

Relatório de Atividades do  
Projeto de Pesquisa de Mestrado

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA EVOLUÇÃO DIURNA DA CAMADA LIMITE  
PLANETÁRIA NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO USANDO MODELO  
LES: INVESTIGAÇÃO DO FLUXO TURBULENTO DE CALOR LATENTE**

Período: Março a Agosto de 2011

Aluno

**Rafael Valença**

Orientador

**Amauri Pereira de Oliveira**

Grupo de Micrometeorologia  
Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG/USP

Setembro de 2011

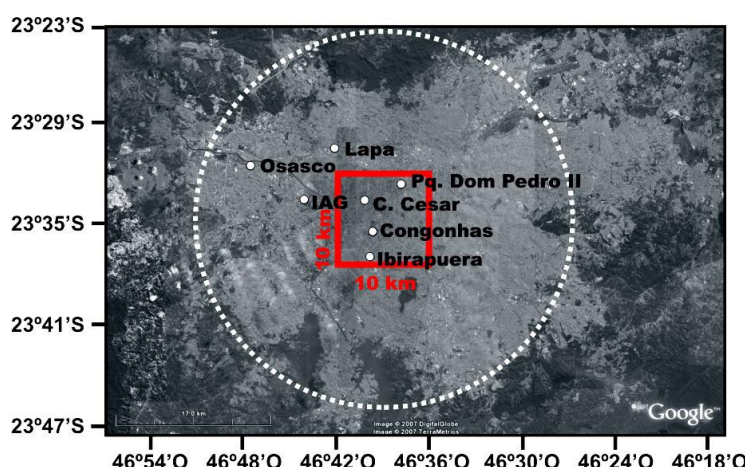
## RESUMO

Neste projeto, investiga-se o papel que o fluxo de calor latente desempenha na evolução da camada limite planetária na região metropolitana da cidade de São Paulo (RMSP). Para tanto, simulações do tipo LES (“*Large Eddy Simulations*”) serão feitas dos campos de vento, temperatura potencial e umidade específica. As características da RMSP serão consideradas através de condições iniciais e de fronteira baseadas em estudos observacionais da temperatura, vento e umidade específica em superfície. A superfície é considerada plana e homogênea, com parâmetro de rugosidade típico de regiões urbanas.

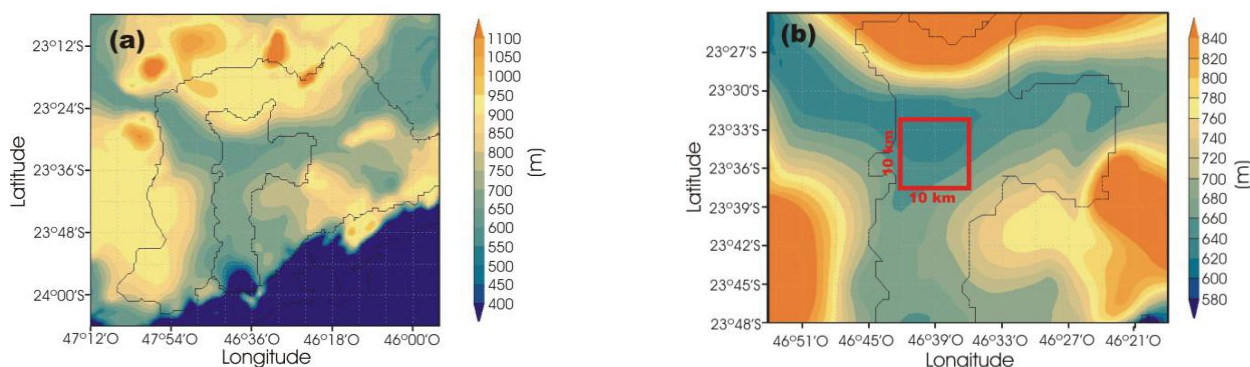
### 1. OBJETIVOS

O projeto tem como objetivo principal investigar o papel do fluxo de calor latente na superfície na evolução temporal e espacial da camada limite planetária sobre a região metropolitana da cidade de São Paulo utilizando um modelo LES. Ênfase especial será dada à simulação da evolução da umidade específica e do fluxo de calor latente associado. Assim, pretende-se verificar o impacto da ocupação do solo na evolução da estrutura dinâmica e termodinâmica da camada limite urbana.

A região a ser estudada é a área de 10 km por 10 km localizada em uma região central da mancha urbana da RMSP (Fig. 1 e 2). Esta área apresenta uma topografia relativamente plana em comparação com as demais. Além disso, existe uma quantidade significativa de dados das estações de superfície da CETESB que podem ser utilizados como testes de validação das simulações numéricas da CLU.



**Figura 1:** Mancha urbana da RMSP. O limite entre a área urbana e não urbana é indicado por um círculo branco tracejado. O domínio horizontal da grade a ser utilizada no modelo LES é indicado por um quadrado vermelho (Codato, 2008). Os nomes indicados nesta figura correspondem às estações de monitoramento ambiental da



**Figura 2:** Topografia da (a) RMSP e (b) área a ser simulada com o modelo LES (quadrado vermelho) de 10 km por 10 km (Codato, 2008).

## 2. RESUMO DAS ATIVIDADES REALIZADAS NO PERÍODO

O aluno concluiu 25 créditos e está cursando 10, perfazendo um total de 35 créditos (o equivalente a 76% dos créditos exigidos). O aluno foi aprovado, também, no exame de proficiência em língua inglesa exigido para a deposição da dissertação. Como atividade de pesquisa, uma primeira simulação de 24 horas com modelo LES foi realizada. Nessa simulação, propriedades importantes da CLP foram observadas, contudo, o papel dinâmico do vapor d'água não está sendo bem representado.

## 3. DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES REALIZADAS NO PERÍODO

Neste primeiro período de mestrado em meteorologia, iniciado em março de 2011 até a presente data, foram realizadas atividades acadêmicas e de pesquisa.

