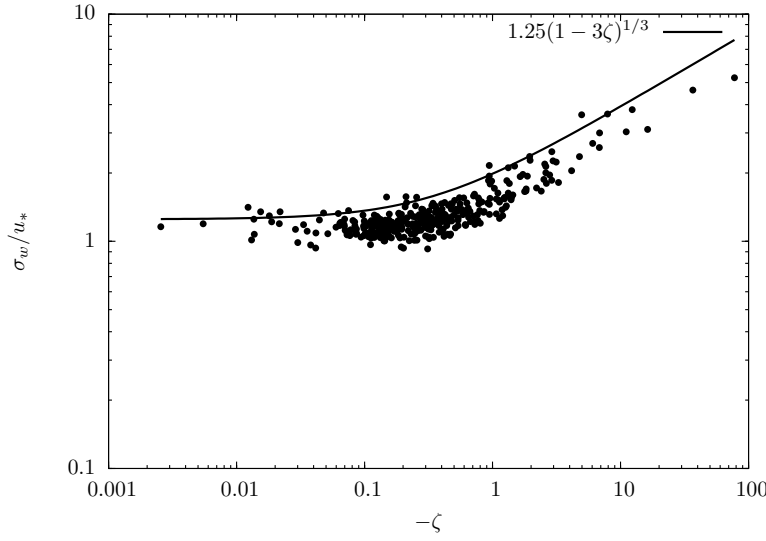


Figura 1: A função  $\phi_w(\zeta)$  no sítio do ATTO no nível de 40 m.

40 m, de forma que o segundo nível está essencialmente na altura da copa. Os resultados a seguir foram medidos nesse nível. Nós usamos as escalas de turbulência

$$\overline{u'w'} \equiv -u_*^2 \quad (3)$$

e

$$|\overline{w'a'}| \equiv u_* a_*. \quad (4)$$

Apenas dados medidos em condições instáveis com o fluxo de calor sensível e o o fluxo de calor latente positivos e o fluxo de  $\text{CO}_2$  negativo são analisados. Os dados foram medidos durante Abril de 2012. Em (4),  $a_*$  é sempre positivo. O escalar  $a$  representa a temperatura virtual  $\theta_v$  (medida com o anemômetro sônico), a umidade específica  $q$  e a razão de mistura do  $\text{CO}_2$   $c$ .

A análise é feita em termos das funções adimensionais de similaridade para o desvio-padrão  $\phi_w(\zeta)$  e  $\phi_a(\zeta)$  definidas acima. Os resultados para a velocidade vertical, a temperatura virtual e a concentração de  $\text{CO}_2$  podem ser vistos nas Figuras 1, 2 e 3. As linhas sólidas mostram funções representativas (para a Camada Superficial *acima* da subcamada rugosa) obtidas na literatura (veja Dias et al., 2009).

As figuras 1–3 mostram claramente a incapacidade da teoria clássica de similaridade de Monin-Obukhov de “colapsar” adequadamente os dados medidos, e concordam essencialmente com o encontrado por Dias et al. (2009) para um tipo de floresta bastante distinto (uma floresta decídua no Canadá).

Nós também tentamos aplicar alguns dos conceitos recentemente desenvolvidos por Cancelli et al. (2012) para relacionar a aplicabilidade da TSMO, em sua forma original ou com modificações simples, à intensidade dos forçantes superficiais. Cancelli et al. (2012) descobriram que a aplicabilidade da TSMO pode ser prevista pelo seu “número de fluxo superficial”

$$\text{Sf}_a = \frac{|\overline{w'a'}|(z - d_0)}{v_a \Delta \bar{a}}, \quad (5)$$

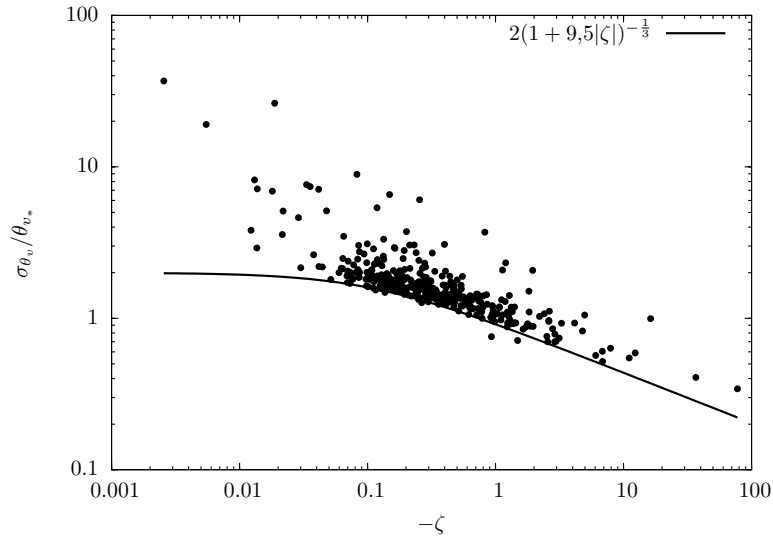


Figura 2: A função  $\phi_{\theta_v}(\zeta)$  no sítio do ATTO no nível de 40 m.

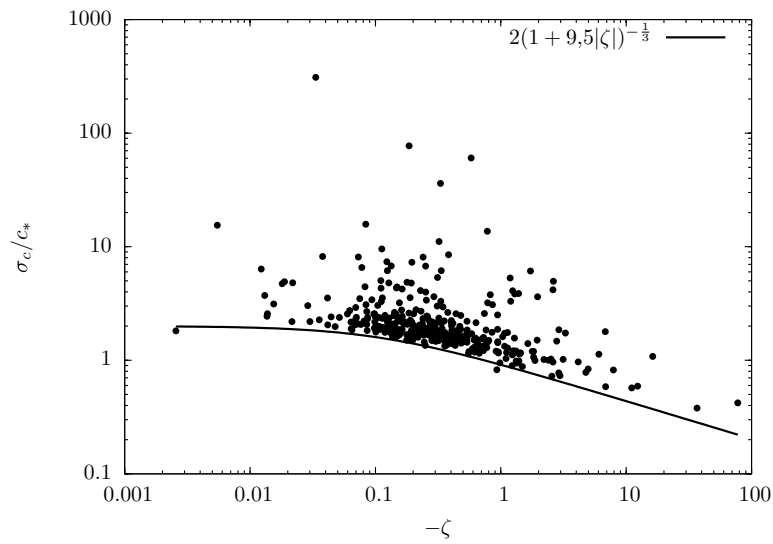


Figura 3: A função  $\phi_c(\zeta)$  no sítio do ATTO no nível de 40 m.

