

DECLiF — DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA CAMADA-LIMITE E FLUXOS SUPERFICIAIS REGIONAIS

Proposta para Bolsa de Produtividade em Pesquisa

Nelson Luís Dias



Lemma — Laboratório de Estudos em Monitoramento e Modelagem Ambiental
Departamento de Engenharia Ambiental
Universidade Federal do Paraná
<http://www.lemma.ufpr.br>

29 de julho de 2013

1 Bolsa de produtividade em pesquisa anterior

Do formulário de propostas *on-line* do CNPq: Para proponente com bolsa em curso, incluir no próprio arquivo do Projeto de Pesquisa, logo no início, um texto de 10 linhas — no máximo — descrevendo as metas atingidas em relação à proposta anterior. Todas as publicações e orientações do período devem estar atualizadas no Currículo Lattes.

1.1 Metas atingidas

Construímos, continuamos a testar, e geramos diversos produtos de pesquisa relacionados a Veículos Aéreos não-tripulados, com os quais estudamos: fluxos de entranhamento na Camada-Limite Atmosférica (CLA), novas funções de similaridade para o espectro de temperatura, e modelos de crescimento com camada residual, e novos métodos para o cálculo da velocidade do vento. Identificamos as causas físicas, não-locais, da quebra de similaridade entre escalares, com dados medidos de turbulência e simulações de grandes vórtices. Realizamos medidas de CO₂ com covariâncias turbulentas no lago de Itaipu e determinamos sua ordem de grandeza para uma campanha de verão. Desenvolvemos colaborativamente um novo método para o cálculo das escalas integrais da turbulência e de erros em fluxos de escalares.

1.2 Detalhamento dos principais resultados da bolsa de produtividade anterior

Durante 2011–2013, o proponente foi Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq com a proposta aprovada “Métodos teóricos e experimentais em turbulência para Qualidade do Ar” (Proc. 301142/2010-6). Resultados obtidos incluem: (i) Uma melhor compreensão das causas da não-similaridade entre escalares na camada superficial, como

resultado da orientação da tese de doutorado de Diana Maria Cancelli (em fase de conclusão), de seu estágio doutoral do exterior (“sanduíche”) com apoio do CNPq (Proc. 201974/2011-8), com a co-orientação do Prof. Marcelo Chamecki (*Pennsylvania State University*), e a publicação de diversos trabalhos sobre o tema (Dias et al., 2010; Cancelli et al., 2012a,b, 2013). Os resultados dessas pesquisas indicam claramente que fluxos superficiais fracos de escalares podem não seguir as previsões da Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov, e têm implicações importantes para o cálculo dos fluxos de calor latente e sensível (e possivelmente também dos fluxos de gases de efeito estufa) em lagos de reservatórios. (ii) Medições e análises baseadas em veículos aéreos não tripulados. (ii-a) Obtenção da velocidade do vento (em relação à terra) com medições a bordo de um veículo aéreo não tripulado. Desenvolvemos um método de medição da velocidade do vento a partir de um referencial não-inercial utilizando as equações da cinemática e um método de mínimos quadrados. Os resultados foram parte do trabalho de conclusão de curso de Tomás Chor (Chor, 2011), e da orientação de uma aluna holandesa de intercâmbio, Rianne de Jong (de Jong, 2011), tendo sido já publicados (de Jong et al., 2011). (ii-b) Um método completo de medição dos perfis de temperatura e umidade até a altura da camada-limite atmosférica foi implementado, incluindo a capacidade de medir flutuações de temperatura, realizar análises espectrais e obter funções de similaridade para toda a camada-limite atmosférica (Dias et al., 2012b). Como um desdobramento desse trabalho, e no contexto da orientação da dissertação de mestrado de Livia Souza Freire (Freire, 2012), também foram desenvolvidos modelos de crescimento da altura da camada-limite atmosférica na presença de camadas residuais (Freire e Dias, 2013, submetido). (iii) Em decorrência da participação do autor no *Brutsaert-Parlange Symposium*, a convite dos organizadores e com o apoio do CNPq (Proc. 450502/2012-0), o proponente apresentou palestra a convite (http://ecommons.library.cornell.edu/bitstream/1813/29563/2/E2_Dias_Turbulence-HD_for_Apple_Devices_5Mbps.m4v). Um artigo convidado de revisão sobre turbulência atmosférica a ser publicado no número especial de *Water Resources Research* sobre o evento está em revisão (Dias, 2013b, submetido), e um estudo analítico sobre modelos de radiação de onda longa para o cálculo da dissipação radiativa de flutuações de temperatura na atmosfera já foi aceito para publicação no mesmo número (Dias, 2013a). (iv) O estudo das condições de estacionariedade da turbulência, das suas escalas integrais, e das condições de aplicação dos conceitos usuais da teoria de similaridade de Monin-Obukhov é uma linha de pesquisa antiga do proponente (Dias et al., 1999, 2004; Bernardes e Dias, 2005; Dias et al., 2005; Bernardes e Dias, 2010). Durante o interregno da bolsa de produtividade em pesquisa, um novo método de estimativa de erros dos fluxos turbulentos de escalares foi desenvolvido em colaboração com M. Chamecki: o método apresenta vantagens em relação às abordagens clássicas (Salesky et al., 2012), e está sendo utilizado para quantificar os erros envolvidos nas estimativas das funções de similaridade de Monin-Obukhov (Salesky e Chamecki, 2012). (v) O proponente tem pesquisado métodos analíticos e semi-analíticos de solução de equações diferenciais não-lineares, em colaboração com a Professora Ailin Ruiz de Zarate, do Departamento de Matemática da UFPR e do Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada da mesma instituição. Resultados já obtidos incluem soluções com auxílio de processamento simbólico da equação de Boussinesq (Chor et al., 2013b), e uma nova solução analítica em série para a mesma equação (Chor et al., 2013a, subme-

tido). (vi) O proponente participou, a convite, da elaboração do Plano de Controle de Poluição Veicular do Estado do Paraná ([ESTADO DO PARANÁ et al., 2011](#)), desenvolveu um modelo de cálculo de emissões veiculares de acordo com o Primeiro Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários ([Cancelli e Dias, 2013](#), submetido), e está orientando uma aluna de IC (Jessyca Petry Dalazen) no mesmo tema. (vii) Um novo modelo de dispersão foi desenvolvido no laboratório do proponente ([Lemma/UFPR](#)) no trabalho de conclusão de curso do aluno Fernando Augusto Silveira Armani, do curso de graduação em Engenharia Ambiental, em colaboração com o Prof. Ricardo Carvalho de Almeida, do Departamento de Engenharia Ambiental e do [Lemma/UFPR](#). Os resultados foram comparados com dados publicamente disponíveis de avaliação de modelos de dispersão, e foram submetidos para publicação ([Armani et al., 2013](#), submetido).

2 Resumo do plano de trabalho

2.1 Natureza do problema:

Do ponto de vista de aplicações em Engenharia, talvez as maiores contribuições da micrometeorologia continuem a ser:

1. A geração de estimativas confiáveis dos fluxos turbulentos superficiais de *momentum*, calor sensível e de massa de diversos gases tais como H_2O , CO_2 , CH_4 , COVs (compostos orgânicos voláteis), e muitos outros.
2. A formulação de parametrizações confiáveis de difusividade turbulenta (e outras) para aperfeiçoar o desempenho de modelos de fechamento de turbulência usados em diversos tipos de modelagem de fenômenos atmosféricos.

É inquestionável a importância e a prevalência da teoria de similaridade de Monin-Obukhov ([Obukhov, 1946](#); [Monin e Obukhov, 1954](#); [Foken, 2006](#)) como ferramenta tanto de formulação de modelos quanto como um arcabouço conceitual para a análise de dados de turbulência medidos na subcamada superficial da camada-limite atmosférica (CLA).

A teoria, entretanto, possui limitações que hoje em dia são bem conhecidas ([Hill, 1989](#); [de Bruin et al., 1993](#); [Katul e Hsieh, 1999](#); [Cancelli et al., 2012a](#)). Essas limitações têm a ver com os fluxos de entranhamento no topo da CLA, com condições não-homogêneas e não estacionárias que não são previstas na teoria, e com efeitos da subcamada rugosa que se tornam preponderantes, por exemplo, em medições em terreno muito acidentado ou sobre florestas. Todos esses efeitos ainda são relativamente pouco conhecidos em virtude de sua dificuldade inerente.

A presente proposta de pesquisa tem por objetivo colocar em uso diversas abordagens que já se mostraram eficazes, ou que possuem grande potencial, para gerar técnicas de medição e análise de dados que melhorem nossas estimativas de fluxos superficiais turbulentos na presença de condições não-ideais (do ponto de vista da TSMO) e quando os efeitos da subcamada rugosa são importantes.

2.2 Objetivo principal:

Nosso principal objetivo é o aperfeiçoamento de métodos de cálculo de fluxos superficiais turbulentos — principalmente de gases de efeito estufa (GEE) — em dois tipos principais de superfície: lagos de grandes reservatórios, e a floresta amazônica. *A relevância ambiental do estudo está relacionada ao impacto desses fluxos sobre o aquecimento global, e sobre a dinâmica da atmosfera.*

Nossa proposta está voltada preponderantemente para:

- 1) Superfícies líquidas de grandes reservatórios. Nessas superfícies, o objetivo é o aperfeiçoamento de métodos de cálculo dos fluxos de *momentum*, calor sensível e latente, e CO_2 e CH_4 . A importância dos dois últimos no contexto ambiental e na formulação de políticas nacionais consistentes e sustentáveis de produção de energia tem crescido sobremaneira, e o proponente está fortemente envolvido no aperfeiçoamento de estimativas de fluxos de gases de efeito estufa, e na modelagem do ciclo biogeoquímico do carbono em geral, para grandes reservatórios brasileiros (Dias et al., 2012a). No momento, o proponente orienta 3 teses de doutorado (Diana Maria Cancelli, Bruno Solheid e Dornelles Vissotto Jr.; a primeira com previsão para conclusão até o fim de 2013) e uma dissertação de mestrado (Fernando Armani) voltadas para o tema .
- 2) A floresta amazônica, em particular o sítio do projeto ATTO, em andamento, do qual o proponente é participante. O sítio proporciona uma oportunidade única de estudo da subcamada rugosa, seus efeitos, e de novas abordagens para a estimativa de fluxos superficiais. Além disso, iniciativas associadas de pesquisa¹, das quais o proponente participa, poderão proporcionar novos métodos para o cálculo dos fluxos de gases-traço com base em medições intensivas com balões cativos, simulações de grandes vórtices, e métodos de balanço de escalares na CLA.