### 3.1. Atividades acadêmicas

Até o momento, o aluno concluiu 25 dos 46 créditos exigidos para o depósito da dissertação e está cursando mais 10. A tabela 1 abaixo relaciona as disciplinas cursadas e as que estão em andamento, bem como o conceito atingido pelo aluno. Além das disciplinas, o aluno foi aprovado no exame de proficiência em língua inglesa exigido pelo instituto.

**Tabela 1:** Disciplinas cursadas pelo aluno e respectivas menções obtidas. Conceitos: A – Excelente, com direito a crédito; B – Bom, com direito a crédito; C – Regular, com direito a crédito; R – Reprovado; T – Transferência. Um (1) crédito equivale a 15 horas de atividade programada.

Sigla	Nome da disciplina	Créditos	Conceito/Situação
AGM5713	Dinâmica da Atmosfera I	6	A
AGM5716	Termodinâmica da atmosfera	6	A
AGG5900	Preparação Pedagógica	1	A
AGM5822	Radiação Atmosférica I	6	A
AGM5706	Meteorologia Sinótica	6	B
AGM5804	Micrometeorologia	10	Cursando
AGM5801	Modelagem Numérica da Atmosfera	10	Cursando

### 3.2. Atividades de pesquisa

Uma primeira simulação com modelo LES de 24 horas foi realizada, utilizando parâmetros e condições de contorno típicas da região metropolitana da cidade de São Paulo (RMSP). A simulação foi realizada entre os dias 8 de julho e 4 de agosto de 2011.

Originalmente o modelo LES estava formatado para simular monóxido de carbono. Foram realizadas modificações nos arquivos de entrada para o modelo efetuar simulações da evolução da umidade específica.

Parte do resultado desse trabalho foi submetido como um artigo ao VII Workshop de Micrometeorologia (vide anexo, inclui uma cópia da primeira página do trabalho e uma cópia do aceite ou do e-mail indicando que o trabalho foi submetido).

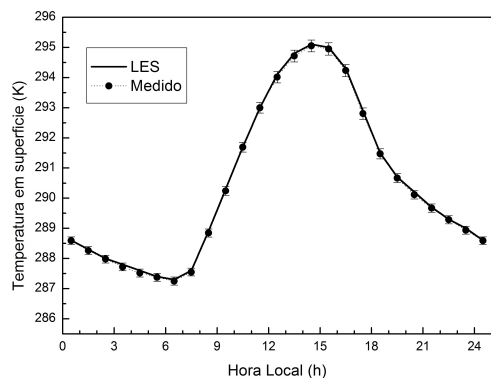
#### 3.2.1. Condições iniciais e de contorno

A ocupação do solo representativa da RMSP foi considerada horizontalmente homogênea e caracterizada por valores espacialmente constantes de parâmetro de rugosidade aerodinâmica igual a 0,1 m. A atual versão do modelo LES permite utilizar dois tipos de condição de contorno inferior: (a) fluxos verticais turbulentos de calor sensível e calor latente; (b) temperatura e umidade específica. Nesse trabalho serão utilizadas as condições de contorno do tipo b, onde os fluxos verticais turbulentos de calor sensível e latente serão estimados através da Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov, considerando a evolução temporal da temperatura e umidade específica observada durante o ciclo diurno completo de 24 horas.

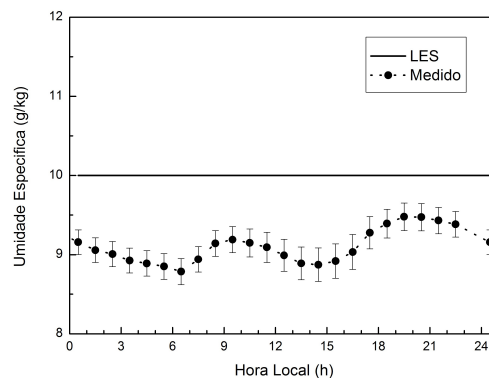
A forçante em superfície da temperatura potencial foi baseada nas médias de uma série de medidas realizadas na plataforma micrometeorológica do IAG/USP. As médias horárias de temperatura para o mês de junho encerram o período de 1997 a 2011 (Fig. 3). O mês de junho foi escolhido por ser um mês representativo das condições de inverno na cidade de São Paulo.

As médias horárias da umidade específica não estavam disponíveis quando do início da simulação. Portanto, assumimos um valor constante de umidade específica igual a 10g/kg para todo o período (Fig. 4).

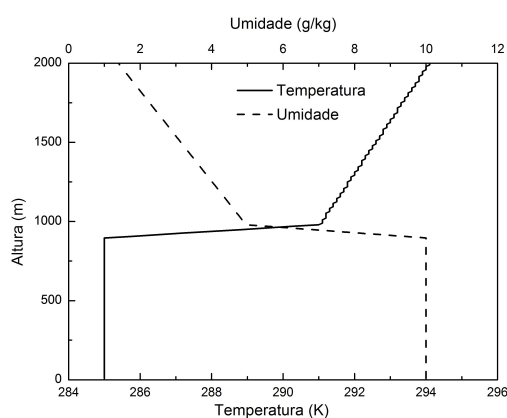
Os perfis iniciais correspondem às 8h30, em horário local (Fig. 5 e 6). A temperatura é inicializada à 285 K na superfície e apresenta uma camada de entranhamento, onde a temperatura aumenta 6 K em 8 níveis. Nestes mesmos 8 níveis, a umidade – que era de 10,0 g/kg próximo à superfície – diminui de 5,0 g/kg. Na atmosfera livre, o gradiente vertical de temperatura potencial é mantido constante e igual a 3,0 K/km e o gradiente vertical da umidade específica é de 3,5 K/km. O sistema é forçado por um vento geostrófico constante  $(U_g, V_g) = (5 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s})$ , como mostra a figura 6. A cidade de São Paulo se localiza na latitude de 23,34° S, com parâmetro de Coriolis  $f = -0,57 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , que foi o valor utilizado na simulação.