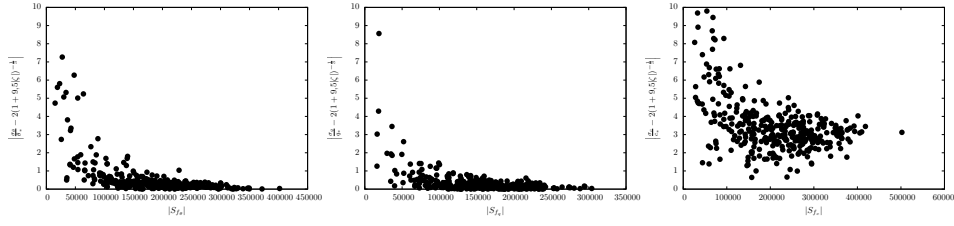


Figura 4: Da esquerda para a direita, o afastamento da função  $\phi_a(\zeta)$  do seu comportamento para a camada superficial, respectivamente, para  $\theta_v$ ,  $q$  and  $c$ .

onde  $v_a$  é a difusividade molecular do escalar  $a$  no ar, e  $\Delta\bar{a}$  é o gradiente de concentração média entre a superfície e a altura de medição.

No nosso caso, na ausência de uma maneira simples de obter  $\Delta\bar{a}$ , nós usamos

$$\text{Sf}_a = \frac{|w'a'| (z - d_0)}{v_a \sigma_a} \quad (6)$$

Como uma medida da aplicabilidade da TSMO, nós usamos a diferença entre o valor observado de  $\phi_a(\zeta)$  e o seu valor de referência para a Camada Superficial, tal como usado por [Dias et al. \(2009\)](#). Os resultados são mostrados na figura 4.

Um forçante superficial forte está claramente relacionado com um comportamento mais próxima da TSMO para temperatura e para a umidade, *mas não para o  $\text{CO}_2$* .

Isso significa que o  $\text{CO}_2$  coloca desafios ainda maiores para a devida compreensão de seu transporte turbulento na camada-limite rugosa sobre a floresta amazônica.

Os resultados obtidos por nós até agora sobre a validade da TSMO na SCR e sobre a aplicabilidade das relações clássicas para escalares vão além do mostrado aqui. No bojo do trabalho de conclusão de curso de Einara Zahn ([Zahn, 2013](#)), foram investigados também: os índices de similaridade clássicos entre escalares e os novos índices propostos por [Cancelli et al. \(2012\)](#); a aplicabilidade do *Eddy Accumulation Method*; e diversas medidas de similaridade espectral. Esses resultados estão atualmente sendo preparados para publicação.

Todos eles apontam para a importância de classificar com mais detalhe os dados experimentais, e indicam que a variável de estabilidade de Obukhov não é capaz de explicar sozinha as principais estatísticas de interesse micro-meteorológico dentro da SCR.

### 3 Temas a serem abordados nesta proposta

#### 3.1 Objetivos gerais

Estudo da similaridade/dissimilaridade de escalares na SCR, e a avaliação da nossa capacidade de prever o comportamento do transporte turbulento de

substâncias com pesos moleculares muito diferentes dos pesos moleculares de  $\text{H}_2\text{O}$  e de  $\text{CO}_2$ .

Busca de novas teorias para a SCR, incluindo, principalmente: a análise de efeitos até agora pouco estudados, tais como o ângulo zenital, a própria estratificação de densidade e a variação do coeficiente de arrasto da vegetação com a velocidade do vento, no desempenho de teorias de similaridade para a SCR. Os estudos incluirão a análise de dados micrometeorológicos clássicos coletados nos experimentos ATTO e GOAMAZON, e a realização de estudos específicos com simulação de grandes vórtices.

### 3.2 Similaridade entre escalares

Embora seja um tema razoavelmente antigo e bastante conhecido (entre muitos outros, veja [Hill \(1989\)](#); [Dias e Brutsaert \(1996\)](#); [Li et al. \(2012\)](#)), a similaridade entre escalares continua a ter importância fundamental para a compreensão das trocas de escalares entre a superfície da Terra e a Atmosfera.

A importância continua aumentando à medida que os fluxos de novas substâncias químicas vão se tornando de interesse e que seu papel sobre o sistema físico do clima vai sendo identificado. Em particular, chamamos a atenção para o papel de compostos orgânicos voláteis biogênicos que são o foco do projeto de pesquisa em andamento GOAMAZON, do qual fazemos parte ([Chamecki e Fuentes, 2014](#)).

Em virtude da grande área de floresta intacta, a Amazônia talvez seja a região de maior emissão de compostos biogênicos de carbono ([Zimmerman et al., 1988](#); [Guenther et al., 1995](#); [Jardine et al., 2011](#)). As substâncias mais comumente emitidas incluem o isopreno, monoterpenos, sesquiterpenos e hidrocarbonetos oxigenados.

Os hidrocarbonetos emitidos reagem com ozônio, hidroxila e radicais de nitrato, gerando substâncias oxidantes e aerossóis orgânicos secundários ([Pöschl et al., 2010](#)). Em razão das altas taxas de fotólise do vapor d'água, nos trópicos os radicais de hidroxila são abundantes e importantes para a oxidação de hidrocarbonetos. Na presença de óxidos de nitrogênio e de hidrocarbonetos de origem antropogênica, a foto-oxidação de hidrocarbonetos emitidos pela vegetação pode levar a taxas mais altas de formação de oxidantes, ácidos e de aerossóis que se tornam núcleos de condensação em nuvens. Desta forma, a biogeoquímica da floresta está inextricavelmente ligada à convecção e à precipitação sobre a região amazônica.

De fato, é sabido que na Amazônia diferentes regimes de vento podem ser relacionados com processos microfísicos distintos ([Martins et al., 2009](#)). Além disso, [Andreae et al. \(2004\)](#) verificaram que valores elevados de concentração de núcleos de concentração em nuvens devido à queima de biomassa modificam a altura das nuvens e incrementam os processos de chuva “fria”, enquanto que [Lin et al. \(2006\)](#) verificaram efeitos similares analisando dados de satélite.