2.3 Estado atual do conhecimento:

Embora os limites de aplicabilidade da teoria de similaridade de Monin-Obukhov sejam hoje bem conhecidos, as alternativas de parametrização da turbulência em condições não-ideais são ainda incipientes. Em particular, faltam teorias quantitativas que nos permitam modelar a turbulência, e os próprios fluxos superficiais, em tais condições.

O problema se desdobra em diversas situações de interesse prático. Eles incluem a validade (ou não) da Teoria de similaridade de Monin-Obukhov (TSMO) para a previsão de fluxos superficiais de diversos escalares. A TSMO prevê que as características de transporte pela turbulência de todos os escalares são iguais, havendo entretanto numerosas observações em contrário, assim como diversas explicações para esse fato.

As consequências são múltiplas e incluem: estimativas de evaporação em lagos, estimativas do fluxo de calor sensível na superfície de lagos, cálculo de difusividades turbulentas de escalares e erros associados, com aplicação em modelos de dispersão atmosférica, definição de condições de contorno superficiais para modelos de evolução térmica de lagos, e cálculo de fluxos de gases de importância ambiental tais como O_2 , CO_2 e CH_4 , entre outros.

¹Bridging land-surface fluxes and aerosol concentrations to triggering convective rainfall: proposta de pesquisa para a iniciativa *GoAmazon* 2014, Marcelo Chamecki, Pennsylvania State University.

Resultados recentes obtidos por nós também sugerem que os fluxos de gases de efeito estufa em superfícies líquidas podem ser demasiadamente pequenos para que a TSMO se aplique aos mesmos, de maneira que é preciso revisitar as equações relevantes e confrontá-las com medições confiáveis, como as que estão sendo realizadas ao longo de 2013 pelo proponente e colaboradores no lago de Itaipu (Dias et al., 2013).

Talvez ainda mais séria seja a falha da TSMO para a variância de escalares na subcamada rugosa: enquanto que estatísticas relacionadas ao campo de velocidade tendem a se organizar em função da variável de estabilidade de Obukhov ζ na subcamada rugosa — embora com coeficientes distintos dos observados na camada superficial —, as variâncias de temperatura e CO_2 desorganizam-se completamente (Dias et al., 2009). O mesmo comportamento foi obtido recentemente pelo autor para o sítio do projeto ATTO (Dias e Chor, 2012).

Nossos resultados mostram claramente a necessidade de aprofundar os estudos de condições não-ideais em que a TSMO não se aplica, compreender melhor o comportamento da turbulência na subcamada rugosa, verificar a aplicabilidade dos modelos atualmente disponíveis e avançar na geração de técnicas confiáveis de estimativa dos fluxos nessas condições.

2.4 Síntese da metodologia:

Esta proposta compreende as seguintes atividades:

- 1) Extensão da metodologia desenvolvida em Cancelli et al. (2012a), que lida especificamente com os limites de validade da TSMO em função da intensidade dos fluxos de escalares, para dados de turbulência medidos pelo proponente e colaboradores nos lagos de Furnas e Itaipu. No lago de Furnas, análises em andamento para dados medidos de razão de Bowen e fluxos de calor latente e sensível estão confirmando os resultados já obtidos (com 8 dias de dados) para períodos muito mais longos. Os efeitos de não-similaridade sobre os coeficientes de transferência de massa e calor também serão investigados.

No lago de Itaipu, as medições em curso do fluxo de CO_2 (Dias et al., 2013) serão utilizadas para avaliar a similaridade entre as concentrações de CO_2 e de H_2O , e a temperatura. Isso permitirá estabelecer a validade (ou não) da aplicação das equações da TSMO aos fluxos de cada um desses escalares. Nesse sítio, a existência de medições de gradientes de concentração média de CO_2 também permitirá verificar a validade das relações fluxo-gradiente previstas pela TSMO, bem como das difusividades turbulentas associadas.

Finalmente, relações para o coeficiente de transferência de massa na interface água-ar serão desenvolvidas levando em conta as características da turbulência na subcamada interfacial aquática, para facilitar a aplicação de modelos de transferência de massa quando medições de concentração do gás forem feitas não diretamente na superfície da água, mas vários centímetros abaixo (como é usual em medições desse tipo).

- 2) Extensão das análises de Dias et al. (2009) e Dias e Chor (2012) para os dados já disponíveis (e previstos para o futuro) no sítio do projeto ATTO. As teorias disponíveis para a subcamada rugosa e fluxos correspondentes (Garratt, 1980, 1983; Cellier e

Brunet, 1992; Williams et al., 2007; Harman e Finnigan, 2007; Cava et al., 2008; Cava e Katul, 2012) serão testadas com esses dados, incluindo o comportamento do co-espectro da velocidade vertical com os escalares, bem como as funções de correlação cruzada correspondentes. A metodologia de Salesky et al. (2012) será aplicada para estimar a assimetria dessas últimas.

- 3) Realização de balanços de escalares na CLA como resultado das campanhas previstas na iniciativa *GoAmazon* 2014. Os balanços serão estendidos, em particular, para medições de COVs precursores de aerossóis. Essas atividades dependem da concretização das propostas de pesquisa associadas.

2.5 Fontes de apoio à pesquisa e financiamentos

Veículos Aéreos Não-Tripulados Neste momento, o proponente coordena um Projeto do Fundo Setorial de Energia entre a UFPR, a FUNPAR e a PETROBRAS, intitulado *Monitoramento com veículo aéreo não tripulado para estimativa das concentrações troposféricas de O₃ e altura da camada limite*. Financiamento de medições de campo, equipamentos e bolsas, inclusive de estágio.

Poluição atmosférica urbana O proponente coordena projeto de pesquisa financiado pela Prefeitura Municipal de Curitiba juntamente à FUNPAR, intitulado *Acompanhamento e Monitoramento da Qualidade do Ar no Entorno das Obras Viárias Integrantes do Programa de Recuperação Ambiental e Ampliação da Capacidade da Rede Integrada de Transporte - AFD e do Programa Integrado de Desenvolvimento Social e Urbano do Município de Curitiba - BID PRÓ-CIDADES*, que inclui atividades de monitoramento de poluição ao longo de diversos eixos viários importantes, e inclui atividades adicionais tais como o cálculo de emissões veiculares, e a análise de dados de poluentes medidos em estações de superfície pelo nosso grupo, e pelo IAP (Instituto Ambiental do Paraná). Financiamento de medições de campo, equipamentos e bolsas, inclusive de mestrado, e de estágio.

Gases de efeito estufa em reservatórios O proponente orienta um doutorado no PPGMNE (Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia) (Bruno Solheid) com bolsa concedida para esse tema pelo CNPq (Proc. 550938/2010-9: IMGEFE – Impactos da variabilidade climática sobre as emissões de gases de efeito estufa e a evaporação de reservatórios). O Proponente também é coordenador de um Projeto do Fundo Setorial de Energia entre a UFPR, a FUNPAR e a CHESF, intitulado *ELGEE – Monitoramento de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios de Centrais Hidrelétricas*, em atendimento à chamada nº 09/2008 de projetos estratégicos da ANEEL. Financiamento de medições de campo, equipamentos e bolsas de mestrado e doutorado.

2.6 Resultados esperados:

Questões científicas Esta proposta pretende oferecer uma contribuição para as metodologias de medição de diversas grandezas na CLA, inclusive diversos fluxos turbulentos superficiais, e perfis de temperatura, umidade específica, vento, CO₂ e O₃ na camada superficial e início da camada misturada da CLA.

Prevê-se avanços na compreensão da subcamada rugosa, e na sua parametrização, incluindo o caso clássico da subcamada rugosa sobre florestas, e também a subcamada interfacial *na água* como parte de uma pesquisa para parametrização dos fluxos de gases de efeito estufa em lagos de reservatórios.

Também esperamos aumentar nossa compreensão do comportamento dos coespectros entre a velocidade vertical e escalares tanto na subcamada rugosa quanto na camada superficial, e avançar nos métodos de correção da separação espacial entre os sensores de velocidade e de escalares.

A similaridade entre as flutuações de CO₂, H₂O e temperatura em superfícies líquidas será melhor compreendida com a análise dos dados que estão sendo medidos ao longo do ano de 2013 no lago de Itaipu, como parte do projeto ELGEE, mencionado acima. Nesse projeto, também será possível verificar a aplicabilidade de relações fluxo-gradiente, uma vez que, além de medições de longo prazo do fluxo de CO₂ com o método de covariâncias turbulentas, também estão sendo medidos gradientes das concentrações médias de CO₂ na torre micrometeorológica instalada no lago.

Embora não façam parte do tema central desta proposta, o proponente mantém linhas e interesses permanentes de pesquisa também em recursos hídricos e modelos de dispersão atmosférica, entre outros. Em alguns casos, como na emissão de gases de efeito estufa por reservatórios, os temas se entrelaçam, por exemplo, com o cálculo de evaporação em lagos. Portanto, prevê-se a continuidade de diversas outras pesquisas em andamento, tais como a modelagem de dispersão (Armani et al., 2013), emissões veiculares (IC de Jessyca Petry Dalazen; Cancelli e Dias (2013, submetido)), e a inclusão de efeitos de topografia em modelos de dispersão (tese de doutorado de Loreci Zanardini, PPGMNE), e soluções e análises da equação não-linear de Boussinesq para escoamento subterrâneo (Chor et al., 2013b,a).