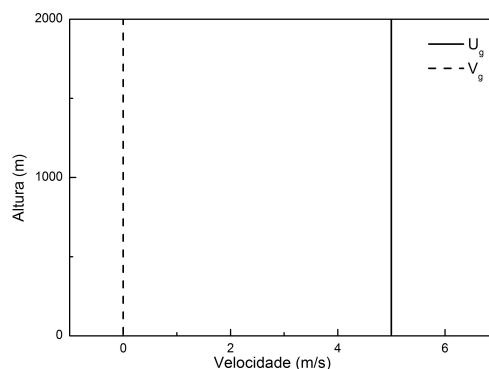
**Figura 3:** Evolução temporal da temperatura potencial usada como condição de contorno na superfície.



**Figura 4:** Evolução temporal da umidade específica usada como condição de contorno na superfície.



**Figura 5:** Perfis iniciais (8:30 LT) da temperatura potencial e da umidade específica.



**Figura 6:** Perfis horizontais das componentes do vento geostrofico inicial.

### 3.2.2. Características numéricas

Nesta primeira simulação, 26 arquivos de saída foram gerados. Cada um desses arquivos representa a simulação de 3600 segundos (1 hora), usando como condição inicial o arquivo anterior (técnica de *restart*). As médias estatísticas dos campos foram tiradas a cada 100 passos, cada um deles com intervalo constante de 1 segundo

A grade utilizada apresenta 192 pontos na vertical e  $96^2$  pontos na horizontal, todos igualmente espaçados e ocupado um volume de  $2 \times 5^2 \text{ km}^3$ . A altura inicial da camada limite planetária foi de 900 metros. Esse valor se ajusta rapidamente com o início da simulação.

As primeiras duas saídas da simulação foram desconsideradas em virtude de má especificação da forçante de temperatura, causando comportamento descontínuo no fluxo de calor sensível. Assim, obteve-se 24 horas de simulação com condições de contorno apropriadas.

### 3.3. Descrição do modelo LES

Os modelos LES atingiram uma alta resolução nos anos 90, com espaçamento de grade da ordem de 10 metros e número de pontos de grade da ordem de  $10^6$ . Diferentemente dos modelos de mesoescala, nos modelos de grandes turbilhões (“*Large Eddy simulation*”) a turbulência de grande escala é resolvida diretamente.

A grande vantagem dos modelos de média de volume é que, diferentemente dos modelos baseados na média de Reynolds, o problema de fechamento fica confinado à parte do espectro de turbulência localizada entre o subdomínio inercial e a região de dissipação molecular. Nesta região do espectro, os turbilhões apresentam características mais universais permitindo com isso o desenvolvimento de parametrizações com características mais gerais.

Apesar da vantagem discutida acima, os modelos do tipo LES têm algumas limitações relacionadas ao fechamento da escala não resolvida e as limitações impostas pela dimensão da grade. Esta última limitação é importante e requer um cuidado especial na escolha da resolução da grade, principalmente na CLS (Sullivan *et al.*, 1994; Mason e Brown, 1999; Pope, 2004).

Neste trabalho, uma versão paralelizada do modelo LES desenvolvida por Moeng (1984) e Sullivan *et al.*, (1994) será utilizado. Neste modelo, as equações do movimento são resolvidas numericamente utilizando um método pseudoespectral nas direções horizontais e um esquema de diferenças finitas de segunda ordem centrada no espaço na direção vertical. As derivadas temporais são discretizadas através do esquema de 2ª ordem Adams-Bashforth, estável para pequenos passos de tempo (Mesinger e Arakawa, 1982). A estabilidade numérica do sistema numérico é determinada através do cálculo do número de Courant em cada passo de tempo ( $\Delta t$ ). As condições de fronteira laterais no modelo são cíclicas e os fluxos turbulentos de momento na superfície são estimados pela teoria da similaridade de Monin-Obukhov. No topo da grade, a velocidade vertical e os gradientes verticais do vento e dos fluxos turbulentos de subgrade são nulos.

O modelo LES desenvolvido por Moeng (1984) e modificado por Sullivan *et al.* (1994) foi

implementado no CRAY-J90<sup>1</sup> do LCCA da USP a partir de 2000 (Marques Filho, 2004). Entre 2000 e 2003, essa versão do modelo permitiu simular a dispersão de fontes do tipo área, tipo pontual e para investigar a validade da hipótese de Taylor na CLP altamente convectiva (Marques Filho *et al.*, 2003; Marques Filho, 2004; Marques Filho *et al.*, 2005; Marques Filho e Oliveira, 2005; Marques Filho *et al.*, 2006). Todas as simulações com a versão serial do modelo LES ficaram restritas a períodos de no máximo 1 hora de evolução da CLP convectiva.

A partir de 2004, uma nova versão do modelo LES, com o código *paralelizado*, foi instalada no cluster HP-Compaq S45 do LCCA-USP, que permitiu uma redução significativa no tempo de simulação em relação ao CRAY SV1. Com a desativação em 2005 do Cluster HP-Compaq S45, esta versão foi instalada no cluster Intel Linux do LCCA-USP (oito nós). Este cluster permitiu realizar simulações numéricas da CLP convectiva de  $3600\Delta t$  e com  $128^3$  pontos de grade (distribuídos igualmente sobre um domínio de 10 km por 10 km na horizontal, e 2 km na vertical) em cerca de 100 horas de CPU. Em todas as simulações realizadas entre os anos de 2000 e 2008, os fluxos turbulentos de calor sensível e monóxido de carbono foram especificados como condição de fronteira inferior. (Codato *et al.*, 2007; Codato *et al.*, 2008b; Codato, 2008).

No início de 2009 uma nova versão do modelo LES que permite forçar a evolução da CLP através da temperatura foi cedida pelo professor Umberto Rizza. (Rizza *et al.*, 2007; Puhales, 2008). Esta nova versão foi implementada na servidora R900 Intel 2-quad (8 nós) 12Gb de memória e 1.2 Tb de HD, adquirida através do projeto CNPq (Proc. No. 476807/2007-7). Este computador permite executar o modelo LES utilizando 8 nós em processamento paralelo. Além da velocidade no processamento, esse novo computador é utilizado exclusivamente para as execuções do modelo LES, permitindo enfim efetuar-se modificações no código e ainda executar simulações para o período estável, (Bárbaro *et al.*, 2009).