Tipicamente, as massas molares desses compostos orgânicos voláteis biogênicos são muito maiores do que as do  $\text{CO}_2$  e do  $\text{H}_2\text{O}$ . Mesmo na região de validade da TSMO na Camada Superficial, não está claro qual é o limite

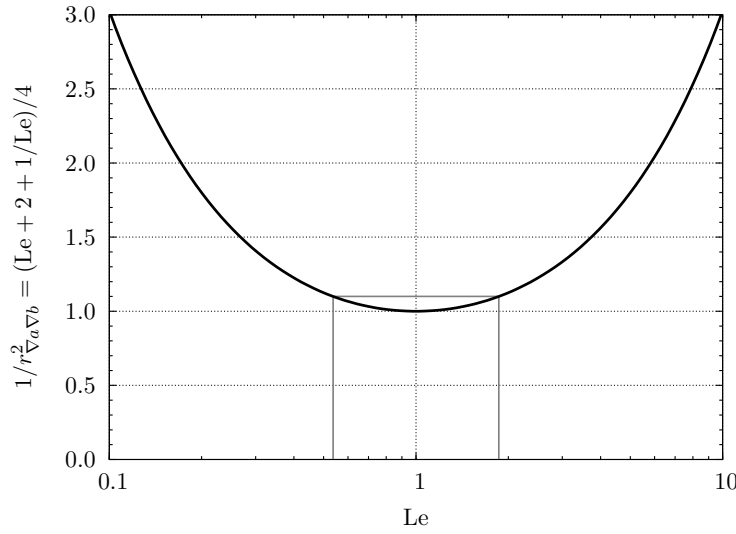


Figura 5: Uma faixa prática do número de Lewis para a aceitabilidade da hipótese de similaridade entre dois escalares: na faixa marcada,  $0.5367 < Le < 1.863$ , o coeficiente de determinação entre os gradientes dos dois escalares é  $r_{\nabla a \nabla b}^2 \gtrsim 0.91$ . Fonte: [Dias \(2013\)](#).

de validade da hipótese de similaridade perfeita quando as difusividades moleculares de dois escalares diferem significativamente. Isso pode ser visto, por exemplo, na extensão da teoria de similaridade entre umidade e temperatura de [Dias e Brutsaert \(1996\)](#) para dois escalares quaisquer proposta por [Dias \(2013\)](#). Nessa extensão, a correlação entre os dois escalares é função do número de Lewis,

$$Le = \frac{v_a}{v_b}, \quad (7)$$

entre os dois escalares, onde  $v_a$  e  $v_b$  são suas difusividades moleculares. A previsão do coeficiente de determinação entre os gradientes dos dois escalares é mostrada na figura 5.

A conclusão é que para números de Lewis fora da faixa (aproximada)  $1/2 \leq Le \leq 2$ , a validade da hipótese de similaridade perfeita está em suspeita.

### 3.3 Metas e indicadores relacionados aos estudos de similaridade

As atividades aqui propostas relacionadas à similaridade entre diversos escalares na SCR incluem:

**Similaridade de escalares simples** Avaliação dos limites de validade para a similaridade na SCR para as substâncias “simples” temperatura,  $H_2O$  e  $CO_2$ . Tentativa de identificação das causas de dissimilaridade. Aqui, utilizaremos as ferramentas clássicas (coeficientes de correlação, coeficiente de correlação espectral, função de coerência, eficiência relativa de transferência, eficiência simétrica de transferência: [Dias e Brutsaert \(1996\)](#); [Asanuma e Brutsaert \(1999\)](#); [Asanuma et al. \(2007\)](#); [Cancelli](#)

Tabela 1: Testes preliminares com as Equações de Lorenz.

| Caso | $Pr$ | $r$  | $Le$  | $\gamma$ | $\lambda_{\theta q}$ |
|------|------|------|-------|----------|----------------------|
| 1    | 10,0 | 30,0 | 1,0   | 1,0      | 1,00474              |
| 2    | 10,0 | 30,0 | 1,195 | 1,0      | 1,12612              |
| 3    | 10,0 | 30,0 | 0,7   | 1,0      | 0,78191              |
| 4    | 10,0 | 30,0 | 10,0  | 1,0      | 1,50788              |

et al. (2012, 2014)) Nesse caso, as causas de dissimilaridade provavelmente estarão relacionadas a diferentes condições de contorno, e não a diferenças químicas, entre os escalares.

**Indicadores:** Análises estatísticas clássicas descritas acima, consolidadas no relatório final, em trabalhos apresentados em congressos, e em trabalhos submetidos a revistas científicas.

**Similaridade de escalares complexos** Avaliação dos efeitos das características moleculares sobre as difusividades turbulentas (e sua similaridade), utilizando sistemas dinâmicos e simulação numérica direta de turbulência. Testes preliminares realizados utilizando o conjunto de equações de Lorenz (1963), resolvidas numericamente com o método de Runge-Kutta de quarta ordem são apresentados na figura 6; as figuras da esquerda correspondem ao comportamento das séries temporais de temperatura ( $\theta$ ) e umidade específica ( $q$ ) — que são, no caso das equações de Lorenz, os desvios em relação a um estado hidrostático de referência — enquanto as figuras da direita mostram a correlação entre as duas variáveis. O objetivo destes testes foi verificar a sensibilidade das variáveis  $\theta$  e  $q$  às modificações dos parâmetros que governam as equações de Lorenz, isto é, os números de Prandtl ( $Pr$ ), de Lewis ( $Le$ ), de Rayleigh ( $r$ ) e o gradiente de umidade  $\gamma$ . Os valores utilizados para os testes são apresentados na tabela 1 juntamente com os coeficientes angulares  $\lambda_{\theta q}$  de regressão linear entre  $\theta$  e  $q$ . Nestes testes observamos que, para haver comportamento caótico é necessário que  $Pr \approx 10,0$  e  $r \approx 30,0$ ; o número típico de Lewis — razão entre difusividades de temperatura e umidade — para a atmosfera é de aproximadamente 1,195. Nos casos 2, 3 e 4 (figuras 6(c) a 6(h)), utilizamos diferentes razões entre as difusividades. Sabemos que se dois escalares são similares, o coeficiente de regressão linear deve ser 1; observe que quando aumentamos o valor de  $Le$ ,  $\lambda_{\theta q}$  aumenta e vice-versa. O caso 1 (figuras 6(a) e 6(b)) tem as características de similaridade perfeita: as séries temporais apresentam um comportamento caótico semelhante ao que acontece na atmosfera, as difusividades moleculares são estritamente iguais e  $\lambda_{\theta q}$  é  $\approx 1$ . Observe que o desvio da correlação perfeita para números de Lewis altos é coerente com a teoria proposta por Dias (2013), e mencionada acima, na figura 5.