Formação de recursos humanos O proponente tem uma atuação continuada no Curso de Graduação de Engenharia Ambiental da UFPR, no Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia (PPGMNE/UFPR), e no novo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, PPGEA/UFPR. Desde sua criação, o proponente tem ocupado o cargo de coordenador do PPGEA (www.ppgea.ufpr.br). Atualmente, orienta uma iniciação científica (Jessyca Petry Dalazen) com bolsa CNPq, os trabalhos de conclusão de curso de dois alunos de graduação (Henrique Guarneri e Einara Zahn), 3 alunos de mestrado no PPGEA (Fernando Augusto Silveira Armani, Bianca Crivellaro Luhm e Tomás Luís Guimarães Chor), e 5 alunos de doutorado no PPGMNE (Bruno Solheid, Diana Maria Cancelli, Dornelles Vissotto Jr., André Luciano Malheiros e Loreci Zanardini). Conforme mencionado acima, várias dessas orientações estão relacionadas com os temas desta proposta. No PPGMNE e no PPGEA o proponente tem ministrado desde 2011 regularmente as disciplinas TEA752 Métodos Matemáticos em Engenharia Ambiental (<http://dodo.lemma.ufpr.br/doku.php?id=wiki:tea752>) e TEA757 Camadas-Limite Naturais e Transporte de Poluentes (<http://dodo.lemma.ufpr.br/doku.php?id=wiki:tea757>).

Produção científica Esta proposta prevê a conclusão de pelo menos 1 tese de doutorado e 3 dissertações de mestrado durante a vigência da bolsa de produtividade de pesquisa, e a publicação de pelo menos 6 artigos científicos em revistas científicas com

corpo editorial ao longo da duração da bolsa de pesquisa, além das comunicações usuais em congressos.

Cooperações nacionais Esta proposta contempla a colaboração com o CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) da ELETROBRAS; com a COPPE/UFRJ; com o INPE em estudos de emissões de gases de efeito estufa em reservatórios; e com o INPA no projeto ATTO.

Cooperações internacionais Esta proposta contempla a colaboração com o Departamento de Meteorologia da PSU (*Pennsylvania State University*) em medições micrometeorológicas, simulações computacionais de turbulência e análise de dados micrometeorológicos.

Relevância ambiental e sócio-econômica Na área de recursos hídricos, a estimativa confiável dos fluxos de calor sensível e latente em lagos continua a ser um desafio, sendo particularmente crítica em períodos de seca tais como o que ocorreu recentemente nos últimos meses de 2012, quando a capacidade de geração hidrelétrica brasileira fica em risco. Estimativas de evaporação são um dos fatores mais importantes no planejamento da geração hidrelétrica do Brasil (Kelman et al., 2004). Os recentes resultados do proponente, colaboradores e orientados podem proporcionar avanços importantes tanto na construção de modelos de evaporação e do fluxo de calor sensível, quanto na sua efetiva medição.

A questão da emissão de gases de efeito estufa por reservatórios é igualmente importante para subsidiar as políticas ambiental e energética brasileiras. Os esforços de pesquisa com os quais o proponente está envolvido devem contribuir significativamente para melhorar os modelos atualmente existentes do ciclo do carbono em reservatórios e para parametrizar melhor as trocas de CO₂ e CH₄ entre as superfícies líquidas dos reservatórios e a atmosfera, de forma a compreender seu impacto sobre o aquecimento global.

O estudo das interações entre a floresta amazônica e a atmosfera possui importância ambiental amplamente conhecida para a previsão de tempo e clima e para os estudos de mudanças climáticas globais. Uma das questões científicas importantes dos projetos ATTO e *GoAmazon* é a compreensão das diferenças entre COVs de origem antropogênica (no caso do projeto ATTO, oriundos da cidade de Manaus) e natural como precursores de aerossóis na atmosfera.

Finalmente, avanços no entendimento da dinâmica da turbulência na camada-limite atmosférica possuem importância em geral na melhoria de modelos de dispersão de escalares, inclusive poluentes, na atmosfera.

3 Introdução

A medição dos fluxos superficiais de escalares nos dois tipos principais de superfície abordados majoritariamente na presente proposta, florestas e grandes superfícies líquidas, continua a ser um tema desafiador mesmo após várias décadas de estudos dedicados a este tipo de medição. Embora também cubra os tradicionais fluxos de energia associados aos escalares temperatura (calor sensível) e vapor d'água (calor latente), a presente

proposta visa primordialmente melhorar as estimativas dos fluxos de gases de efeito estufa (CO_4 e CH_4) em superfícies líquidas, e dos mesmos gases, mais COVs, em florestas.

Para cada tipo de superfície, as abordagens são diferentes em função de diversos fatores: a importância da subcamada rugosa no caso de florestas; da subcamada interfacial *na água* em lagos; a diferença da intensidade dos fluxos em cada superfície; e as diferentes espécies químicas cujos fluxos se deseja determinar.

No caso de superfícies líquidas o nosso foco é verificar a validade da teoria de similaridade de Monin-Obukhov para os fluxos de gases de efeito estufa CO_2 e CH_4 . Embora essa validade seja usualmente admitida, pretendemos investigar se o mesmo tipo de quebra de similaridade observado por [Cancelli et al. \(2012a\)](#) para a temperatura quando os fluxos de calor sensível são fracos também ocorre para CO_2 . Conforme observado acima, medições preliminares de fluxos de CO_2 no lago de Itaipu resultaram em valores pequenos e variáveis, ora positivos e ora negativos, ao longo do dia e entre diferentes dias, durante dezembro de 2012.

No caso da floresta amazônica, o foco é a parametrização da subcamada rugosa e a avaliação de diferentes métodos de estimativa dos fluxos de escalares, inclusive baseados em medições de perfis médios na CLA. Métodos cujos requerimentos aliviem ou dispensem medições em alta frequência são particularmente importantes no caso de gases para os quais tal tipo de medição seja muito difícil ou impraticável sobre longos períodos de tempo.

4 Revisão de literatura e resultados recentes obtidos pelo proponente e colaboradores

4.1 Similaridade entre escalares e a validade da analogia de Reynolds

A geometria da superfície terrestre e a marcha temporal dos forçantes atmosféricos impõem severas limitações às hipóteses usualmente utilizadas para tornar a turbulência um problema tratável com ferramentas estatísticas. As hipóteses usuais de homogeneidade espacial e estacionariedade, embora tenham servido para lançar as bases da micrometeorologia moderna, constituindo parte integral da teoria de similaridade de Monin-Obukhov — TSMO — ([Obukhov, 1946](#); [Monin e Obukhov, 1954](#)), são insuficientes para lidar com numerosas situações de interesse prático.

Além disso, as teorias de fluxo-gradiente tais como a TSMO são concebidas para problemas em que o número de escalas do problema é pequeno — ou seja: para problemas geométrica e dinamicamente simples. [Tennekes e Lumley \(1972\)](#) analisam em detalhe a justificativa para a utilização de relações fluxo-gradiente locais, com difusividades turbulentas. Elas não são universais, tendendo a valer em escoamentos com cisalhamento médio que possuem uma única escala característica de velocidade, e uma única escala característica de comprimento ([Tennekes e Lumley, 1972](#), p. 47–50). Naturalmente, essa hipótese restringe a complexidade das situações reais que podemos analisar com esse tipo de teoria.

Uma consequência da TSMO é sua previsão de que o coeficiente de correlação entre as flutuações turbulentas de dois escalares é ± 1 , e de que todas as funções de similaridade relativas aos dois escalares são iguais ([Hill, 1989](#); [Dias e Brutsaert, 1996](#)). Costuma-se denominar este tipo de comportamento de “similaridade perfeita”. Uma condição

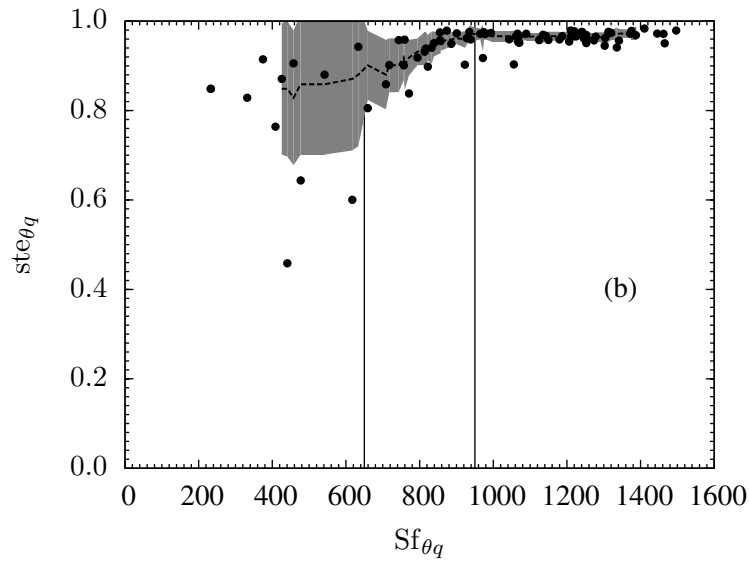


Figura 1: Relação entre a eficiência de transferência simétrica e o número de fluxo de superfície, propostos por [Cancelli et al. \(2012a\)](#).

física importante para a validade da similaridade perfeita é que os termos de transporte de variâncias e covariâncias seja desprezível ([Dias e Brutsaert, 1996](#)).

Entretanto, é um fato bem conhecido que a similaridade perfeita entre escalares é muito mais a exceção do que a regra na camada superficial ([Katul et al., 2008](#); [Cancelli et al., 2012a](#)). As causas normalmente associadas com dissimilaridade incluem não-estacionariedade ([McNaughton e Laubach, 1998](#); [Asanuma et al., 2007](#)), advecção local ([Bertela, 1989](#); [Asanuma et al., 2007](#)) e heterogeneidade da superfície ([Andreas et al., 1998](#); [Asanuma e Brutsaert, 1999a](#); [Lamaud e Irvine, 2006](#)), além do papel ativo/passivo dos escalares ([Katul e Parlange, 1994](#); [Asanuma e Brutsaert, 1999a,b](#)).