A atual versão do modelo LES, que será utilizada nesta pesquisa, contém um módulo de análise estatísticas dos campos 3D simulados *online*, que permite gerar campos médios e momentos estatísticos

---

<sup>1</sup> CRAY SV1 a partir de 2003.

de segundo ordem e as componentes do balanço de ECT. Este módulo foi implementado por Bárbaro (2010) e permite a análise em tempo real das características mais importantes da CLP.

### **3.4. Resultados**

#### **3.4.1. Altura da CLP**

Segundo a definição de Stull (1989), a camada limite planetária é a porção da troposfera diretamente influenciada pela superfície, respondendo às forçantes superficiais em escalas de tempo de uma hora ou menos. Assim sendo, podemos dizer que a CLP é a porção da troposfera onde os fluxos turbulentos não podem ser desprezados por serem mecanismos importantes de mistura de momento, energia e umidade. Existem diversas formas de estimar a altura da CLP. No modelo LES utilizado, a altura da camada limite é tida como o nível de máximo gradiente de temperatura (Bárbaro, 2010).

A evolução diurna da altura da CLP está representada na figura 7. A evolução após as 6h30 foi omitida por apresentar descontinuidades devido à transição do período estável para o convectivo. Tal transição ainda não foi implementada no modelo. A camada apresenta uma altura máxima de 1650 m durante o dia e chega a menos de 100 m à noite.

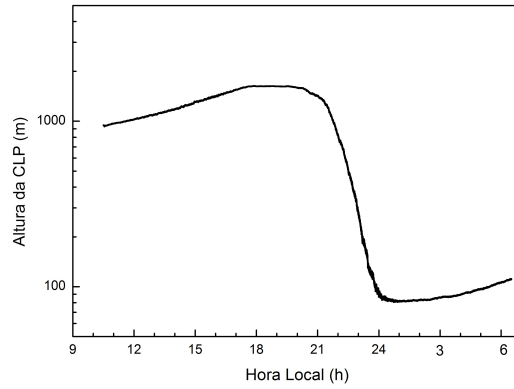
Não existem estimativas diretas da altura da CLP em São Paulo. No entanto, a análise dos perfis verticais do coeficiente de retroespalhamento do aerossol com LIDAR pode ser utilizada para estimar a altura da CLP (Landulfo *et al.*, 2007, 2010). A evolução diurna da CLP estimada pelo LIDAR do IPEN-USP, para o dia 01/07/2010, indica valores de 1200 metros durante o dia (9:51 HL) e 250 metros durante a noite (21:49 HL). Estimativas realizadas por Landulfo *et al.* (2010) para a RMSP no período de junho a julho indicam máximos na altura da CLP de 1000 a 2300 metros e mínimos de 50 a 300 metros. Estes valores mostram que os valores obtidos pela simulação com LES está compatível com o que é observado na RMSP.

#### **3.4.2. Parâmetros de superfície: fluxos turbulentos de calor sensível e latente**

As figuras 8 e 9 mostram a evolução diurna dos ciclos de calor sensível e latente modelados pelo LES. As covariâncias  $\overline{w'\theta'}$  e  $\overline{w'q'}$ , tidas como os fluxos turbulentos cinemáticos de calor sensível e latente, respectivamente, são calculados em tempo real pelo LES por um módulo estatístico implementado por Bárbaro (2010).

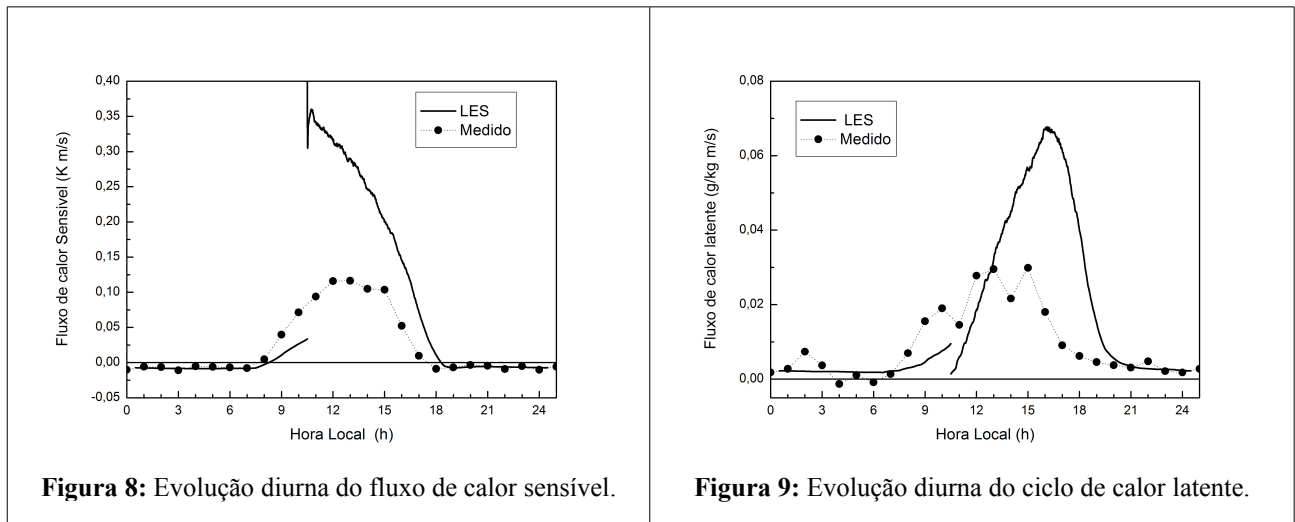
Nas figuras, também estão indicados valores medidos na estação micrometeorológica do IAG-USP (Ferreira, 2010). Os valores são médias horárias mensais para o mês de junho de 2009.





**Figura 7:** Evolução diurna da altura da CLP.

Os fluxos de calor sensível e latente estão superestimando o observado. Uma possível contribuição para isso é o fato de termos introduzido mais vapor no modelo do que o observado (figura 4). As discrepâncias também podem estar relacionadas com o efeito da brisa marítima.