Além disso, existem no âmbito do projeto GOAMAZON, medições das substâncias ( $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ , e diversos COVs) imediatamente acima da copa. Duas abordagens experimentais são possíveis com elas, e serão tentadas:

- i) As funções de similaridade para perfis médios podem ser adaptadas, com diferentes graus de sucesso, para a SCR. Nós utilizaremos as melhores alternativas de modelagem dessas funções na SCR que conseguirmos obter para os dados de temperatura, umidade e  $CO_2$  (para os quais existem medições de fluxos) e as compararemos com os dados medidos no GOAMAZON.
- ii) Os dados medidos dessas substâncias correspondem a dados *filtrados* (com um filtro de passa-baixa) dos dados instantâneos que não foram medidos. Dados filtrados (instrumentalmente, pelos analisadores) nas escalas de tempo entre 1 s e 1 min de ( $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ , e diversos COVs) serão comparados com dados filtrados nas mesmas escalas de temperatura, umidade e  $CO_2$  obtidos com os instrumentos de resposta rápida.

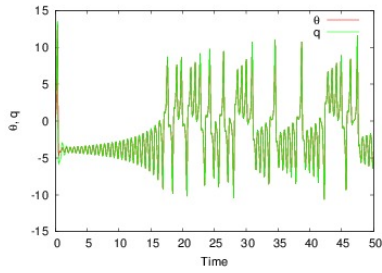
**Indicadores:** Simulações computacionais do efeito de difusividades moleculares muito diferentes (número de Lewis muito diferente de 1) utilizando sistemas dinâmicos, simulação numérica direta de turbulência e análise dos perfis médios de  $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ , e diversos COVs consolidadas no relatório final, em trabalhos apresentados em congressos, e em trabalhos submetidos a revistas científicas .

### 3.4 Efeitos não clássicos

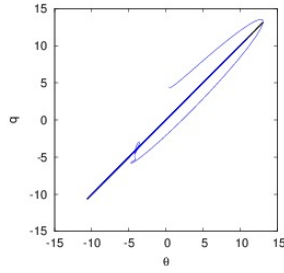
Os efeitos não clássicos que pretendemos estudar nesta proposta incluem: efeito do ângulo zenital, efeitos da estratificação e coeficientes de arrasto dependentes da velocidade.

Provavelmente, os primeiros a chamar a atenção da importância do ângulo zenital sobre os efeitos da subcamada rugosa foram [Sugita e Brutsaert \(1996\)](#). Desde então, aparentemente esse conceito não foi aplicado em florestas para a parametrização de fluxos e estatísticas turbulentas envolvendo escalares. Nossos estudos preliminares (não publicados), entretanto, indicam que o ângulo zenital pode explicar uma parte considerável da variabilidade encontrada nas funções de similaridade medidas dentro da subcamada rugosa. Um exemplo disso é mostrado na figura 7: ela mostra a função desvio-padrão adimensional da temperatura para essencialmente o mesmo conjunto de dados da figura 2, porém agora classificado de acordo com o valor do ângulo zenital. Observe que, para os valores de ângulo zenital que correspondem às horas centrais do dia a recuperação de dependência funcional entre  $\phi_\theta$  e  $\zeta$  é significativa.

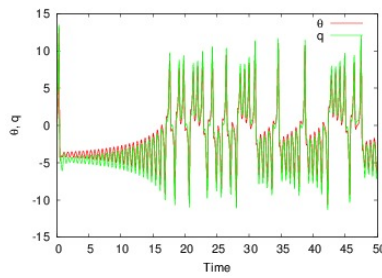
Um segundo ponto importante é o estudo aprofundado do efeito de  $z_0/L$  (onde  $z_0$  é a rugosidade para a quantidade de movimento na SCR). Nas abordagens clássicas, despreza-se  $z_0/L_0$  diante de  $(z-d)/L_0$  ( $d$  é o deslocamento



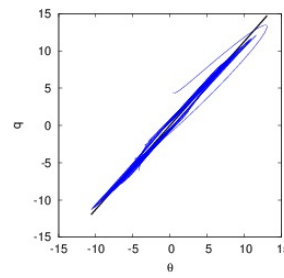
(a) Caso 1: Séries temporais



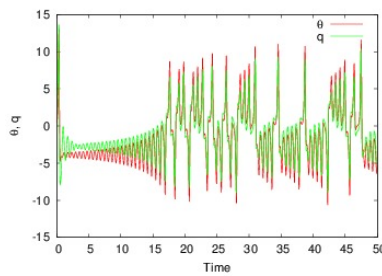
(b) Caso 1:  $\theta \times q$



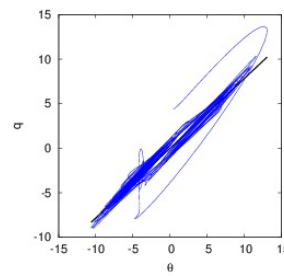
(c) Caso 2: Séries temporais



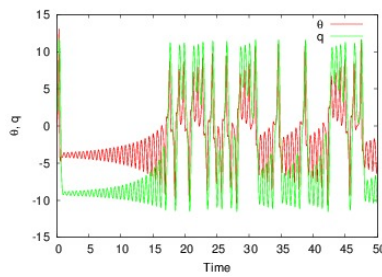
(d) Caso 2:  $\theta \times q$



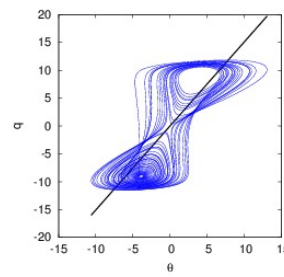
(e) Caso 3: Séries temporais



(f) Caso 3:  $\theta \times q$



(g) Caso 4: Séries temporais



(h) Caso 4:  $\theta \times q$

Figura 6: Comportamento das variáveis  $\theta$  e  $q$  geradas pelas Equações de Lorenz – Casos 1 a 4.