Talvez o ponto mais importante seja o fato de que os dados experimentais sugerem que a quebra de similaridade, em particular para a variância de escalares, em geral vem acompanhada de forçantes mais fracos na superfície. Isso acontece para umidade em terra firme (condições secas) ([Mahrt, 1991](#); [de Bruin et al., 1993](#); [Roth e Oke, 1995](#); [Asanuma e Brutsaert, 1999b](#); [Katul e Hsieh, 1999](#)) e para temperatura sobre superfícies líquidas ([Sempreviva e Gryning, 2000](#); [Li et al., 2011](#); [Cancelli et al., 2012a](#)).

Nossos próprios esforços de pesquisa ([Dias et al., 2010](#); [Cancelli et al., 2012b,a](#)) mostram claramente a importância do desequilíbrio entre produção e dissipação de variância dos escalares envolvidos. Como parte desses esforços, novos números adimensionais que quantificam este desequilíbrio foram obtidos (denominados genericamente “número de fluxo de superfície” para diferentes escalares, e um novo indicador de similaridade para os fluxos de escalares, a “eficiência de transferência simétrica”, foram propostos em [Cancelli et al. \(2012a\)](#). A figura 1 mostra o sucesso desses novos parâmetros em quantificar a dissimilaridade entre temperatura e umidade para o lago de Furnas, MG.

Portanto, é provável que forçantes superficiais fracos permitam que o papel dos termos de transporte nas equações de Reynolds para variâncias e covariâncias de escalares se tornem preponderantes, e que efeitos tais como os fluxos de entranhamento no topo da camada-limite atmosférica contribuam para reduzir a correlação perfeita entre es-

calares. Pesquisas realizadas em nosso grupo utilizando simulação de grandes vórtices reforçam essa hipótese (Cancelli et al., 2013, submetido).

Uma consequência das pesquisas revistas acima e de nossos próprios resultados recentes é que extensão da analogia de Reynolds para as propriedades de transporte de diversos escalares de interesse não é garantida em muitas situações, e que ela depende fundamentalmente da intensidade dos fluxos superficiais correspondentes, assim como de sua dinâmica espaço-temporal na CLA. A analogia de Reynolds (difusividades turbulentas iguais para todos os escalares) é uma hipótese muito comum em micrometeorologia e qualidade do ar. Portanto, um melhor entendimento das condições de sua validade é fundamental para um sem-número de situações de interesse em Engenharia Ambiental, incluindo os cálculos dos fluxos superficiais de calor sensível e latente, o cálculo dos fluxos superficiais de gases de efeito estufa, o cálculo da reaeração em corpos d'água, e o cálculo da dispersão atmosférica de poluentes.

4.2 Gases de efeito estufa em reservatórios

Durante muito tempo, a energia de origem hidrelétrica foi considerada “limpa”, mas desde o início dos anos 1990, esta percepção mudou, e hoje é sabido que reservatórios de hidrelétricas emitem GEEs (gases de efeito estufa) (Mendonça et al., 2012).

O primeiro estudo no tema foi devido a Rudd et al. (1993): nele, os autores compararam perfis de concentração de CO₂ e CH₄ em lagos de hidrelétricas com perfis observados em corpos d'água naturais. Seus resultados indicaram que durante o período inicial após o enchimento do lago as emissões são altas (em comparação com corpos d'água naturais), reduzindo-se gradativamente e alcançando valores similares aos de lagos naturais após alguns anos. Eles concluíram que, dependendo das características do reservatório, a emissão de GEE por unidade de energia produzida pode ser significativa.

No entanto, a real contribuição de reservatórios para a sua emissão é motivo de controvérsias. Estimativas teóricas muitas vezes não correspondem às medições em campo (Rosa et al., 2003) e medições de emissões com diferentes métodos fornecem resultados diferentes (Duchenim et al., 1999). Revisões recentes mostram claramente que ainda não há consenso sobre os valores dos fluxos de GEE entre as superfícies líquidas e a atmosfera (Mendonça et al., 2012).

Nosso interesse está voltado para os métodos de medição e de modelagem dos fluxos de GEE. Um dos métodos mais antigos para estimar os fluxos, e ainda um dos mais usados, é o uso de câmaras flutuantes. Algumas limitações entretanto tornam desejável a realização de medições ou estimativas alternativas: por serem ambientes fechados, as câmaras produzem ambientes muito diferentes em seu interior, com marcada redução da turbulência: em geral, suas medições são consideradas mais confiáveis em condições de vento fraco (Richey et al., 2002; Cole et al., 2010). Outra limitação é a resolução temporal relativamente baixa das medições com câmaras, o que coloca em questão a sua representatividade para médias de longos períodos (Vesala et al., 2006). Métodos “indiretos”, baseados em equações de transferência de massa, também estão sujeitos a incertezas grandes em relação tanto à ordem de grandeza dos coeficientes de transferência (“velocidades de transferência”) quanto ao grande número de modelos e parametrizações propostos para esses coeficientes (Fairall et al., 2000; McGillis et al., 2001).

Nossos resultados recentes de pesquisa adicionam ao problema de estimativa de GEE em reservatórios a questão, raramente discutida, da aplicabilidade de equações de trans-

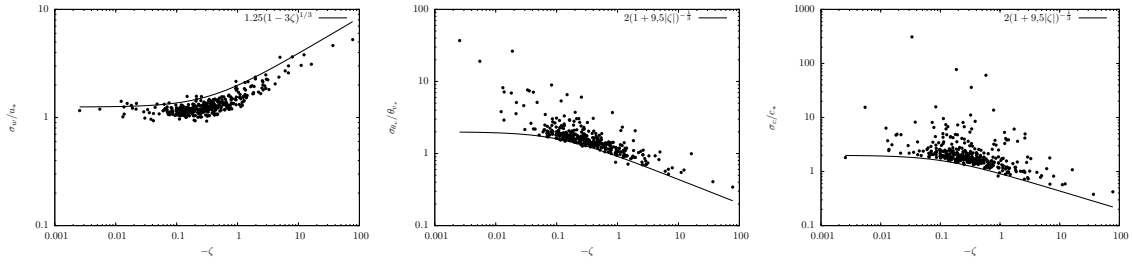


Figura 2: Funções adimensionais σ_w/u_* , σ_θ/θ_* e σ_c/c_* medidas no nível de 42 m no sítio do projeto ATTO. As linhas cheias são as previsões da teoria de similaridade de Monin-Obukhov.

ferência de massa baseadas na TSMO para superfícies líquidas (Dias et al., 2012a), porque sobre essas os fluxos de GEE podem ser muito menores do que em terra. Por exemplo, medições recentes com o método de covariâncias turbulentas no lago de Itaipu (Dias et al., 2013) produziram um valor médio (ao longo de 14 dias em dezembro de 2012) de $-0,00018 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, em comparação (por exemplo) com uma média mensal de $-0,0036 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para o mês de abril para o sítio do projeto ATTO, na Amazônia. Os desequilíbrios entre produção por gradiente e dissipação molecular encontrados por Cancelli et al. (2012a) ocorrem justamente quando os fluxos de escalares são “fracos”. Portanto, os valores pequenos de fluxos de gases de efeito estufa obtidos preliminarmente por Dias et al. (2013) sugerem cautela na aplicação da TSMO. O assunto precisa ser melhor investigado.

4.3 A subcamada rugosa

Uma outra questão de importância fundamental para a qualidade das estimativas de fluxos superficiais é a parametrização da subcamada rugosa. Para condições de topografia plana e obstáculos de rugosidade com densidade não muito alta, uma teoria altamente bem sucedida foi desenvolvida por Brutsaert (1975a,b). Para a parametrização da subcamada rugosa sobre vegetação alta (como por exemplo florestas), entretanto, a teoria de Brutsaert não é diretamente aplicável. Como observado recentemente por Dias (2013b, submetido), entre outros pontos, seria necessário levar em consideração o fato de que a subcamada rugosa pode atingir 2 a 3 vezes a altura dos obstáculos de rugosidade.

Relações fluxo-gradiente específicas para a subcamada rugosa foram propostas Celier e Brunet (1992) e Mölder et al. (1999) (entre muitos outros) e, apesar de dificuldades teóricas sobre a natureza da turbulência em uma subcamada rugosa, ainda parecem ser uma das abordagens de maior potencial de sucesso na prática. Teorias para a subcamada rugosa e para a correção dos gradientes adimensionais nesta região foram propostas por Garratt (1980, 1983), e mais recentemente por Harman e Finnigan (2007).

Uma questão crítica é a total falha da TSMO para as variâncias dos escalares na subcamada rugosa: enquanto que estatísticas relacionadas ao campo de velocidade tendem a se organizar em função da variável de estabilidade de Obukhov ζ na subcamada rugosa — embora com coeficientes distintos dos observados na camada superficial (Mölder et al., 1999) —, as estatísticas de temperatura e CO_2 desorganizam-se completamente (Dias et al., 2009). O mesmo comportamento foi obtido recentemente pelo autor para o sítio do projeto ATTO (Dias e Chor, 2012): a figura 2 mostra alguns desses resultados

para as funções adimensionais σ_w/u_* , σ_θ/θ_* e σ_c/c_* (σ indica o desvio-padrão da velocidade vertical e dos escalares, e o subscrito $*$ indica a escala de turbulência associada). Em resumo, o sítio do projeto ATTO propicia uma oportunidade única para a análise de dados de alta qualidade medidos dentro da subcamada rugosa na floresta amazônica, e para a formulação de métodos de cálculo de fluxo para escalares de grande relevância para a dinâmica regional (e global) de tempo e clima, particularmente no caso de gases tais como VOCs (que são precursores de aerossóis e podem afetar o processo de precipitação (Kanakidou et al., 2005)) cuja medição direta com o método de covariâncias turbulentas pode ser extremamente difícil ou cara.