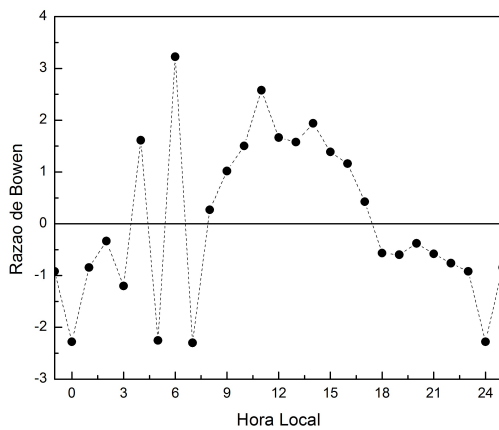
**Figura 8:** Evolução diurna do fluxo de calor sensível.

**Figura 9:** Evolução diurna do ciclo de calor latente.

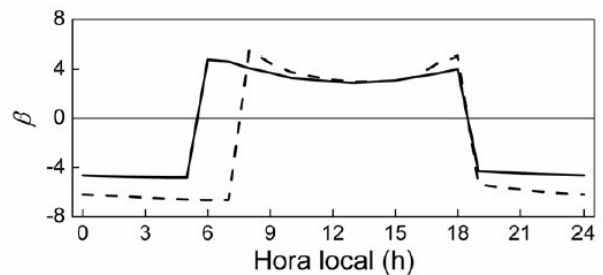
A razão de Bowen é tida como a razão entre o fluxo de calor sensível e o fluxo de calor latente, e é dada por:

$$\beta = \gamma \frac{\overline{w'\theta'_0}}{\overline{w'q'_0}}$$

onde  $\gamma = 0,4 \text{ K}^{-1} \text{ kg/g}$  e os fluxos são dados na superfície. A figura 10 mostra a evolução diurna da razão de Bowen. De forma geral, vemos que  $\beta$  é positivo durante o dia e negativo durante a noite, com valores entre  $-2,5$  a  $3,5$ . Esse perfil é compatível com o obtido por Ferreira (2010) (figura 11). Os valores negativos da razão de Bowen indicam que existe evaporação na CLP estável, o que pode ocorrer em regiões urbanas devido à baixa umidade.



**Figura 10:** Evolução diurna da razão de Bowen de acordo com os resultados do LES.



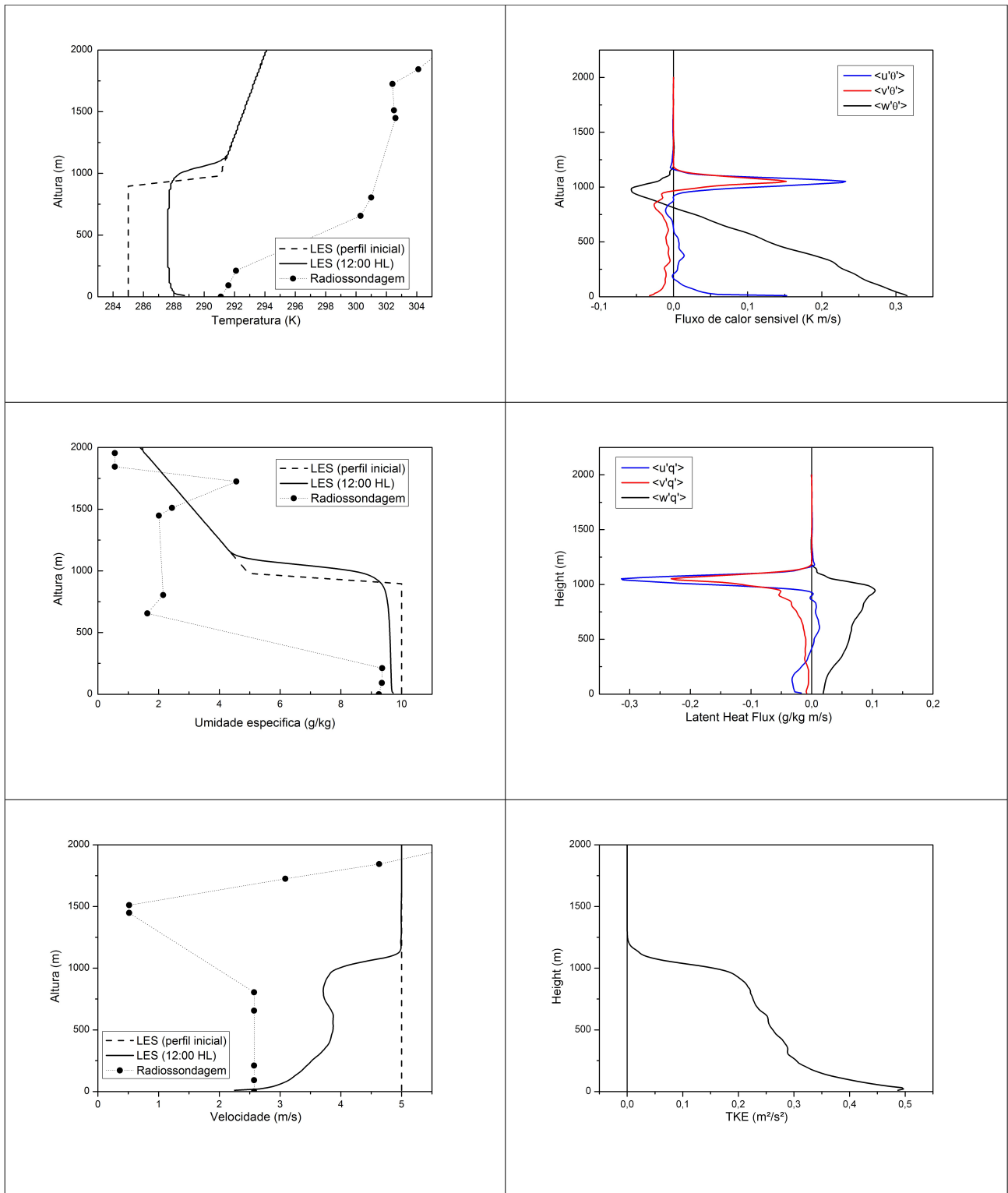
**Figura 11:** Variação diurna dos valores horários médios mensais da razão de Bowen em fevereiro (linha contínua) e agosto (linha tracejada) na cidade de São Paulo em 2004 (Ferreira, 2010).