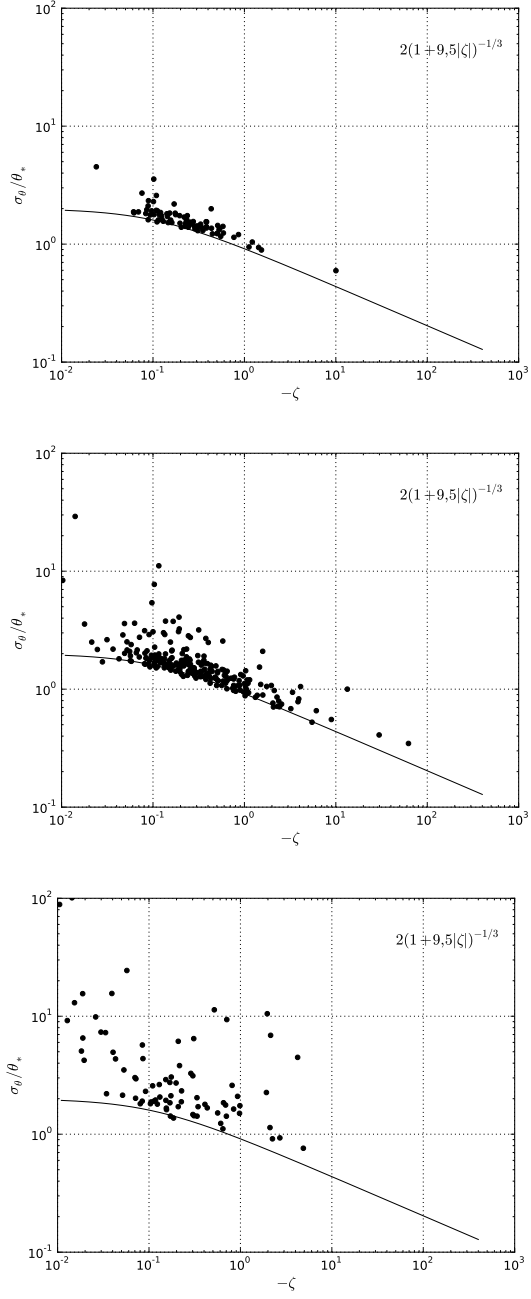


Figura 7: Efeito do ângulo zenital  $Z$  sobre a função desvio-padrão adimensional  $\phi_\theta$ . De cima para baixo:  $|Z| \leq 20^\circ$ ,  $20 < |Z| \leq 60^\circ$  e  $|Z| > 60^\circ$ .

do plano zero;  $L_O$  é o comprimento de estabilidade de Obukhov. No entanto, em situações fortemente convectivas combinadas com elementos de rugosidade da ordem de 1 m (tal como em florestas), essa suposição pode não ser válida. Estudos relativamente recentes mostraram que  $z_0/L_O$  é uma variável adimensional importante na parametrização de fluxos acima da Camada Superficial (Brutsaert, 1999). A importância da estratificação dentro da SCR é evidente, por exemplo, nas figuras 1, 2 e 3, mas a importância de  $z_0/L_O$  precisa ser melhor investigada.

Finalmente, recentemente, Pan et al. (2014) propuseram uma extensão da parametrização dos fluxos de escalares levando em conta a variação do coeficiente de arrasto com a velocidade, e a reconfiguração da vegetação em função do forçante do vento, conforme proposto por Vogel (1984, 1989).

Tanto quanto seja de nosso conhecimento, o efeito de reconfiguração da vegetação ainda não foi propriamente incorporado às teorias existentes sobre a SCR. Em outras palavras, embora o efeito seja conhecido há relativamente bastante tempo (desde a década de 1980), nossas teorias de similaridade ainda não o incorporaram. Um estudo recente, entretanto, sugere que ele pode estar presente em florestas (Queck et al., 2011).

A reconfiguração introduz uma escala nova de velocidade, associada com a geometria e a rigidez dos elementos da vegetação. Essa escala é independente de  $u_*$ . Dessa forma, nós conjecturamos que, para vegetações em que a reconfiguração seja importante, é necessário incluir essa nova escala de velocidade na montagem dos grupos adimensionais que explicam o fenômeno. Como mostram as simulações bem sucedidas de Pan et al. (2014), o efeito é certamente importante, e pretendemos estudá-lo com os dados de campo adquiridos nos experimentos ATTO e GOAMAZON.

### 3.5 Metas e indicadores relacionados a efeitos não clássicos

As atividades aqui propostas relacionadas à parametrização da SCR com variáveis adimensionais adicionais (ângulo zenital, coeficiente de arrasto dependente da velocidade,  $z_0/L_O$  incluem:

**Efeito do ângulo zenital** Avaliação detalhada do ângulo zenital utilizando os dados de campo medidos nos projetos ATTO e GOAMAZON. O efeito do ângulo zenital será avaliado sobre as funções “clássicas” de similaridade, e as faixas de ângulo zenital em que formulações adimensionais bem-sucedidas podem ser encontradas serão estabelecidos.

**Indicadores:** Análises do efeito do ângulo zenital sobre as funções adimensionais da turbulência medidas dentro da SCR, consolidadas no relatório final, em trabalhos apresentados em congressos, e em trabalhos submetidos a revistas científicas .

