



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-mxx/aaaa/00.00.00.00-XXX

90

**AS PRINCIPAIS LIMITAÇÕES DAS PARAMETRIZAÇÕES DE SUPERFÍCIE E
DA CAMADA LIMITE PLANETÁRIA E SEUS IMPACTOS NAS SIMULAÇÕES
NUMÉRICAS**

Davidson Lima de Melo

Fabiana da Rocha Bartolomei

Guilherme Machado Farache Silva

Linda Muzareli da Cruz

Nota Técnica para a disciplina de Modelagem
Atmosférica, do Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pelo Dr. Paulo Yoshio
Kubota

INPE
Cachoeira Paulista
2024

RESUMO

Este trabalho investiga as principais limitações das parametrizações da superfície e da camada limite planetária (CLP) em simulações numéricas de previsão do tempo. As parametrizações são essenciais para representar processos de pequena escala, como turbulência e trocas de calor, umidade e momentum entre a superfície e a atmosfera, que não podem ser diretamente resolvidos pelos modelos numéricos devido à sua resolução limitada. No entanto, essas parametrizações enfrentam desafios significativos, como a dificuldade em representar a complexidade dos processos turbulentos e as interações com a atmosfera livre, além da variabilidade espacial e temporal dos fluxos de superfície. Estas limitações podem resultar em erros nas previsões climáticas e na simulação de eventos extremos. O estudo destaca a necessidade de avanços nas técnicas de parametrização para melhorar a precisão das previsões numéricas, visando um melhor entendimento dos processos que ocorrem na CLP e na superfície.

Palavras-chave: Modelagem Numérica; Turbulência; Trocas de Momentum;

ABSTRACT

This study investigates the main limitations of surface and planetary boundary layer (PBL) parameterizations in numerical weather prediction simulations. Parameterizations are essential for representing small-scale processes, such as turbulence and exchanges of heat, moisture, and momentum between the surface and the atmosphere, which cannot be directly resolved by numerical models due to their limited resolution. However, these parameterizations face significant challenges, such as the difficulty in representing the complexity of turbulent processes and interactions with the free atmosphere, as well as the spatial and temporal variability of surface fluxes. These limitations can lead to errors in climate forecasts and the simulation of extreme events. The study highlights the need for advancements in parameterization techniques to improve the accuracy of numerical predictions, aiming for a better understanding of the processes occurring in the PBL and at the surface.

Keywords: Numerical Modeling; Turbulence; Momentum Exchanges.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1: Representação teórica do ciclo diário da CLP, variando de acordo com a influência da superfície. (Adaptado de Stull, 1991)	2
Figura 2: Representação teórica-modelada do perfil da Camada Limite Planetária.	5

SUMÁRIO

	<u>Pág</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Conceitos Fundamentais da Camada Limite Planetária	2
2.2 Parametrizações de Superfície	2
2.3 Desafios na Parametrização da CLP	3
3 DISCUSSÃO	5
3.1 Limitações das Parametrizações de Superfície	6
3.2 Limitações das Parametrizações da CLP	7
3.3 Impactos nas Simulações Numéricas	8
4 CONCLUSÃO	9

1 INTRODUÇÃO

A previsão numérica de tempo (PNT) é realizada através da solução de Equações Diferenciais Parciais (EDPs) que modelam a dinâmica e termodinâmica da atmosfera computacionalmente. Dessa forma, estas equações são capazes de evoluir o sistema indicando como o mesmo estará no futuro a partir de um conjunto de valores iniciais para as variáveis atmosféricas, ou seja, a condição inicial do sistema. Esta solução numérica é feita nos modelos de PNT, majoritariamente, por Métodos de Diferenças Finitas ou Métodos de Volumes Finitos. Em ambos os métodos, existe a necessidade de discretizar o domínio contínuo em nós e células, que definem um *grid*. Enquanto, nas equações diferenciais (domínio contínuo) todo o espectro de movimentos atmosféricos é devidamente representado, ao solucioná-las numericamente, somente as escalas maiores que o dobro do tamanho do *grid* são representadas (Tiedtke, 1984).

Dessa forma, fenômenos de menor escala como turbulência de microescala e convecção de cumulus não são solucionadas devido à resolução do domínio ser menor que a escala destes fenômenos. Pelo fato destes fluxos e escoamentos de pequenas escalas afetarem o escoamento médio da atmosfera, se torna necessário introduzir a contribuição destes fenômenos nas equações governantes. O processo de solucionar fenômenos de escalas menores que o tamanho do *grid* é chamado de parametrização.