### 3.4.3. Estrutura vertical

A figura 12 apresenta comparações entre o resultado do LES e uma radiossondagem típica do mês de junho em São Paulo (Campo de Marte), bem como os perfis verticais dos fluxos verticais associados. Os dados que melhor representam a estrutura vertical da radiossondagem são os de umidade específica. É de se esperar, contudo, que a radiossondagem de um dia específico não represente adequadamente as condições médias de temperatura, umidade e vento. Para que melhores comparações desse tipo venham a ser feitas nos próximos meses, pretende-se obter perfis médios mensais sobre a RMSP e comparar com os resultados do LES. Os dados para fazer essas médias foram cedidos pelo MASTER.

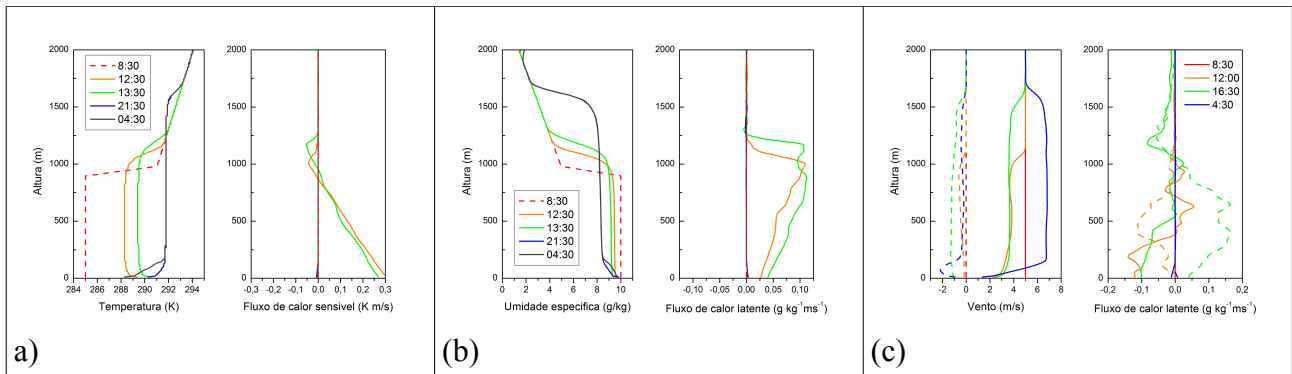
A evolução diurna dos perfil pode ser visto na figura 13. Em todas elas, é possível notar uma camada de mistura bem desenvolvida. Também é possível observar o crescimento da CLP durante o período convectivo e sua brusca diminuição no período convectivo. Os fluxos positivos na maior parte da CLP de calor sensível e latente estão compatíveis com o que seria esperado no regime convectivo e fluxos bem menos intensos são observados durante a noite, quando há destruição térmica na camada.

Um fator que pode intensificar a turbulência no período estável é a presença de jatos de baixos níveis (JBN). Esses jatos contribuem para a produção mecânica ao produzir um forte cisalhamento vertical.



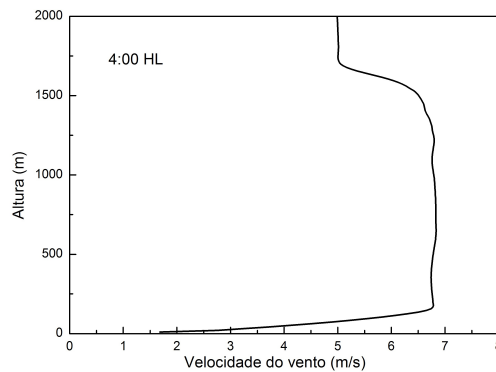
**Figura 12:** Radiossondagens do dia 01/06/2011 às 12:00 GMT realizadas em Campo de Marte, SP, comparadas com o perfil vertical resultante da simulação com LES (à esquerda); perfis verticais simulados pelo LES dos fluxos de energia sensível e latente e da energia cinética turbulenta ao meio-dia local (à direita).

O mecanismo mais frequente de formação dos JBN é o ajuste inercial, atingindo seu máximo no final do período estável nas latitudes em que o comprimento da noite é menor que o período inercial.



**Figura 13:** Evolução diurna dos perfis verticais de (a) temperatura potencial, (b) umidade específica e (c) componentes horizontais do vento. No gráfico (c), as retas sólidas dizem respeito a  $u$  e  $\overline{w'u'}$  e as retas tracejadas a  $v$  e  $\overline{w'v'}$ .

O perfil do vento às 4h30 gerado pelo LES indica presença de jatos de baixos níveis (Fig. 14).



**Figura 14:** Perfil vertical do vento às 4h30, indicando a presença de jatos de baixos níveis.

### 3.4.4. Umidade

A Fig. 15 mostra o perfil vertical da umidade específica às 4h30, horário local. Também foi estimado, de acordo com os valores de temperatura potencial do LES, o valor da razão de mistura de saturação. No gráfico, pode-se ver que a quantidade de vapor d'água está superestimada, uma vez que o modelo não considera a possibilidade de saturação. Seria interessante que, em simulações futuras, a quantidade adicional de vapor fosse retirada no modelo e convertida em calor latente liberado.