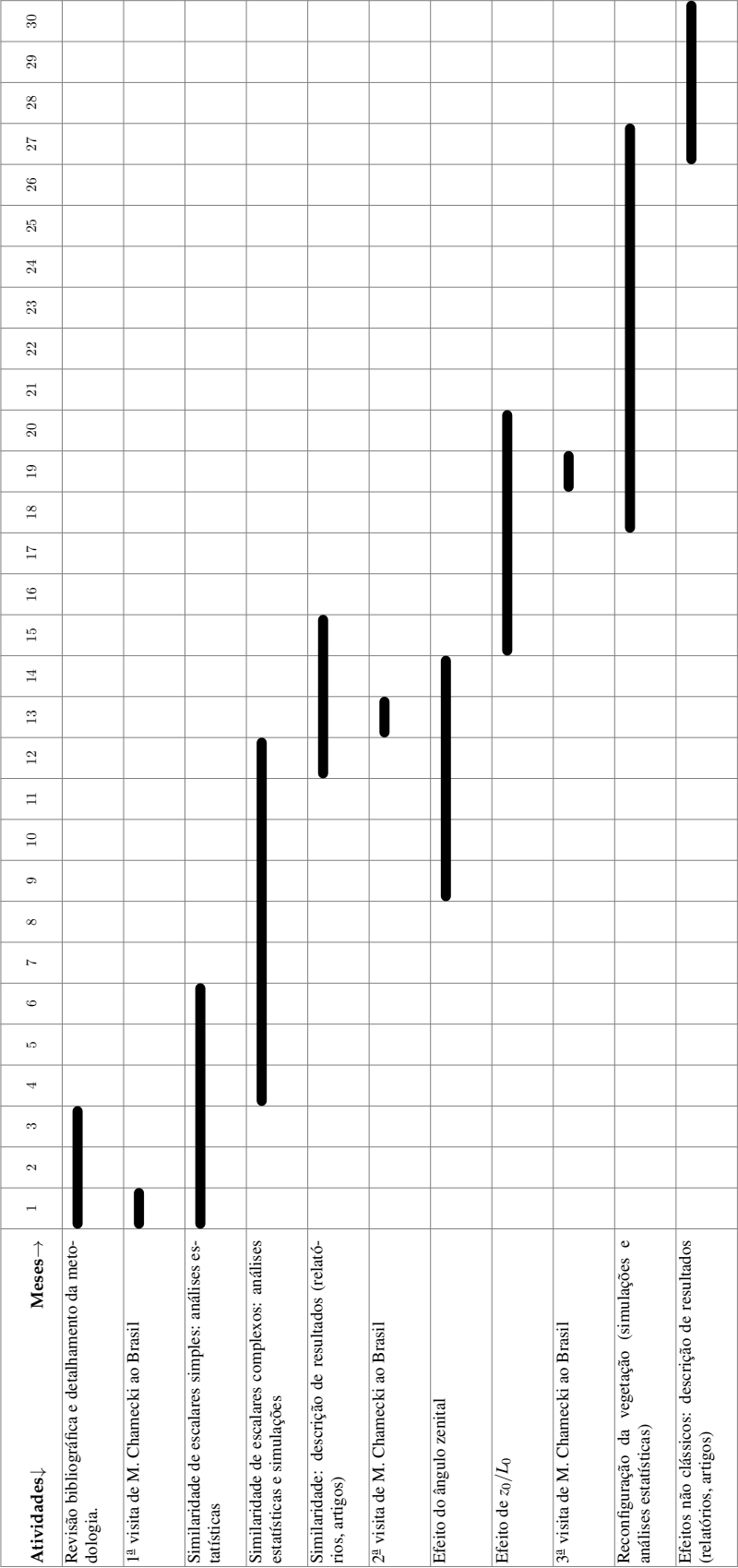
**Efeito de  $z_0/L_O$**  A possibilidade de que a rugosidade da superfície afete significativamente as transferências através do dossel e acima do mesmo será estudada. Nós tentaremos separar os efeitos de  $(z - d)/L_O$  dos efeitos de  $z_0/L_O$ .

**Indicadores:** Estudo analítico do efeito previsto da variável adimensional  $z_0/L_0$  sobre as funções adimensionais da turbulência medidas dentro da SCR, e verificação contra dados experimentais. Consolidação dos resultados no relatório final, em trabalhos apresentados em congressos, e em trabalhos submetidos a revistas científicas.

**Efeito do coeficiente de arrasto dependente da velocidade** Uma teoria adimensional consistente precisa ser incorporada à Micrometeorologia com as descobertas de Vogel (1984, 1989). Nós desenvolveremos relações adimensionais para a rugosidade de quantidade de movimento que sejam compatíveis com a reconfiguração da vegetação com a velocidade do vento, e que ajudem a explicar a dinâmica da SCR. Necessariamente, tal teoria deverá incluir a nova escala de velocidade, mencionada acima, e que depende do módulo de elasticidade e do momento de inércia dos elementos de vegetação. Novamente, a ênfase será adaptar a teoria existente e as descobertas com simulações em computador aos dados medidos em campo sobre a floresta amazônica durante os experimentos ATTO e GOAMAZON.

**Indicadores:** Simulações de grandes vórtices do efeito da reconfiguração da vegetação em um dossel vegetal de grande porte. Estudo estatístico da reconfiguração da vegetação e da nova escala de velocidade sobre as funções adimensionais da turbulência medidas dentro da SCR, e verificação contra dados experimentais do ATTO e do GOAMAZON. Consolidação dos resultados no relatório final, em trabalhos apresentados em congressos, e em trabalhos submetidos a revistas científicas.

4 Cronograma



## 5 Orçamento detalhado

Benefícios:

- i. Mensalidade: R\$ 14.000,00 (quatorze mil reais) a ser pago ao completar o período mínimo de 30 dias de permanência no Brasil. Este recurso será pago ao Coordenador do projeto e repassado ao bolsista mediante recibo;

**Valor solicitado:** 3 mensalidades (R\$ 42.000,00)

- ii. Auxílio deslocamento com valor máximo correspondente a três trechos de ida e volta por ano de projeto. Eventuais despesas, além do aprovado, deverão ser custeadas por outras fontes de financiamento. Este recurso será pago ao Coordenador do projeto e repassado ao bolsista mediante recibo;

**Valor solicitado:** 3 passagens de ida e volta Curitiba–State College (PA) no valor total de R\$ 16.500,00.

- iii. Auxílio à pesquisa, no valor de até R\$ 50.000,00 (cinquenta mil reais) por ano de projeto, a ser utilizado exclusivamente na rubrica de custeio, de acordo com os itens II.1.4.1.2. Este recurso será repassado e gerenciado pelo pesquisador Coordenador do projeto;

- a. material bibliográfico;

**Valor solicitado:** R\$ 5000,00.

- b. material de consumo, componentes e/ou peças de reposição de equipamentos, software, instalação, recuperação e manutenção de equipamentos;
  - c. serviços de terceiros — pagamento integral ou parcial de contratos de manutenção e serviços de terceiros, pessoa física ou jurídica, de caráter eventual. Qualquer pagamento a pessoa física deve ser realizado de acordo com a legislação em vigor, de forma a não estabelecer vínculo empregatício. Assim, a mão-de-obra empregada na execução do projeto não terá vínculo de qualquer natureza com o CNPq e deste não poderá demandar quaisquer pagamentos, permanecendo na exclusiva responsabilidade do Coordenador do Projeto /instituição de execução do projeto;
  - d. despesas acessórias, especialmente as de importação e as de instalações necessárias ao adequado funcionamento de equipamentos (ver subitem II. 1.4.4);
  - e. Passagens e diárias, de acordo com as normas das agências financiadoras, destinadas exclusivamente aos membros da equipe para realização de atividades de campo, coleta de dados ou suporte de especialista para desenvolvimento do projeto.