A camada limite planetária (CLP) é definida como a região da atmosfera mais próxima da superfície, diretamente influenciada por interações com a superfície terrestre. A CLP desempenha um papel crucial na PNT e na modelagem climática, pois é a interface entre a superfície terrestre e a atmosfera livre. Parametrizar a CLP e os processos de superfície envolve representar os fluxos turbulentos de momento, calor (sensível e latente) e umidade que ocorrem em escalas *subgrid*, ou seja, em escalas menores do que a resolução dos modelos numéricos.

Essa parametrização é essencial para capturar a troca de energia que influencia diretamente a precisão das previsões meteorológicas e dos modelos climáticos. Além disso, a importância da parametrização da CLP se dá devido à interação com outros tipos de processos como, por exemplo, a formação de nuvens e sistemas convectivos. Apesar dos avanços tecnológicos, essas parametrizações ainda demonstram limitações associadas à sua representação nos modelos numéricos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos Fundamentais da Camada Limite Planetária

A CLP é definida como a porção da camada da atmosfera que o campo do fluxo está diretamente sob a influência de interações da superfície terrestre (Holton, 2004) e responde às forçantes de superfície em escalas de tempo da ordem de uma hora ou menos. É caracterizada por uma forte turbulência (Businger, 1981), que promove a mistura vertical de calor, umidade e momentum, variando durante o ciclo diário de acordo com a Figura 1.

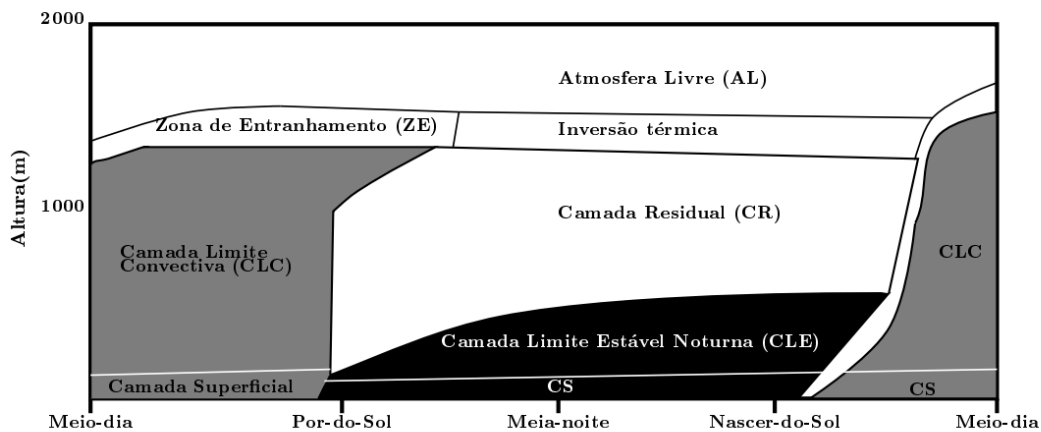


Figura 1: Representação teórica do ciclo diário da CLP, variando de acordo com a influência da superfície. (Adaptado de Stull, 1991)

A maioria das partículas de aerossol e poluentes atmosféricos emitidos pelo solo residem nesta camada, sendo que as concentrações de partículas observadas resultam de uma combinação da dinâmica de emissão, processamento atmosférico, transporte e dispersão dentro do CLP (Foskinis *et al.*, 2024). Além disso, nuvens do tipo Cumulus, stratocumulus e nevoeiro são partes importantes da dinâmica da camada limite e interagem fortemente com a radiação presente (Beljaars, 1992).

Outro aspecto a ser avaliado é a profundidade da CLP, que varia diuturna, sazonal e geograficamente, e é afetada por fatores como a radiação solar, a topografia e a cobertura vegetal. No entanto, sabe-se que a CLP é a faixa mais baixa da atmosfera, com uma espessura que varia de 100 a 3000 metros (Stull, 1988). A presença de vales e montanhas pode induzir contrastes térmicos e gradientes de pressão que modificam tanto a estrutura termodinâmica quanto a estrutura dinâmica da CLP (Karam (2002) *apud* Rosiberto, 2021).