A temperatura potencial virtual de uma parcela não-saturada seria

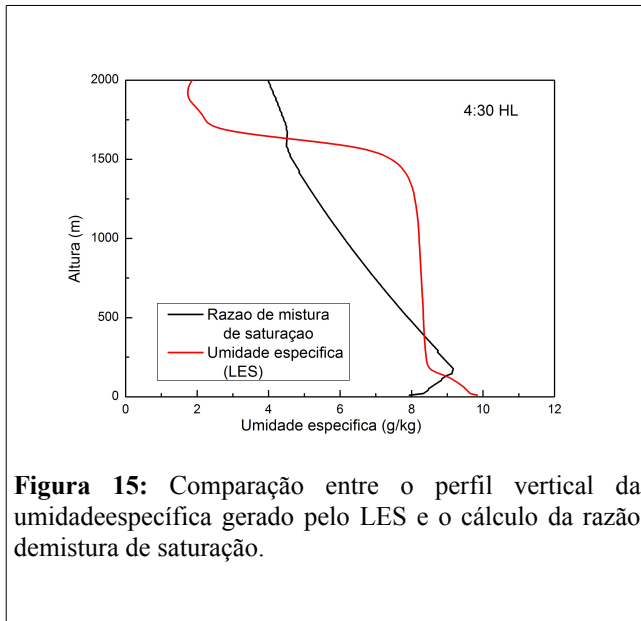
$$\theta_v \approx \theta (1 - 0,61 r). \quad (1)$$

Se saturada, teríamos

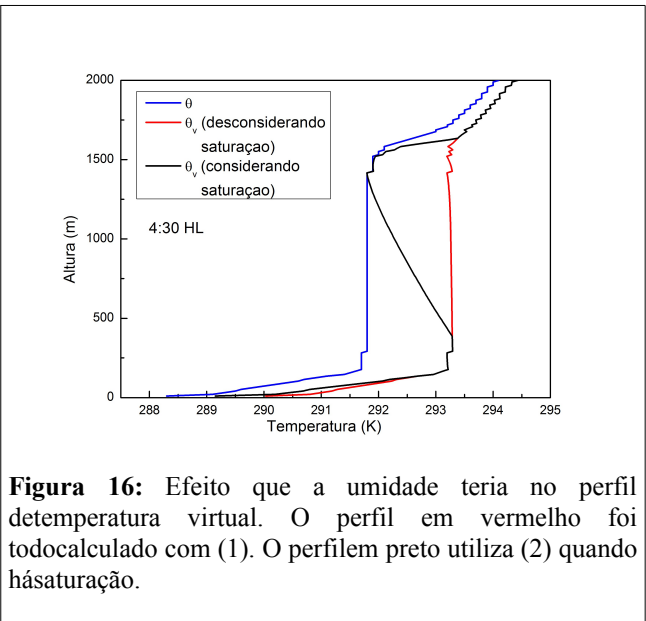
$$\theta_v \approx \theta (1 - 0,61 r_S - r_L). \quad (2)$$

Na figura 16, temos perfis de  $\theta$  e  $\theta_v$ , utilizado a umidade calculada pelo LES e assumindo

$$r_L = r - r_S.$$



**Figura 15:** Comparação entre o perfil vertical da umidade específica gerado pelo LES e o cálculo da razão de mistura de saturação.



**Figura 16:** Efeito que a umidade teria no perfil de temperatura virtual. O perfil em vermelho foi todo calculado com (1). O perfil em preto utiliza (2) quando há saturação.

### 3.4.5. Objetivos para as próximas simulações

Com o objetivo de obter simulações mais realistas e poder analisar melhor os resultados dos futuros experimentos, colocamos como metas:

- Implementar gradientes verticais de temperatura e umidade na camada superficial, abaixo da camada de mistura, nos perfis iniciais.
- Aplicar a condição de contorno mais realista para a umidade específica (Fig. 4).
- Obter médias mensais das radiossondagens de junho em São Paulo para comparar com o resultado da modelagem.
- Definir melhor o conjunto de dados que serão utilizados na comparação entre simulação e observação.
- Usando dados de radiossondagem é possível identificar a CLP fóssil ou noturna se for o caso.
- Incluir o efeito dinâmico da umidade no modelo LES.
- Modificar as condições de contorno de superfície e incluir equação prognostica de temperatura e umidade baseada em um método do balanço de energia na superfície.
- Efetuar validação do modelo utilizando o conjunto de simulações de Bárbaro (2010).

## 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bárbaro, E.W., 2010: Investigação da camada limite planetária noturna na região metropolitana de São Paulo utilizando o modelo LES. *Dissertação de Mestrado*. IAG-USP, SP, Brasil, 79 pp.

- Bárbaro, E., Oliveira, A. P., e Soares, J. (2009). Validation of a statistic algorithm applied to LES model - part i: First and second order statistics. *Revista Ciência e Natura - Micrometeorologia*, Especial:233-236.
- Bárbaro, W.E., Oliveira, A.P, Soares, J., Codato, G., Ferreira, M.J., Mlakar, P., Boznar, M.Z., Escobedo, F.J., 2010: Observational characterization of the downward atmospheric longwave radiation at the surface in the city of São Paulo. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 49(12), 2574-2590.
- Codato, G., 2008: Simulação numérica da evolução diurna do monóxido de carbono na camada limite planetária sobre a RMSP com modelo LES. *Dissertação de Mestrado. Departamento de Ciências Atmosféricas. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. São Paulo. SP. Brasil. 97 pp.*
- Codato, G., Oliveira, A.P., Soares, J., Escobedo, J.F., Gomes, E.N., and Pai, A.D., 2008a: Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast of Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 93 (1-2), 57-73.
- Codato, G., Oliveira, A.P., Soares, J., Marques Filho, E.P., and Rizza, U., 2008b: Investigation of carbon monoxide in the city of São Paulo using large eddy simulation. *Proceedings of 15<sup>th</sup> Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the A&WMA, 88<sup>th</sup> Annual Meeting*, 20-24 January 2008, New Orleans, LA (CDROM).
- Codato, G., Oliveira, A.P., Marques Filho, E.P., and Rizza, U., 2007: Large eddy simulation of carbon monoxide in the city of São Paulo. *Proceedings of the 11th International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, 2-5 July, Cambridge, UK, Vol. 2, pp. 358-362.
- Ferreira, M.J., 2010: Estudo do balanço de energia na superfície da cidade de São Paulo. *Tese de Doutorado. Departamento de Ciências Atmosféricas. IAG. USP. São Paulo. SP. Brasil., 149 pp.* (<http://www.iag.usp.br/meteo/labmicro/publicacoes/Teses&Dissertacoes/index.html>)