4.4 Balanços de escalares e relações de similaridade na camada-limite atmosférica

Balanços de escalares e funções de similaridade na camada-limite atmosférica como um todo (em oposição às relações da TSMO para a camada superficial) são uma alternativa atraente às medições de fluxos feitas próximo à superfície, devido ao seu potencial de integrar áreas de contribuição grandes em relação às áreas de *footprint* típicas de medições micrometeorológicas (Brutsaert e Mawdsley, 1976; Brutsaert, 1999). A abordagem de utilizar medições em toda a região misturada da CLA para obter os fluxos superficiais seja com base em teorias de similaridade, seja com base em balanços de massa e energia, tem sido utilizada com razoável grau de sucesso (Brutsaert e Sugita, 1991; Hipps et al., 1994; Deanmead et al., 1996; Karipot et al., 2006)

A disponibilidade de medições de alta qualidade tanto de fluxos superficiais quanto de perfis médios na atmosfera é um fator importante para o desenvolvimento de relações entre ambos na CLA. O sucesso destes métodos está igualmente ligado à capacidade de parametrizar corretamente os fluxos de entranhamento no topo da CLA. A essência desse tipo de parametrização para o fluxo de calor sensível é bem conhecida (Tennekes, 1973; Deardorff, 1974; Zilitinkevich e Deardorff, 1974): um volume considerável de esforço já foi realizado para compreender o fluxo de entranhamento de calor sensível, com um volume menor de pesquisas associadas aos fluxos de H_2O e CO_2 (por exemplo, Kustas e Brutsaert, 1987; Górska et al., 2008). O interesse no problema, entretanto, permanece grande, refletindo não só sua dificuldade como a importância de estudar melhor os fluxos de entranhamento de gases de efeito estufa e VOC's.

A melhor compreensão da dinâmica da CLA tem consequências ambientais amplas. Além dos métodos que ela proporciona para a estimativa de fluxos superficiais, numerosos fenômenos associados à qualidade do ar estão diretamente relacionados a ela, incluindo a presença de camadas residuais e o consequente retorno de poluentes atmosféricos à superfície sempre que as mesmas se unem à camada superficial (Fochesatto et al., 2001; Freire e Dias, 2013, submetido). Estudos em curso em nosso grupo incluem a análise do sinal da camada residual sobre picos noturnos de O_3 na cidade de Curitiba.

5 Metodologia

5.1 Extensão das análises de similaridade entre escalares para novos conjuntos de dados

Pretendemos estender as análises realizadas por [Cancelli et al. \(2012a\)](#) para diversos conjuntos de dados “brutos” (ou em “alta frequência”) disponíveis, medidos por nosso grupo.

Uma atividade em andamento é a análise de um período relativamente longo, de 60 dias de medição contínua de fluxos turbulentos de calor sensível e latente no lago de Furnas. Durante esse período, dados de alta qualidade de temperatura da água e de umidade e temperatura do ar média foram medidos concomitantemente, o que nos permite avaliar a validade do conceito de razão de Bowen (estimada pelos gradientes de temperatura e umidade), e de diversas teorias para os coeficientes de transferência de massa e de calor entre a superfície da água e da atmosfera. Nessas análises, o foco é a verificação da capacidade de previsão do grau de conformidade à TSMO com os números de fluxo de superfície introduzidos por [Cancelli et al. \(2012a\)](#),

$$Sf_c \equiv \frac{\overline{wc} z}{\nu_c \Delta C}, \quad (1)$$

onde $C = \overline{C} + c$ é a separação de Reynolds para o escalar cuja concentração é C , ν_c é a difusividade molecular do escalar no ar, e z é a altura sobre a superfície líquida, e ΔC é a diferença de concentração entre a superfície da água e o nível de medição dentro da subcamada superficial. Prevemos estudar as relações entre Sf_θ , Sf_q e $Sf_{\theta q} \equiv \sqrt{Sf_\theta Sf_q}$ e diversos indicadores tradicionais de similaridade, tais como a razão de Bowen de gradiente, a razão entre os desvios-padrão σ_θ/σ_q e a eficiência de transferência simétrica ste . Esta última é definida por

$$ste_{\theta q} \equiv 1 - \frac{||r_{w\theta}| - |r_{wq}||}{|r_{w\theta}| + |r_{wq}|} \quad (2)$$

onde r_{wc} é o coeficiente de correlação entre flutuação de velocidade vertical w e o escalar (cuja flutuação de concentração é) c .

Uma segunda atividade a ser desenvolvida (provavelmente com novos alunos de pós-graduação admitidos ao longo do período de duração da bolsa de pesquisa) será o mesmo tipo de análise para os dados que estão sendo atualmente medidos no lago de Itaipu. Isso permitirá o cálculo de Sf e ste também para os casos CO_2 -temperatura e CO_2 - H_2O . Esse conjunto de dados inclui medições cuidadosas da temperatura da superfície da água com um termistor flutuante cuidadosamente colocado na superfície e protegido de radiação solar, gradientes da concentração de CO_2 na torre micrometeorológica onde são realizadas as medições, e todos os dados brutos de dados coletados a 20 Hz ([Dias et al., 2013](#)). Portanto, também serão estudadas a validade da conceito da razão de Bowen, e de modelos de transferência de massa baseados na TSMO para o fluxo de CO_2 . Além das análises brevemente esboçadas acima, todas as análises espectrais usuais também serão aplicadas.

5.2 Gases de efeito estufa em reservatórios

Além das análises de similaridade em si, para verificar a aplicabilidade da TSMO para o cálculo dos fluxos turbulentos de CO_2 no lago de Itaipu, aqui o nosso foco é o desenvolvimento de relações fluxo-gradiente confiáveis para esses fluxos (baseadas ou não na TSMO, em função das análises específicas sobre isso descritas acima) confiáveis que possam ser utilizadas em modelos matemáticos do ciclo de carbono em reservatórios.

A forma geral dos modelos de transferência de massa usados na modelagem das trocas gasosas água-ar é

$$F = \bar{\rho} \bar{U} C_{f12} (\bar{C}_1 - \bar{C}_2) \quad (3)$$

onde F é o fluxo do gás, C_{f12} é um coeficiente de transferência de massa, $\bar{\rho}$ é a massa específica do ar média, \bar{U} é a velocidade média do vento (em geral sobre um período de 30 minutos a uma hora, e medida dentro da subcamada superficial), e $\bar{C}_{1,2}$ são as concentrações médias do gás em 2 níveis. Conforme indicado na notação, o coeficiente de transferência C_{f12} depende dos dois níveis de medição. Os dois pontos importantes que serão investigados serão os seguintes:

Novas parametrizações para C_{f12} . Se a TSMO não se aplicar para o escalar em questão (como é o caso da temperatura no lago de Furnas em muitas situações, conforme comentado acima), então as bases teóricas para a formulação de C_{f12} precisam ser revistas. O próprio número de fluxo Sf_c , definido em (1), é pouco útil pois ele depende do conhecimento do próprio fluxo superficial $F = \bar{\rho} \bar{w} \bar{c}$. Portanto, pretendemos desenvolver novas formas de estimar C_{f12} que funcionem em condições nas quais as parametrizações clássicas falham. Inevitavelmente, as tentativas iniciais serão fortemente empíricas, como acontece frequentemente em Engenharia. No entanto, já há elementos que sugerem que à medida em que os termos de transporte se tornam importantes *vis-à-vis* a produção por interação fluxo-gradiente nas equações de balanço, a parametrização da turbulência deixa de seguir a similaridade de Monin-Obukhov e passa a ser (também, ou exclusivamente) melhor organizada utilizando parâmetros associados à altura da CLA e aos fluxos de entranhamento (Cancelli et al., 2013). Na verdade, em diferentes roupagens este fato é conhecido há bastante tempo para a variância da velocidade horizontal (Garratt, 1994; Wyngaard, 1990; Chamecki e Dias, 2004). Interessantemente, este fato sugere que a variância das flutuações de velocidade horizontal, σ_u^2 , deverá desempenhar um papel importante nas novas parametrizações.

Medições de concentração de gases de efeito estufa na água próximo da superfície. Em geral usa-se como um dos níveis de medição de concentração do gás em (3) a própria superfície da água: $z_1 = 0$. Isso faz sentido para a temperatura (pois ela pode ser medida radiometricamente, ou com termômetros em flutuadores) e para o vapor d'água devido à hipótese de que o ar em contato com a água está saturado, de modo que a umidade específica na superfície pode ser calculada com as relações de pressão de saturação de vapor d'água no ar. No entanto, no caso de gases de efeito estufa, em regra as medições de concentração “na superfície” na verdade são feitas a alguns centímetros abaixo desta devido a questões práticas relacionadas ou com a coleta de amostras em frascos, ou com a utilização de sensores cujo tamanho pode ser razoável. Portanto, faz mais sentido tomar z_1 da ordem de -20 cm nesses casos. Evidentemente, a parametrização

do coeficiente de transferência Cf_{12} precisa levar esse fato, bem como a física associada, em consideração. Isso será feito utilizando as teorias existentes, e em desenvolvimento em nosso grupo, para a subcamada interfacial aquática.

As primeiras análises de trocas gasosas água-ar basearam-se na teoria do filme duplo (Lewis e Whitman, 1924). Ela foi gradualmente superada pela teoria de renovação superficial de Dankwerts (Dankwerts, 1951). Foi essa teoria, adicionada à parametrização dos tempos de contato de pequenos vórtices com a superfície, entre os elementos de rugosidade da mesma, que foi utilizada para o desenvolvimento da parametrização de Cf_{12} proposta por Brutsaert (Brutsaert, 1965, 1975b,a). Esta última tem sido a base da grande maioria das parametrizações de Cf_{12} usadas em micrometeorologia (Hignett, 1994; Cahill et al., 1997; De Ridder, 2006). Sobre superfícies líquidas, entretanto, novos resultados indicam a necessidade de aperfeiçoar a teoria. Por exemplo, Liu e Businger (1975) desenvolveram um modelo para a subcamada interfacial aquática, e Liu et al. (1979) utilizaram a mesma parametrização para o tempo de contato proposta por Brutsaert (1975b). No entanto, Soloviev e Schlüssel (1994) apresentaram parametrizações diferentes do tempo de contato para várias faixas de vento.