De acordo com Holton (2004), redemoinhos turbulentos não resolvidos na camada limite são de importância crítica, pois transportam calor e umidade para longe da superfície,

mantendo o balanço de energia. A teoria da camada limite planetária busca entender como esses fluxos são transportados para a atmosfera livre.

A CLP responde rápido ao seu forçamento em comparação com a escala de tempo da evolução em grande escala da atmosfera, em outras palavras: a CLP está sempre em quase equilíbrio com o forçamento em grande escala. O conhecimento das diversas características do CLP é essencial para a previsão numérica do tempo e também para simular a dinâmica do clima (Bhumralkar, 1976).

2.2 Parametrizações de Superfície

De acordo com Beljaars (1992), a camada superficial é a fração rasa da CLP próxima à superfície onde os fluxos são aproximadamente iguais aos valores da superfície, sendo conhecida por camada do fluxo constante.

As parametrizações de superfície tratam da representação dos processos que ocorrem na interface solo-atmosfera. Perto da superfície, o PBL é integrado à camada superficial, impondo o fluxo de momento, calor e umidade da superfície como condição de limite inferior do PBL (Eghdami *et al.*, 2022).

Uma das abordagens mais comuns é a utilização da teoria de similaridade de Monin-Obukhov (TSMO), que descreve os perfis verticais de velocidade do vento, temperatura e umidade na camada limite superficial com base em parâmetros como a altura de rugosidade e o comprimento de Obukhov. A teoria de similaridade de Monin-Obukhov estabelece que em um escoamento turbulento estacionário sobre uma superfície homogênea na camada superficial atmosfera os escalares são transportados com a mesma eficiência pelos vórtices turbulentos (Armani, Dias, Vissoto Junior, 2020). De acordo com Hill (1989), a TSMO estabeleceu um alicerce para o estudo de toda a Camada Limite, e suas funções empíricas são usadas em muitas aplicações práticas

Os resultados podem sofrer alguns desvios da teoria, independente do tipo de superfície. Essa falha é atribuída a falta de estacionariedade e a presença de advecção local (Salesky; Chamecki; Dias, 2012; Cancelli; Chamecki; Dias, 2014).

2.3 Desafios na Parametrização da CLP

A parametrização da camada limite em um modelo de circulação geral usualmente depende da resolução vertical do modelo e está relacionada à determinação de quatro variáveis previsto pelo modelo: (1) fluxos superficiais de momento, calor, e umidade; (2) perfis verticais dos fluxos turbulentos dentro da camada limite; (3) altura da camada limite; e (4) velocidade vertical no topo da camada limite (Bhumralkar, 1976).

Alguns estudos verificaram a importância da CLP e de sua parametrização, Braun e Tao (2000) sugeriram que os esquemas de CLP são tão importantes quanto os esquemas da microfísica da nuvem na previsão de intensidade dos furacões e da precipitação que os acompanha. Como um estudo sobre o impacto dos esquemas CLP em simulações sazonais utilizando um modelo de circulação geral, Holtslag e Boville (1993) mostraram uma melhoria no transporte da camada limite em condições convectivas secas alterando o algoritmo PBL.

A principal dificuldade na parametrização da CLP é capturar a complexidade dos processos turbulentos que ocorrem em escalas temporais que variam entre alguns segundos a trinta minutos, para o caso de turbilhões maiores, e escalas espaciais variando de milímetros a algumas centenas de metros, segundo Beljaars, A. (1992). Fenômenos nestas escalas não são possíveis de serem resolvidas através dos modelos de larga-escala e dessa forma, devem ser parametrizados. Modelos como o de Mellor-Yamada e o de Holtslag-Boville são utilizados para representar a turbulência na CLP, mas apresentam limitações em diferentes condições atmosféricas.

Por exemplo, a suposição de equilíbrio instantâneo entre produção e dissipação de energia cinética turbulenta (TKE) pode ser inválida em situações de forte convecção ou cisalhamento. A parametrização da CLP depende da parametrização da altura pelo fluxo do calor sensível, já que as camadas mais acima da atmosfera são aquecidas e modificam o escoamento da mesma. **confuso**

3 DISCUSSÃO

As limitações das parametrizações de superfície e da CLP interferem na precisão das previsões por modelagem numérica. Isto gera impacto na capacidade de simular eventos extremos e a variabilidade climática em escalas locais e regionais.