**Valor solicitado** (para pós-doc) 4 viagens Curitiba-Manaus para participar de campanhas de medições nos sítios GOAMAZON e ATTO, com custo unitário abaixo discriminado:

|                                                         |                     |
|---------------------------------------------------------|---------------------|
| Passagem aérea ida-volta Curitiba-Manaus                | R\$ 3.000,00        |
| 15 diárias (R\$ 320,00)                                 | R\$ 4.800,00        |
| Auxílio deslocamento para os projetos ATTO e GOAMAZON   | R\$ 2.000,00        |
| <b>Total</b>                                            | <b>R\$ 9.800,00</b> |
| <b>Total:</b> $4 \times 9.800,00 = \text{R\$}39.200,00$ |                     |

**Total solicitado no item iii:** R\$ 44.200,00.

- iv. Cota adicional de bolsa de Doutorado Sanduíche no Exterior — SWE de até 36 meses, para acompanhar as pesquisas do Pesquisador Visitante Especial em sua instituição de origem, desde que solicitada no Formulário de Proposta Online e prevista no projeto de pesquisa;

**Total solicitado:** 1 Bolsa de Doutorado Sanduíche.

- v. Cota adicional de bolsa de Pós Doutorado Júnior de até 36 meses, para manter as pesquisas e o contato com o Pesquisador Visitante Especial durante a ausência deste do Brasil, desde que solicitada no Formulário de Proposta Online e prevista no projeto de pesquisa.

**Recurso solicitado:** 1 Bolsa de Pós-Doutorado Júnior.

## 6 Interesse institucional

Esta proposta é do interesse da Universidade Federal do Paraná, via Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, e de Pennsylvania State University.

Embora não estejamos anexando cartas de interesse formal, esta proposta agrega recursos e atividades de pesquisa aos projetos ATTO e GOAMAZON, dos quais os proponentes são participantes.

## 7 Equipe

| Nome                                         | CPF         | CV Lattes                                                                                   | Atividades                                                                                              |
|----------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nelson Luís Dias                             | 69183961704 | <a href="http://lattes.cnpq.br/5149356080083086">http://lattes.cnpq.br/5149356080083086</a> | Coordenador. Todas as atividades do projeto.                                                            |
| Marcelo Chamecki                             | 03093099994 | <a href="http://lattes.cnpq.br/1299937665683868">http://lattes.cnpq.br/1299937665683868</a> | Visitante Especial. Todas as atividades do projeto                                                      |
| Einara Zahn                                  | 08439545908 | <a href="http://lattes.cnpq.br/6894518244805655">http://lattes.cnpq.br/6894518244805655</a> | Aluna de Mestrado (PPGEA/UFPR). Similaridade de escalares simples. Similaridade de escalares complexos. |
| Pós-doutorado Jr (Cléo Quaresma)             | 72952229287 | <a href="http://lattes.cnpq.br/9857237626091379">http://lattes.cnpq.br/9857237626091379</a> | Visitas a campo para medições e recuperação de dados. Efeito do ângulo zenital. Efeito de $z_0/L_0$ .   |
| Doutorado sanduíche (Bianca Luhm Crivellaro) | 05120078966 | <a href="http://lattes.cnpq.br/5471666188244637">http://lattes.cnpq.br/5471666188244637</a> | Reconfiguração da vegetação.                                                                            |

## 8 Disponibilidade de infraestrutura

Tanto o proponente brasileiro (NLD) como o Pesquisador Visitante Especial coordenam laboratórios com a necessária infraestrutura de pesquisa, que inclui equipamentos micrometeorológicos, computadores de mesa para processamento de dados, e *clusters* de computação de alto desempenho. Essa infraestrutura estará disponível para todos os participantes do projeto.

## 9 Benefícios para a UFPR

As pesquisas aqui propostas reforçarão os laços que já existem entre a UFPR e PennState, e que incluem: visita prolongada de dois professores de PennState à UFPR em 2012; palestra de Marcelo Chamecki no PPGMNE/UFPR em 2013; doutorado sanduíche de Diana Maria Cancelli em 2013; participação de alunos de mestrado do PPGEA/UFPR no experimento GOAMAZON em 2013, e participação de Marcelo Chamecki em bancas de mestrado e doutorado na UFPR.

Elas permitirão a continuidade da colaboração internacional entre os grupos de pesquisa liderados por N. L. Dias e M. Chamecki: essa colaboração tem resultado em significativo volume de publicações em coautoria em periódicos bem qualificados no QUALIS: [Salesky et al. \(2012\)](#); [Cancelli et al. \(2012, 2014, 2013\)](#).

## Referências

- Andreae, M. O., Acevedo, O. C., Araujo, A., Artaxo, P., Barbosa, C. G. G., Chi, J. B. X., Cintra, B. B. L., da Silva, N. F., Dias, N. L., Ditz, R., Godoi, R. H. M., Heimann, M., Hoffmann, T., Júnior, C. Q. D., Kesselmeier, J., Lavric, J. V., Manzi, A. O., Nölscher, A. C., Nogueira, D. S., Piedade, M. T. F., Pöhlker, C., Pöschl, U., Ro, C.-U., Sá, L. D. A., Sá, M., Sales, C. B., dos Santos, R. M. N., Saturno, J., Schöngart, J., Sörgell, M., de Souza, C. M., de Souza, R. A. F., Targhetta, N., Tóta, J., Trebs, I., van Eijckand Jonathan Williams, A., Winderlich, J., Wittmann, F., Wolff, S., e Yáñez-Serrano, A. M. (2014). The ATTO measurement site in the remote Amazon Basin: overview of first results on ecosystem ecology, meteorology, trace gas and aerosol measurements, a ser submetido. *Environ Sci Technol*.
- Andreae, M. O., Rosenfeld, D., Artaxo, P., Costa, A. A., Frank, G. P., Longo, K. M., e Silva-Dias, M. A. F. (2004). Smoking rain clouds over the Amazon. *Science*, 303:1337–1342.
- Arnqvist, J. e Bergström, H. (2014). Flux-profile relation with roughness sublayer correction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
- Asanuma, J. e Brutsaert, W. (1999). Turbulence variance characteristics of temperature and humidity in the unstable atmospheric surface layer above a variable pine forest. *Water Resour. Res.*, 35(2):515–521.