Pretendemos estender as parametrizações do tipo proposto por Soloviev e Schlüssel (1994) para os gases de efeito estufa, CO_2 e CH_4 . Os modelos resultantes serão incorporados às parametrizações de Cf_{12} mencionadas no parágrafo anterior, em função da intensidade dos fluxos e da aplicabilidade, ou não, das fórmulas clássicas associadas à TSMO. Este trabalho contempla essencialmente a inclusão de mais uma subcamada ao modelo de Brutsaert (1975b): além da subcamada interfacial no ar e da subcamada superficial, será necessário incluir (e modelar adequadamente) a subcamada interfacial aquática.

5.3 A subcamada rugosa em florestas

Com o objetivo de melhorar nossa compreensão da turbulência na subcamada rugosa sobre florestas, pretendemos aprofundar a análise das relações de variância de Dias et al. (2009) e Dias e Chor (2012) para um estudo detalhado das diversas escalas envolvidas. Em particular, é importante entender em que frequências ocorre a não-conformidade dos espectros e dos coespectros à TSMO. Quando os espectros da turbulência obedecem à TSMO, o pico do coespectro adimensional entre duas flutuações a , b é uma função da variável de estabilidade de Obukhov:

$$\max_n \left\{ \frac{n Co_{ab}(n)}{\overline{ab}} \right\} = f(\zeta), \quad (4)$$

onde n é a frequência, $Co_{ab}(n)$ é o coespectro entre a e b , e \overline{ab} é a sua covariância, e ζ é a variável de estabilidade de Obukhov. Frequentemente, ocorrem situações “mistas” em que a faixa inercial segue a TSMO (ou seja: devidamente adimensionalizados, todos os coespectros colapsam em uma mesma curva (Kaimal et al., 1972; Kaimal, 1973), mas as frequências mais baixas não. Esse foi por exemplo o comportamento observado por Cancelli et al. (2012a) para os coespectros da velocidade vertical com a temperatura e a umidade em condições de falha da TSMO.

Consequentemente, é importante analisar especificamente se, e em que faixas de frequências, os espectros e coespectros de escalares podem ser organizados em função

de ζ dentro da subcamada rugosa. Note que não é necessário que as funções de similaridade sejam iguais às da subcamada superficial: as teorias existentes para a subcamada rugosa em geral *estendem* ou *modificam* essas relações na subcamada rugosa.

A análise por escala e sua conexão tanto com ζ com com outras variáveis que “organizem” as estatísticas da turbulência na subcamada rugosa é fundamental aqui, e tanto quanto seja do conhecimento do proponente tal análise detalhada para os espectros ainda não foi feita. Ela permitirá identificar as escalas onde há ou não conformidade com a variável de estabilidade de Obukhov, e indicará alternativas de modelagem: frequentemente, esse tipo de estudo permite identificar os principais mecanismos de produção e transporte de turbulência, e consequentemente indicar as parametrizações mais adequadas (Ohtaki, 1985; Cava e Katul, 2012).

Dentro do escopo dessa análise pretendemos também estudar a questão mais geral da fase entre a velocidade vertical e os escalares. Virtualmente todos os modelos utilizados em micrometeorologia supõem que o espectro cruzado entre a velocidade vertical w e um escalar c é da forma

$$S_{wc}(n) = Co_{wc}(n) - iQu_{wc}(n) \quad (5)$$

onde $i = \sqrt{-1}$, e a função de quadratura $Qu_{wc}(n)$ é identicamente nula. Não existem entretanto justificativas analíticas para isso baseadas nas equações de Navier-Stokes. A dinâmica espectral que afeta essas funções será analisada, na linha de Moraes e Epstein (1987), Dias e Brutsaert (1998), Chamecki e Dias (2004) e Cava e Katul (2012). É simples mostrar que (5) é equivalente a postular que a função de covariância cruzada entre w e c é par. Portanto, é possível testar estatisticamente essa hipótese utilizando barras de erro seja no espectro de quadratura amostral, seja na função de covariância cruzada. A metodologia de cálculo de erros proposta por Salesky et al. (2012) pode ser estendida para este caso com relativa facilidade, e será utilizada. Observamos também que o tema está associado ao efeito da separação espacial dos sensores sobre o cálculo dos fluxos turbulentos (Cava e Katul, 2012; Crivellaro et al., 2013).

5.4 Fluxos superficiais estimados a partir de perfis médios na CLA

Conforme mencionado na subseção 4.4, os temas “modelos de crescimento da CLA”, “fluxos superficiais”, e “fluxos de entranhamento”, estão intimamente relacionados. Alguns métodos atualmente utilizados para estimar fluxos de entranhamento incluem:

- 1) Métodos de balanço, em que o fluxo de entranhamento é o resíduo do balanço envolvendo fluxos superficiais medidos e perfis médios também medidos, ao longo do tempo, na CLA.
- 2) Simulações de grandes vórtices que permitem o cálculo explícito dos fluxos de entranhamento a partir dos campos resolvidos de velocidade e concentração do escalar.
- 3) Medições diretas no topo da CLA, em geral com aeronaves.

Métodos de balanço para os fluxos de entranhamento usam alguma forma de equação de balanço, por exemplo a equação lagrangeana de conservação de escalar (Deanmead et al., 1996),

$$F_s = h \frac{d}{dt} \langle \bar{C} \rangle - (\bar{C}_+ - \langle \bar{C} \rangle) \left(\frac{dh}{dt} - \bar{W}_+ \right), \quad (6)$$

ou sua contrapartida euleriana,

$$F_s - F_e = \frac{d}{dt} [hC]. \quad (7)$$

Em (6), $\langle \cdot \rangle$ é uma média vertical da concentração do escalar em z entre 0 e h (a altura da CLA); \overline{C}_+ é a concentração do escalar no ar entranhado a partir da atmosfera livre, e \overline{W}_+ é a velocidade vertical na zona de entranhamento, ou subsidência.

Em (7), o fluxo de entranhamento F_e comparece explicitamente. As equações (6) e (7) não diferem muito na prática, e existe uma troca conceitual entre a estimativa da velocidade de subsidência e a medição direta do fluxo superficial (uma ou outra, mas não ambas, são possíveis). Na prática a abordagem usual é tentar progredir na modelagem da velocidade de subsidência e dos fluxos de entranhamento a partir de dados de alta qualidade de medições simultâneas de fluxos superficiais e de perfis na CLA e/ou de simulações de grandes vórtices na CLA. Em seguida, esses modelos são geralmente testados agora em modo de previsão dos fluxos superficiais.

Métodos de balanço na CLA são uma alternativa interessante que pode produzir formas alternativas de estimativa dos fluxos superficiais principalmente quando é muito difícil medir os mesmos com os métodos micrometeorológicos usuais (medição de covariâncias turbulentas).

A idéia tem sido amplamente testada em diversas versões, por exemplo por [Deanmead et al. \(1996\)](#) tanto para a CLA convectiva diurna quanto para condições noturnas estáveis; para a camada-limite noturna por [Mathieu et al. \(2005\)](#); e por [Helliker et al. \(2004\)](#) para fluxos diurnos de CO_2 . Conceitos similares podem ser encontrados em [Hipps et al. \(1994\)](#), [Mecikalski et al. \(1997\)](#) e [Gryning e Batchvarova \(1999\)](#).

Já que a evolução da CLA convectiva é relativamente bem conhecida e pode ser simulada com sucesso usando modelos simples de ordem zero ou um (dependendo do perfil simplificado do escalar utilizado ([Dias et al., 2012b](#); [Huang et al., 2011](#); [Freire, 2012](#); [Freire e Dias, 2013](#))), nós pretendemos utilizar esses modelos de forma inversa para o cálculo de fluxos superficiais sobre a floresta, desde que haja dados adequados resultantes dos projetos ATTO e *GoAmazon*.

6 Conclusões

Esta proposta pretende contribuir de forma integrada para o avanço da capacidade de medição de fluxos de escalares — em particular CO_2 e CH_4 , e VOCs, — em superfícies líquidas de lagos e na subcamada rugosa acima de florestas, assim como para a compreensão da física da turbulência subjacente. Ela se insere dentro de uma ampla linha de pesquisa do proponente em Meteorologia da Camada-Limite Atmosférica, Interações Ecológicas e Hidrológicas com a Superfície, e Qualidade do Ar.

As análises e estudos previstos incluem a continuação das atividades do [Lemma/UFP](#) de monitoramento de fluxos superficiais com o MCTA, o processamento desses dados, e a construção de novos modelos para parametrizar o transporte turbulento de *momentum* e de escalares na atmosfera, com numerosas aplicações em Engenharia Ambiental, incluindo-se problemas de recursos hídricos, de dispersão de poluentes e de impactos de uso dos recursos naturais (desmatamentos, represamento de rios, etc.) sobre o aquecimento global.

Esta proposta integra harmonicamente as pesquisas do proponente e as atividades de pesquisa de graduação e pós-graduação por ele orientadas. As colaborações e as parcerias nacionais e internacionais que vêm sendo estabelecidas pelo proponente também contribuem para a sua viabilidade.

As informações sobre as atividades didáticas e de pesquisa do proponente são frequentemente atualizadas na sua página institucional: http://www.lemma.ufpr.br/wiki/index.php/Prof._Nelson_Luís_Dias.