O gráfico apresentado na Figura 4a é uma representação teórica-modelada do perfil vertical de temperatura e umidade relativa na camada limite planetária (CLP). O eixo horizontal representa a altitude em metros (m), enquanto os dois eixos verticais representam a temperatura em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), e a umidade relativa em porcentagem (%).

A temperatura diminui linearmente com a altitude. Este comportamento é consistente com um gradiente térmico adiabático seco, taxa constante. A umidade relativa diminui exponencialmente à medida que a altitude aumenta, pois o decréscimo da pressão parcial reflete a menor capacidade de reter vapor d'água a temperaturas mais baixas. Além disso, vale ressaltar que a principal fonte de umidade para a atmosfera é a evaporação dos corpos aquíferos presentes na superfície da Terra, como rios, lagos e oceanos, o que representa 90% da umidade presente na atmosfera.

A variação diurna da profundidade da CLP (Figura 1b) é medida em metros e varia ao longo das horas do dia. Por padrão, a profundidade da CLP aumenta durante o dia, atingindo um pico por volta do meio-dia, e diminui à noite. Isto é consistente com o aquecimento da superfície terrestre, que afeta a estabilidade da atmosfera causando convecção (processos turbulentos) e mistura dentro da CLP.

Durante a noite, a CLP tende a ser mais rasa devido ao resfriamento pela perda de calor através da radiação infravermelha. A camada passa a apresentar uma estrutura estratificada, caracterizada por uma redução acentuada na mistura vertical, isso estabiliza a CLP, resultando em uma significativa redução ou ausência de turbulência.

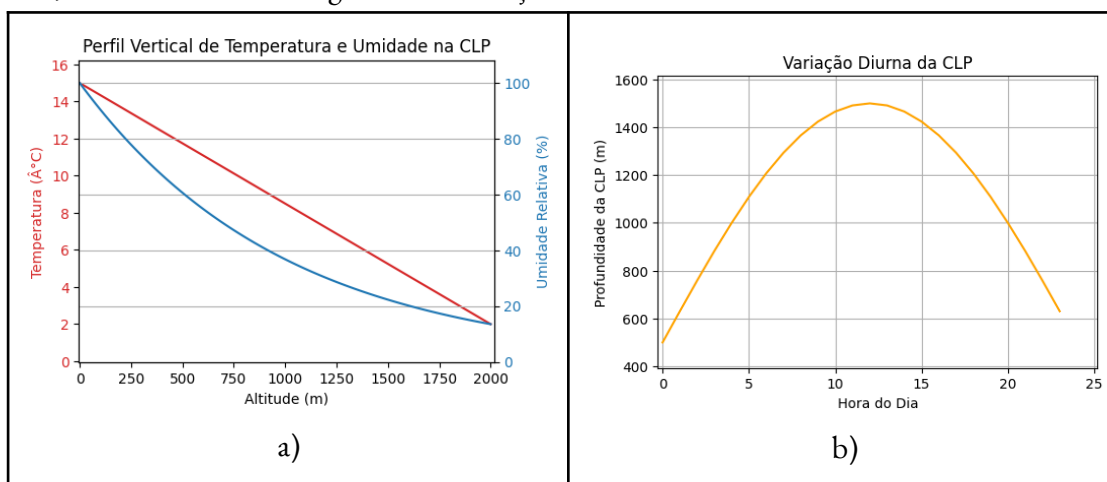


Figura 2: Representação teórica-modelada do perfil da Camada Limite Planetária.

Contudo, durante o dia, a camada convectiva promove uma intensa troca de energia e matéria entre a superfície e a atmosfera, incluindo o transporte de calor sensível e latente. À noite, a camada limite estável pode aprisionar poluentes e umidade próximos à superfície, afetando a qualidade do ar e as condições meteorológicas locais. Ou seja, a profundidade e a estrutura da CLP afetam a formação de fenômenos adversos, como: nevoeiros, brisas marítimas, inversões térmicas e outras condições meteorológicas de superfície.