- Ferreira, M.J., Oliveira, A.P. and Soares, J., 2010: Anthropogenic heat in the city of São Paulo, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology* (DOI 10.1007/s00704-010-0322-7).
- Ferreira, M.J., Oliveira, A.P., Soares, J., Bárbaro, E.W., Codato, G., Marciotto, E.R. e Silva, M., 2007: Evolução Diurna do Balanço de Radiação na Superfície da Cidade de São Paulo, Brasil. *Anais do 8º Congresso iberoamericano de ingenieria mecanica, 2007*, Cusco - Peru. 8º Congresso iberoamericano de ingenieria mecanica, 2007 (CDROM).
- Landulfo, E., Lopes, F. J. S., Mariano, G. L., Torres, A. S., Jesus, W. C., Nakaema, W. M., Jorge, M. P. P. M., e Mariani, R. (2010). Study of the properties of aerosols and the air quality index using a backscatter lidar system and aeronet sunphotometer in the city of São Paulo, Brazil. *Journal of Air and Waste Manage Assoc.*, 60:386-392.
- Landulfo, E., Matos, C. A., Torres, A. S., Sawamura, P., e Uehara, S. (2007). Air quality assessment using a multi-instrument approach and air quality indexing in an urban area. *Atmospheric Research*, 85:98-111.
- Marques Filho, E. P. e Oliveira, A. P., 2005: Simulação numérica do transporte de poluentes na camada limite atmosférica. In: *Observar e pensar, antes de modelar*. Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada, São Carlos, São Paulo, 19, 15-44.
- Marques Filho, E. P., Oliveira, A. P., Karam, H. A. e Rizza, U., 2003: Simulação Numérica do Transporte de um Poluente Inerte e Passivo na CLP Convectiva através de um modelo LES. *Revista Ciência e Natura*, 1, 83-96.
- Marques Filho, E.P., 2004: Investigação da CLP convectiva com modelo LES aplicado à dispersão de poluentes. Tese de Doutorado, Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG-USP, 128 pp.
- Marques Filho, E.P., Oliveira, A.P., Rizza, U., e Pereira, M.M.R., 2005: Verificação da aplicação da Hipótese de Taylor em uma CLP em condições altamente convectivas. *Anais do IV Workshop Brasileiro de Micrometeorologia*, 14 a 16 de dezembro de 2005, Santa Maria, RG, Revista Ciência e Natura, Santa Maria, RG, Universidade Federal de Santa Maria, 339-342.
- Marques Filho, E.P., Oliveira, A.P., Karam, H.A., and Rizza, U., 2006: Pollutant transport in a convective boundary layer with LES. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(4): 547-557.

- Mason, P. J. e Brown, A. R. 1999: On subgrid models and filter operations in large-eddy simulations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56, 2101-2114.
- Mesinger, F. e Arakawa, A. 1982: *Numerical methods used in atmospheric models*. Garp Publications Series, 63 p.
- Moeng, C.A., 1984: Large-Eddy-Simulation Model for the Study of Planetary Boundary-Layer Turbulence. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41(13), 2052-2062.
- Moeng, C.H. e J.C. Wyngaard, 1988: Spectral analysis of large eddy simulation of the convective boundary layer, *J. Atm. Sci.*, 45, pp 3573-3587.
- Moeng, C-H. e Wyngaard, J. C. 1984: Statistics of conservative scalars in the convective boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41, 3161-3169.
- Oliveira, A.P., Bornstein, R., and Soares, J., 2003: Annual and diurnal wind patterns in the city of São Paulo. *Water, Air and Soil Pollution: FOCUS*, 3, 3-15.
- Oliveira, A.P., Escobedo, J.F., Machado, A.J. and Soares, J., 2002a: Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the City of São Paulo: seasonal variation and modeling. *Theoretical and Applied Climatology*, 71(3-4), 231-249.
- Oliveira, A.P., Escobedo, J.F., Machado, A.J. and Soares, J., 2002b: Correlation models of diffuse solar radiation applied to the City of São Paulo (Brazil). *Applied Energy*, 71(1), 59-73.
- Patton E.G., Sullivan P.P., And Moeng C.H., 2005: The Influence of Idealized Heterogeneity on Wet and Dry Planetary Boundary Layers Coupled to the Land Surface. *Journal of Applied Meteorology*, 62, 2078-2097.
- Pope, S. B 2004: Ten questions concerning the large-eddy simulation of turbulent flows. *New Journal of Physics*, 6 (35), 2-23.
- Puhales, F. (2008). Estudo do ciclo diario da camada limite planetaria atraves da simulação dos grandes turbilhões. Dissertação de Mestrado, UFSM.
- Rizza, U., Mangia, C. Miglietta, M., Moscatello, A., Carvalho, J., Degrazia, G., Puhales, F., e



Marques-Filho, E. (2007). LES modeling of a diurnal cycle. In Proceedings of V Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, pages 337-340.

Stull, R. B. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*, volume 79. Springer Press.

Su, H., Shaw, R.H., Paw U, K.T., Moeng, C.-H. and Sullivan, P.P., 1998: Turbulent Statistics of Neutrally Stratified Flow within and above a Sparse Forest from Large-Eddy Simulation and Field Observations. *Boundary-Layer Meteorology*, 88, 363-397.

Sullivan, P., McWilliams, J.C., Moeng, C.-H., 1994: A subgrid-scale model for large-eddy simulation of planetary boundary-layer flows. *Boundary-Layer Meteorology*, 71, 247-276.

## 6. CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

<b>Atividades Realizadas</b>	<b>Período</b>
Cursos e pesquisa bibliográfica. Familiarização com o modelo LES.	Março a Agosto de 2011.
<b>Atividades Futuras</b>	
Cursos e pesquisa bibliográfica.	Agosto de 2011 a março de 2012.
Apresentação no VII Workshop de Micrometeorologia.	Novembro de 2011.
Exame de Qualificação.	Abril de 2012.
Realização das simulações da evolução temporal da CLP. Análise dos resultados e redação da dissertação.	Maio de 2012 a fevereiro de 2013.

## **7. ANEXOS**