7 Cronograma

Atividades↓	Trimestres→	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Revisão bibliográfica e detalhamento da metodologia.		■	■	■									
Análises de espectros cruzados w, c e θ, q na subcamada rugosa		■	■	■	■								
Balanços de GEE e VOCs na CLA		■	■	■	■	■	■	■	■	■			
Análises de similaridade, no lago de Furnas				■	■	■	■	■					
Análises de similaridade e Fluxos de CO ₂ no lago de Itaipu						■	■	■	■	■	■		
Subcamada interfacial aquática e modelos de transferência de massa						■	■	■	■	■	■		
Relatório Final.												■	■

Referências

- Andreas, E. L., Hill, R. J., Gosz, J. R., Moore, D. I., Otto, W. D., e Sarma, A. D. (1998). Statistics of surface-layer turbulence over terrain with metre-scale heterogeneity. *Boundary-Layer Meteorol.*, 86(3):379–408.
- Armani, F., de Carvalho, R. A., e Dias, N. L. (2013). Statistical evaluation of a new air dispersion model against AERMOD using the Praire Grass data set (submetido). *Journal of the Air & Waste Management Association*.
- Asanuma, J. e Brutsaert, W. (1999a). The effect of chessboard variability of the surface fluxes on the aggregated turbulence fields in a convective atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 91:37–50.
- Asanuma, J. e Brutsaert, W. (1999b). 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.
- Bernardes, M. e Dias, N. L. (2005). Comparação dos métodos de obtenção da velocidade de atrito a partir de dados de turbulência. *Revista Ciência e Natura — IV Workshop Brasileiro de Micrometeorologia*, Edição Especial:221–224.
- Bernardes, M. e Dias, N. L. (2010). The alignment of the mean wind and stress vectors in the unstable surface layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 134:41–59.
- Bertela, M. (1989). Inconsistent flux partitioning by the Bowen ratio method. *Boundary-Layer Meteorol.*, 49:149–167.
- Brutsaert, W. (1965). A Model for Evaporation as a Molecular Diffusion Process into a Turbulent Atmosphere. *J. of Geophys. Res.*, 70:5017–5024.
- Brutsaert, W. (1975a). The roughness length for water vapor, sensible heat and other scalars. *J. Atmos. Sci.*, 32:2028–2031.
- Brutsaert, W. (1975b). A Theory for Local Evaporation (or Heat Transfer) From Rough and Smooth Surfaces at Ground Level. *Water Resour. Res.*, 11:543–550.
- Brutsaert, W. (1999). Aspects of bulk atmospheric boundary layer similarity under free-convective conditions. *Reviews of Geophysics*, 37:439–451.
- Brutsaert, W. e Mawdsley, J. A. (1976). The Applicability of Planetary Boundary-Layer Theory to Calculate Regional Evapotranspiration. *Water Resour. Res.*, 12(5):852–858.
- Brutsaert, W. e Sugita, M. (1991). A bulk similarity approach in the atmospheric boundary layer using radiometric skin temperature to determine regional surface fluxes. *Boundary-Layer Meteorol.*, 51:1–23.
- Cahill, A. T., Parlange, M. B., e Albertson, J. (1997). On the Brutsaert temperature roughness length model for sensible heat flux estimation. *Water Resour. Res.*, 33:2315–2324.
- Cancelli, D. M., Chamecki, M., e Dias, N. L. (2013). A large-eddy simulation study of scalar dissimilarity in the convective atmospheric boundary layer (submetido). *J. Atmos. Sci.*
- Cancelli, D. M. e Dias, N. L. (2013). BRevê: uma metodologia objetiva de cálculo de emissões para a frota de veículos brasileira (submetido). *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*.
- Cancelli, D. M., Dias, N. L., e Chamecki, M. (2012a). Dimensionless criteria for the production-dissipation equilibrium of scalar fluctuations and their implications for scalar similarity. *Water Resour. Res.*, 48:W10522.
- Cancelli, D. M., Dias, N. L., e Chamecki, M. (2012b). Dissimilarity between temperature-humidity in the atmospheric surface layer and implications for estimates of evaporation, Abstract B23E-0500. Em *AGU Fall Meeting, 2012, San Francisco*.

- Cava, D. e Katul, G. G. (2012). On the Scaling Laws of the Velocity-Scalar Cospectra in the Canopy Sublayer Above Tall Forests. *Boundary-Layer Meteorol.*, 145::351–367.
- Cava, D., Katul, G. G., Sempreviva, A. M., Giostra, U., e Scrimieri, A. (2008). On the Anomalous Behaviour of Scalar Flux-Variance Similarity Functions Within the Canopy Sub-layer of a Dense Alpine Forest. *Boundary-Layer Meteorol.*, 128(1):33–57.
- Cellier, P. e Brunet, Y. (1992). Flux-gradient relationships above tall plant canopies. *Agric For Meteorol*, 58:93–117.
- Chamecki, M. e Dias, N. L. (2004). The local isotropy assumption and the turbulent kinetic energy dissipation rate in the atmospheric surface layer. *Q J Roy Meteorol Soc*, 130(603):2733–2752.
- Chor, T., Dias, N. L., e de Zarate, A. R. (2013a). An exact series and improved numerical and approximate solutions for the Boussinesq equation (submetido). *Water Resour. Res.*
- Chor, T., Dias, N. L., e de Zarate, A. R. (2013b). Solução em série da equação de Boussinesq para fluxo subterrâneo utilizando computação simbólica (submetido). Em *Anais, XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Chor, T. L. G. (2011). Medição da velocidade vetorial do vento a bordo de um veículo aéreo não tripulado. Trabalho de conclusão de curso, Curso de Engenharia Ambiental, UFPR.
- Cole, J. J., Bade, D. L., Bastviken, D., Pace, M. L., e de Bogert, M. V. (2010). Multiple approaches to estimating air-water gas exchange in small lakes. *Limnology and Oceanography: Methods*, 8:285–293.
- Crivellaro, B. L., Dias, N. L., e Chor, T. (2013). Spectral Effects on Scalar Correlations and Fluxes. *American Journal of Environmental Engineering*, 3:3–17.
- Dankwerts, P. (1951). Significance of Liquid-Film Coefficients in Gas Absorption. *Engineering and Process Development*, 43:1460–1467.
- de Bruin, H. A. R., Kohsiek, W., e van der Hurk, J. J. M. (1993). A verification of some methods to determine the fluxes of momentum, sensible heat and water vapor using standard deviation and structure parameter of scalar meteorological quantities. *Boundary-Layer Meteorol.*, 63:231–257.
- de Jong, R. (2011). A kinematics-based model for airborne wind measurements. Internship report, University of Twente.
- de Jong, R., Chor, T., e Dias, N. L. (2011). Medição da velocidade do vento a bordo de um Veículo Aéreo Não Tripulado. *Ciência e Natura*, Micrometeorologia (Edição Suplementar):71–74.
- De Ridder, K. (2006). Testing Brutsaert's temperature roughness parameterization for representing urban surfaces in atmospheric models. *Geophys. Res. Lett*, 33:L13403.

- Deanmead, O. T., Raupach, M. R., Dunin, F. X., Cleugh, H. A., e Leuning, R. (1996). Boundary layer budgets for regional estimates of scalar fluxes. *Glob Chang Biol*, 2:255–264.
- Deardorff, J. W. (1974). Three-dimensional numerical study of turbulence in an entraining mixed layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 7:199–226.
- Dias, N. L. (2013a). Reconciling radiation dissipation in the spatial and spectral domains under stable conditions. Aceito para publicação. *Water Resour. Res.*
- Dias, N. L. (2013b). Wilfried H. Brutsaert's research on turbulence in the Atmospheric Boundary Layer (submetido). *Water Resour. Res.*
- Dias, N. L., Bernardes, M., Nocko, H. F., e Reksidler, R. (2005). Influência de obstáculos aerodinâmicos na medição de variáveis micrometeorológicas : medições de velocidade de atrito no lago de Furnas. Em *CD-ROM, XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Dias, N. L. e Brutsaert, W. (1996). Similarity of scalars under stable conditions. *Boundary-Layer Meteorol.*, 80:355–373.
- Dias, N. L. e Brutsaert, W. (1998). Radiative effects on temperature in the stable surface layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 89(1):141–159.
- Dias, N. L., Cancelli, D. M., e Vissotto Jr., D. (2010). Directional analysis of over-lake water vapor and heat fluxes. Em *EOS Trans AGU 91(26) Meet. Am. Suppl.*, páginas Abstract H21A–01, Foz do Iguaçu, Brazil. American Geophysical Union.
- Dias, N. L., Chamecki, M., Kan, A., e Okawa, C. M. P. (2004). A study of spectra, structure and correlation functions and their implication on the stationarity of surface-layer turbulence. *Boundary-Layer Meteorol.*, 110:165–189.
- Dias, N. L. e Chor, T. L. G. (2012). A first look at scalar variance relations for the ATTO project. Em *ATTO workshop (IOP I), Manaus, 12-13 November 2012*.
- Dias, N. L., Crivellaro, B. L., Armani, F. S., Chor, T. L., Gobbi, M. F., e Santos, A. L. (2013). Abstract B32A-03. Short-term eddy-covariance measurements of CO₂ fluxes at Itaipu Lake, Brazil. Em *Meeting of the Americas, Cancún, 2013*.
- Dias, N. L., Gobbi, M. F., e Cunha, C. L. N. (2012a). *Estado da Arte em Ciclo do Carbono em Reservatórios (Jorge Machado Damázio, org.)*, volume 1, capítulo Abordagens Micrometeorológicas para a estimativa de fluxos de gases de efeito estufa entre a superfície e a atmosfera. 1 ed. Rio de Janeiro., páginas 192–237. CEPTEL.
- Dias, N. L., Gonçalves, J. E., Freire, L. S., Hasegawa, T., e Malheiros, A. L. (2012b). Obtaining Potential Virtual Temperature Profiles, Entrainment Fluxes, and Spectra from Mini Unmanned Aerial Vehicle Data. *Boundary-Layer Meteorol.*, 145:93–111.
- 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.