3.1 Limitações das Parametrizações de Superfície

- Representação dos Fluxos de Calor e Umidade: As parametrizações de superfície frequentemente assumem perfis verticais simplificados e constantes para variáveis como temperatura e umidade, o que pode levar a erros na representação dos fluxos turbulentos e, conseqüentemente, nas previsões de temperatura e precipitação.
- Interação Vegetação-Atmosfera: Modelos de superfície muitas vezes não capturam adequadamente a variabilidade espacial e temporal das propriedades da vegetação (solo), como o índice de área foliar e a resistência estomática, o que pode afetar a evapotranspiração e o balanço de energia na superfície.
- Interações Não Lineares: As interações entre diferentes processos de superfície são frequentemente não lineares e complexas, dificultando a sua representação acurada em modelos.
- Feedbacks e Acoplamentos: Os feedbacks entre a superfície terrestre e a atmosfera são complexos e podem não ser bem representados em modelos devido a limitações na parametrização.

Efeito Antropogênicos, variabilidade das áreas agrícolas e urbanas etc

Impacto da estabilidade atmosférica nos fluxos de superfície

Mellor-Yamada e Holtslag-Boville: Esquemas de Parametrização da CLP:

Desenvolvido por George Mellor e Tetsuya Yamada, o esquema **Mellor-Yamada** é um modelo de fechamento de segunda ordem utilizado para parametrizar a turbulência na CLP considerando a energia cinética turbulenta (TKE). Este esquema aborda explicitamente a produção, dissipação e transporte de TKE, além de considerar o cisalhamento do vento e a flutuabilidade como mecanismos de geração de turbulência.

O esquema em questão possui uma precisão de 75% (índice moderado), sendo frequentemente aplicado em situações onde a representação precisa da mistura turbulenta na CLP é crítica, como em previsões de tempo e estudos climáticos. Suas possíveis imprecisões ocorrem especialmente em condições de forte estabilidade ou instabilidade atmosférica.

O esquema **Holtslag-Boville** (1993), desenvolvido por Albert Holtslag e Bruce Boville, é uma abordagem diferente para parametrizar a turbulência na CLP, conhecida como esquema de fechamento e efeitos de transporte não-local, incluindo calor e umidade por

convecção rasa. ~~Com 85% de precisão, é mais eficiente, sugerindo uma melhor representação dos fluxos turbulentos e da estrutura da CLP.~~

Entretanto, a consideração de processos não-locais aumenta a complexidade computacional, exigindo mais recursos de processamento. O desempenho do Holtslag-Boville pode depender significativamente do ajuste de parâmetros específicos para diferentes condições atmosféricas. Holtslag-Boville.

3.2 Limitações das Parametrizações da CLP

Complexidade da Turbulência: A turbulência na CLP é altamente anisotrópica e intermitente, características que são difíceis de representar em modelos numéricos que utilizam aproximações isotrópicas e contínuas.

A anisotropia significa que as propriedades turbulentas, como a velocidade do vento e a intensidade da mistura, variam dependendo da direção. Por exemplo, a turbulência pode ser mais intensa na direção vertical devido ao gradiente de temperatura ou na direção horizontal devido ao cisalhamento do vento.

Além disso, a intermitência da turbulência indica que ela ocorre de maneira não contínua, com períodos de atividade intensa seguidos por períodos de relativa calmaria. Essa natureza esporádica torna a modelagem da turbulência desafiadora, pois os modelos precisam capturar essas variações rápidas e irregulares.

A maioria dos modelos numéricos atuais assume que a turbulência é isotrópica e contínua, o que pode levar a uma representação imprecisa dos processos turbulentos na CLP e, conseqüentemente, a erros nas previsões de eventos meteorológicos extremos, como tempestades convectivas.

Interação entre a CLP e a Atmosfera Livre: A interação entre a CLP e a atmosfera livre, incluindo o acoplamento de processos de mesoescala e grande escala, é frequentemente mal representada.

Modelos numéricos tendem a subestimar os fluxos de calor e momentum entre essas camadas, o que impacta a previsão de sistemas meteorológicos de grande escala, como frentes e ciclones tropicais.

A falta de dados observados para a CLP também se torna uma limitação de sua parametrização pelo fato de dificultar a avaliação da intensidade dos fluxos e a intensidade e tamanho dos vórtices resultantes dos modelos nas diferentes alturas da camada. Como a CLP varia da superfície a centenas de metros ou alguns quilômetros, a avaliação de variáveis principais, como velocidade do vento, temperatura e umidade

específica, é difícil de ser obtida, dependendo de radiossondagens, cintilômetros ou aeronaves, para os níveis mais altos da camada.