- Asanuma, J., Tamagawa, I., Ishikawa, H., Ma, Y., Hayashi, T., Qi, Y., e Wang, J. (2007). Spectral similarity between scalars at very low frequencies in the unstable atmospheric surface layer over the Tibetan plateau. *Boundary-Layer Meteorol.*, 122:85–103.
- Bowling, D. R., Turnipseed, A. A., Delany, A., Baldocchi, D. D., Greenberg, J. P., e Monson, R. (1998). The use of relaxed eddy accumulation to measure biosphere-atmosphere exchange of isoprene and other biological trace gases. *Oecologia*, 116:306–315.
- Brutsaert, W. (1999). Aspects of bulk atmospheric boundary layer similarity under free-convective conditions. *Reviews of Geophysics*, 37:439–451.
- Cancelli, D. M., Chamecki, M., e Dias, N. L. (2013). Estudo da similaridade entre escalares sobre uma superfície heterogênea utilizando Large-Eddy Simulation. Em *Anais, VIII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia*, número WBM13\_69\_8, Santa Maria, RS.
- Cancelli, D. M., Chamecki, M., e Dias, N. L. (2014). A large-eddy simulation study of scalar dissimilarity in the convective atmospheric boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 71(1):3–15.
- Cancelli, D. M., Dias, N. L., e Chamecki, M. (2012). Dimensionless criteria for the production-dissipation equilibrium of scalar fluctuations and their implications for scalar similarity. *Water Resour. Res.*, 48:W10522.
- Chamecki, M. e Fuentes, J. (2014). Bridging land-surface fluxes and aerosol concentrations to triggering convective rainfall. NSF Proposal Number: Marcelo???
- Dias, N. L. (2013). Wilfried H. Brutsaert's research on turbulence in the Atmospheric Boundary Layer. *Water Resour. Res.*, páginas 7169–7184.
- Dias, N. L. e Brutsaert, W. (1996). Similarity of scalars under stable conditions. *Boundary-Layer Meteorol.*, 80:355–373.
- Dias, N. L., Hong, J., Leclerc, M., Black, Nesic, Z., e Krishnan, P. (2009). A simple method of estimating scalar fluxes over forests. *Boundary-Layer Meteorol.*, 132:401–414.
- Garratt, J. R. (1980). Surface influence upon vertical profiles in the atmospheric near-surface layer. *Q J Roy Meteorol Soc*, 106:803–819.
- Garratt, J. R. (1983). Surface influence upon vertical profiles in the nocturnal boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 26:69–80.
- Guenther, A., Hewitt, C. N., Erickson, D., Fall, R., Geron, C., Graedel, T., Harley, P., Klinger, L., Lerdau, M., McKay, W. A., Pierce, T., Scholes, B., Steinbrecher, R., Tallamraju, R., Taylor, J., e Zimmerman, P. A. (1995). Global-Model of Natural Volatile Organic-Compound Emissions. *J. of Geophys. Res.*, 100(D5):8873–8892.

- Harman, I. N. e Finnigan, J. J. (2007). A simple unified theory for flow in the canopy and roughness sublayer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 123:339–363.
- Hill, R. J. (1989). Implications of Monin-Obukhov similarity theory for scalar quantities. *J. Atmos. Sci.*, 46:2236–2244.
- Jardine, K., Abrell, L., e Serrano, Y. (2011). Within-canopy sesquiterpene ozonolysis in Amazonia. *J. of Geophys. Res.*, 116:D19301.
- Kader, B. A. e Yaglom, A. M. (1990). Mean Fields and Fluctuation Moments in Unstably Stratified Turbulent Boundary Layers. *J. of Fluid Mech.*, 212:637–662.
- Li, D., Bou-Zeid, E., e De Bruin, H. A. R. (2012). Monin-Obukhov Similarity Functions for the Structure Parameters of Temperature and Relative Humidity. *Boundary-Layer Meteorol.*, 145:45–67.
- Lin, J. C., Matsui, T., Sr., R. A. P., e Kummerow, C. (2006). Effects of biomass burning-derived aerosols on precipitation and clouds in the Amazon Basin: A satellite-based empirical study. *J. of Geophys. Res.*, 111:D19204.
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*, 20:130–141.
- Martins, J. A., Gonçalves, F. L. T., Morales, C. A., Fisch, G. F., Pinheiro, F. G. M., Leal Júnior, J. B. V., Oliveira, C. J., Silva, E. M., Oliveira, J. C. P., Costa, A. A., e Silva Dias, M. A. (2009). Cloud condensation nuclei from biomass burning during the Amazonian dry-to-wet transition season. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 104(1-2):83–93.
- Mölder, M., Grelle, A., Lindroth, A., e Halldin, S. (1999). Flux-profile relationships over a boreal forest – roughness sublayer corrections. *Agric For Meteorol.*, 98/99:645–658.
- Pan, Y., Chamecki, M., e Isard, S. A. (2014). Large-eddy simulation of turbulence and particle dispersion inside the canopy roughness sublayer. *J. of Fluid Mech.*, 753:499–534.
- Pöschl, U., Martin, S., e Sinha, B. (2010). Rainforest aerosols as biogenic nuclei of clouds and precipitation in the Amazon. *Science*, 329:1513–1516.
- Queck, R., Bienert, A., Maas, H.-G., Harmansa, S., Goldberg, V., e Bernhofer, C. (2011). Wind fields in heterogeneous conifer canopies: parameterisation of momentum absorption using high-resolution 3D vegetation scans. *Eur J Forest Res*, 131(1):165–176.
- Salesky, S. T., Chamecki, M., e Dias, N. L. (2012). Estimating the random error in eddy-covariance fluxes and other turbulence statistics: the filtering method. *Boundary-Layer Meteorol.*, 144:113–135.

- Simpson, I. J., Thurtell, G. W., Neumann, H. H., Hartog, G. D., e Edwards, G. C. (1998). The Validity of Similarity Theory in the Roughness Sublayer Above Forests. *Boundary-Layer Meteorol.*, 87:66–99.
- Sugita, M. e Brutsaert, W. (1996). Optimal measurement strategy for surface temperature to determine sensible heat flux from anisothermal vegetation. *Water Resour. Res.*, 32:2129–3134.
- Vogel, S. (1984). Drag and flexibility in sessile organisms. *Am. Zool.*, 24:37–44.
- Vogel, S. (1989). Drag and reconfiguration of broad leaves in high winds. *J. Expl Bot.*, 40:941–948.
- Williams, C. A., Scanlon, T. M., e Albertson, J. D. (2007). Influence of surface heterogeneity on scalar dissimilarity in the roughness sublayer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 122:149–165.
- Wyngaard, J. C., Coté, O. R., e Izumi, Y. (1971). Local Free Convection, Similarity, and the Budgets of Shear Stress and Heat Flux. *J. Atmos. Sci.*, 28:1171–1182.
- Zahn, E. (2013). Uma análise experimental de escalares na camada rugosa em uma floresta amazônica. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Paraná.
- Zimmerman, P., Greenberg, J. P., e Westberg, C. E. (1988). Measurements of atmospheric hydrocarbons and biogenic emission fluxes in the Amazon Boundary layer. *J. of Geophys. Res.*, 93:1407–1416.