- Dias, N. L., Kan, A., Okawa, C. M. P., e Araújo, A. A. M. (1999). A study of structure functions and stationarity of 1st- and 2nd-order moments of turbulence in the surface layer. Em *Workshop on Physics of the Planetary Boundary Layer and Dispersion Process Modelling*, Santa Maria, RS.
- Duchemin, E., Lucotte, E., e Canuel, R. (1999). Comparison of static and thin boundary-layer equation methods for measuring greenhouse gas emissions from large water bodies. *Environ Sci Technol*, 33:350–357.
- ESTADO DO PARANÁ, Puglielli, A. T., Nowacki, A. C. B. A., Malheiros, A. L., e Silva, D. C., Arzua, L. S., e Dias, N. L. (2011). PLANO DE CONTROLE DE POLUIÇÃO VEICULAR – PCPV. Relatório técnico, Instituto Ambiental do Paraná.
- Fairall, C. W., Hare, J. E., Edson, J. B., e McGillis, W. (2000). Parameterization and micrometeorological measurement of air-sea gas transfer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 96:63–305.
- Fochesatto, G. J., Drobinski, P., Flamant, C., Guedalia, D., Sarrat, C., Flamant, P. H., e Pelon, J. (2001). Evidence of dynamical coupling between the residual layer and the developing convective boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 99:451–464.
- Foken, T. (2006). 50 Years of the MoninObukhov Similarity Theory. *Boundary-Layer Meteorol.*, 119(3):431 – 447.
- Freire, L. S. (2012). Teorias de camada-limite atmosférica: modelo de crescimento, fluxo de entranhamento e análise espectral. Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia (PPGMNE). UFPR.
- Freire, L. S. e Dias, N. L. (2013). Residual layer effects on the modeling of convective boundary layer growth rates with a slab model using FIFE data (submetido). *J. of Geophys. Res.*
- Garratt, J. (1994). *The atmospheric boundary layer*. Cambridge University Press, U.K. 316 pp.
- 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.
- Gryning, S.-E. e Batchvarova, E. (1999). Regional heat flux over the NOPEX area estimated from the evolution of the mixed-layer. *Agric. For. Meteorol.*, 98–99:159–167.
- Górska, M., de Arellano, J. V.-G., Lemone, M. A., e van Heerwaarden, C. C. (2008). Mean and flux horizontal variability of virtual potential temperature, moisture, and carbon dioxide: Aircraft observations and LES study. *Mon. Weather Rev.*, 136:4435–4451.
- 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.

- Helliker, B. R., Berry, J. A., Betts, A. K., Bakwin, P. S., Davis, K. J., Denning, A. S., Ehleringer, J. R., Miller, J. B., Butler, M. P., e Ricciuto, D. M. (2004). Estimates of net CO₂ flux by application of equilibrium boundary layer concepts to CO₂ and water vapor measurements from a tall tower. *J. of Geophys. Res.*, 109:D20106.
- Hignett, P. (1994). Roughness lengths for temperature and momentum over heterogeneous terrain. *Boundary-Layer Meteorol.*, 68(3):225–236.
- Hill, R. J. (1989). Implications of Monin-Obukhov similarity theory for scalar quantities. *J. Atmos. Sci.*, 46:2236–2244.
- Hipps, L. E., Swiatek, E., e Kustas (1994). Interactions between regional surface fluxes and the atmospheric boundary layer over a heterogeneous watershed. *Water Resour. Res.*, 30(5):1387–1392.
- Huang, J., Lee, X., e Patton, E. G. (2011). Entrainment and budgets of heat, water vapor, and carbon dioxide in a convective boundary layer driven by time-varying forcing. *J. of Geophys. Res.*, 116:D06308.
- Kaimal, J. C. (1973). Turbulence Spectra, Length Scales and Structure Parameters in the Stable Surface Layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 4:289–309.
- Kaimal, J. C., Wyngaard, J. C., Izumi, Y., e Coté, O. R. (1972). Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 98:563–589.
- Kanakidou, M., J. H. S., Pandis, S. N., Barnes, I., Dentener, F. J., Facchini, M. C., Dingenen, R. V., Ervens, B., Nenes, A., Nielsen, C. J., Swietlicki, E., Putaud, J. P., Balkanski, Y., Fuzzi, S., Horth, J., Moortgat, G. K., Winterhalter, R., Myhre, C. E. L., Tsigaridis, K., Vignati, E., Stephanou, E. G., e Wilson, J. (2005). Organic aerosol and global climate modelling: a review. *Atmos. Chem. Phys.*, 5:1053–1123.
- Karipot, A., Leclerc, M. Y., Zhang, G., Martin, T., Starr, G., Hollinger, D., McCaughey, J. H., e Hendrey, G. R. (2006). Nocturnal CO₂ exchange over a tall forest canopy associated with intermittent low-level jet activity. *Theoretical and Applied Climatology*, 85:243–248.
- Katul, G. e Parlange, M. B. (1994). On the active role of temperature in surface-layer turbulence. *J. Atmos. Sci.*, 51:2181–2195.
- Katul, G. G. e Hsieh, C.-I. (1999). A note on the flux-variance similarity relationships for heat and water vapour in the unstable atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 90:327–338.
- Katul, G. G., Sempreviva, A. M., e Cava, D. (2008). The temperature-humidity covariance in the marine surface layer: a one-dimensional analytical model. *Boundary-Layer Meteorol.*, 126:263–278.
- Kelman, J., Kelman, R., e Pereira, M. V. F. (2004). Energia Firme de Sistemas Hidrelétricos e Usos Múltiplos dos Recursos Hídricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 9(1):189–198.

- Kustas, W. P. e Brutsaert, W. (1987). Budgets of water vapor in the unstable boundary layer over rugged terrain. *J. Clim. and Appl. Meteorol.*, 26(5):607–620.
- Lamaud, E. e Irvine, M. (2006). Temperature- humidity dissimilarity and heat-to-water-vapour transport efficiency above and within a pine forest canopy: the role of the bowen ratio. *Boundary-Layer Meteorol.*, 120:87–109.
- Lewis, W. K. e Whitman, W. G. (1924). Principles of Gas Transfer Absorption. *Industrial and Engineering Chemistry*, 16:1215–1237.
- Li, D., Bou-Zeid, E., e De Bruin, H. A. R. (2011). Monin-Obukhov Similarity Functions for the Structure Parameters of Temperature and Relative Humidity. *Boundary-Layer Meteorol.*
- Liu, W. T. e Businger, J. (1975). Temperature profile in the molecular sublayer near the interface of a fluid in turbulent motion. *Geophys. Res. Lett.*, 2:403–404.
- Liu, W. T., Katsaros, K. B., e Businger, J. A. (1979). Bulk Parameterization of the Air-Sea Exchange of Heat and Water Vapor Including the Molecular Constraints at the Interface. *J. Atmos. Sci.*, 36:1722–1735.
- Mathieu, N., Strachan, I. B., Leclerc, M. Y., Karipot, A., e Pattey, E. (2005). Role of low-level jets and boundary-layer properties on the NBL budget technique. *Agric. For. Meteorol.*, 135:35–43.
- Mahrt, L. (1991). Boundary-layer moisture regimes. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 117:151–176.
- McGillis, W., Edson, J. B., Hare, J. E., e Fairall, C. W. (2001). Direct covariance air-sea CO₂ fluxes. *J. of Geophys. Res.*, 106:16729–16745.
- McNaughton, K. G. e Laubach, J. (1998). Unsteadiness as a cause of non-equality of eddy diffusivities for heat and vapour at the base of an advective inversion. *Boundary-Layer Meteorol.*, 88(3):479–504.
- Mecikalski, J. R., Diak, G. R., Norman, J. M., e Anderson, M. C. (1997). A method for estimating regional surface sensible heating using shelter-level air temperature and upper-air data. *Agric For Meteorol*, 88:101–110.
- Mendonça, R., Barros, N., Vidal, L. O., Pacheco, F., Kosten, S., e Roland, F. (2012). *Greenhouse Gas Emissions from Hydroelectric Reservoirs: What Knowledge Do We Have and What is Lacking?*, *Greenhouse Gases — Emission, Measurement and Management*, capítulo 3. InTech. ISBN: 978-953-51-0323-3.
- Monin, A. S. e Obukhov, A. M. (1954). Basic Laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere. *Trans. Geophys Inst. Akad. Nauk. URSS*, 151:163–187.
- Moraes, O. L. L. e Epstein, M. (1987). The velocity spectra in the stable surface layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 40:407–414.
- 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.

- Obukhov, A. M. (1971,1946). Turbulence in an atmosphere with non-uniform temperature. *Boundary-Layer Meteorol.*, 2:7–29.
- Ohtaki, E. (1985). On the similarity in atmospheric fluctuations of carbon dioxide, water vapor and temperature over vegetated fields. *Boundary-Layer Meteorol.*, 32:25–37.
- Richey, J. E., Melack, J. M., Aufdenkampe, A. K., Ballester, V. M., e Hess, L. L. (2002). Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂. *Nature*, 416:617–620.
- Rosa, L. P., dos Santos, M. A., Matvienko, B., Sikar, E., Lourenço, R. S. M., e Menezes, C. F. (2003). Biogenic gas production from major Amazon reservoirs, Brazil. *Hydrol Processes*, 17:1443–1450.
- Roth, M. e Oke, T. (1995). Relative efficiencies of turbulent transfer of heat, mass, and momentum over a patchy urban surface. *J. Atmos. Sci.*, 52:1863–1874.
- Rudd, J. W. M., Harris, R., Kelly, C. A., e Hecky, R. E. (1993). Are Hydroelectric Reservoirs Significant Sources of Greenhouse Gases? *Ambio*, 22:246–248.
- Salesky, S. T. e Chamecki, M. (2012). Random Errors in Turbulence Measurements in the Atmospheric Surface Layer: Implications for Monin-Obukhov Similarity Theory. *J. Atmos. Sci.*, 69:3700–3714.
- 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.
- Sempreviva, A. M. e Gryning, S.-E. (2000). Mixing height over water and its role on the correlation between temperature and humidity fluctuations in the unstable surface layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 97:273–291.
- Soloviev, A. V. e Schlüssel, P. (1994). Parameterization of the Cool Skin of the Ocean and Air-Ocean Gas Transfer On the Basis of Modelling Surface Renewal. *Journal of Physical Oceanography*, 24:1339–1347.
- Tennekes, H. (1973). A model for the dynamics of the inversion above a convective boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 30:558–567.
- Tennekes, H. e Lumley, J. L. (1972). *A first course in turbulence*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Vesala, T., Huotari, J., Ilar Rannik, Suni, T., Smolander, S., Sogachev, A., Launiainen, S., e Ojala, A. (2006). Eddy covariance measurements of carbon exchange and latent and sensible heat fluxes over a boreal lake for a full open-water period. *Journal of Geophysical Research*, 111.
- 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. (1990). Scalar Fluxes in the Planetary Boundary Layer - Theory, Modeling, and Measurement. *Boundary-Layer Meteorol.*, 50:49–75.
- Zilitinkevich, S. S. e Deardorff, J. W. (1974). Similarity theory for the planetary boundary layer of time-dependent height. *J. Atmos. Sci.*, 31:1449–1452.