3.3 Impactos nas Simulações Numéricas

As limitações das parametrizações de superfície e da CLP afetam diretamente a precisão das previsões meteorológicas e climáticas. Erros na representação dos fluxos turbulentos e nas interações superfície-atmosfera podem levar a previsões incorretas de temperatura, umidade e vento, impactando setores como agricultura, gestão de recursos hídricos e planejamento urbano. Além disso, a sub-representação dos processos de turbulência pode levar a uma subestimação da variabilidade climática em escalas locais e regionais.

4 CONCLUSÃO

A parametrização da CLP e dos processos de superfície é uma área crítica e desafiadora na modelagem numérica da atmosfera. As limitações atuais dessas parametrizações resultam em incertezas significativas nas previsões meteorológicas e climáticas.

Estudos posteriores devem focar na melhoria da representação da turbulência e das interações superfície-atmosfera, bem como no desenvolvimento de modelos de alta resolução que possam representar melhor a complexidade dos processos na CLP.

A integração de observações de alta frequência e a utilização de técnicas de assimilação de dados também são essenciais para aprimorar a precisão das simulações numéricas.

Segundo LeMone et al. (2019), melhorias no sensoriamento remoto dos movimentos do ar, temperatura, vapor d'água e outras variáveis seriam capazes de mostrar melhor movimentos turbulentos e avaliar dessa forma os devidos fluxos de momento. Este aprimoramento seria útil para o entendimento do mecanismo da CLP tanto para céu claro quanto para céu coberto. Além disso, a utilização de equipamentos para amostragem das variáveis *in situ* também ajudariam no entendimento da formação de turbilhões de menores escalas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Armani, F. A. S.; Dias, N. L.; Vissotto Junior, D. Similarity between turbulent fluctuations of scalars in lake environment. *Ciência e Natura*, v. 42, p. e13, 2020. DOI: 10.5902/2179460X45355.

Beljaars, A. (1992). *The parametrization of the planetary boundary layer*. Meteorological Training Course Lecture Series. ECMWF.

Bhumralkar, Chandrakant M. *Parameterization of the planetary boundary layer in atmospheric general circulation models*. **Reviews of Geophysics**, v. 14, n. 2, p. 215-226, 1976.

Businger, J. A. Equations and concepts. In: NIEUWSTADT, F. T. M.; VON DOP, H. (Ed.). *Atmospheric turbulence and Air Pollution Modeling*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1981. p. 1–36.

Cancelli, D. M.; Chamecki, M. & Dias, N. L. A Study of the Similarity between Scalars over a Heterogeneous Surface Using Large-Eddy Simulation. *Am. J. Environ. Eng.*, 2015, 5, 9-14.

Eghdami, Masih *et al.* Diagnosis of Second-Order Turbulent Properties of the Surface Layer for Three-Dimensional Flow Based on the Mellor–Yamada Model. *Monthly Weather Review*, v. 150, p. 1003-1020, 2022. DOI: 10.1175/MWR-D-21-0101.1.

Foskinis, Romanos et al. On the relation between the planetary boundary layer height and in situ surface observations of atmospheric aerosol pollutants during spring in an urban area. **Atmospheric Research**, p. 107543, 2024.

Hill, Reginald J. Implications of Monin–Obukhov similarity theory for scalar quantities. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 46, n. 14, p. 2236-2244, 1989.

Holton, James R. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Volume 88, ilustrada. International Geophysics. Academic Press, 2004. 535 p. ISBN 0123540151, 9780123540157.

Karam, H.A. (2002). Estudo dos jatos de baixo nível de Iperó e das implicações no transporte de poluentes no Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo (*apud* Rosiberto, 2021).

LeMone, M. A., Angevine, W. M., Bretherton, C. S., Chen, F., Dudhia, J., Fedorovich, E., ... & Weil, J. (2019). 100 years of progress in boundary layer meteorology. *Meteorological Monographs*, 59, 9-1.

Salesky, S. T.; Chamecki, M.; Dias, N. L. Estimating the random error in eddy covariance based fluxes and other turbulence statistics: the filtering method. *Boundary- Layer Meteorology*, v. 144, p. 113-135, 2012.

Stull, Roland B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Volume 13 de Atmospheric and Oceanographic Sciences Library. Edição ilustrada, reimpressão. Springer Science & Business Media, 1988. 670 p. ISBN 9027727694, 9789027727695.

Stull, R. B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991.

Tiedtke, M. (1984). *The general problem of parametrization*. Meteorological Training Course Lecture Series. ECMWF.