

CARACTERÍSTICAS DA CAMADA LIMITE SUPERFICIAL EM RIO GRANDE, NO DIA 26 DE MAIO DE 2014, SEGUNDO A TEORIA DE SIMILARIDADE DE MONIN E OBUKHOV

Mariely Rodrigues Anger¹; Nísia Krusche²

Resumo

O município de Rio Grande, localizado no sul do estado do Rio Grande do Sul, está em crescente desenvolvimento industrial, o que leva a uma preocupação com os impactos ambientais ocasionados pelas atividades destas indústrias. Caracterizar a estrutura da turbulência próxima da superfície terrestre é fundamental para obter uma descrição mais realista da sua dinâmica e, assim, compreender e modelar fenômenos como a dispersão de poluentes. Desta forma, o objetivo deste trabalho é verificar a validade da Teoria de Similaridade de Monin e Obukhov no município de Rio Grande. Esta é uma teoria que aplica escalas de similaridade para a caracterização da atmosfera próxima a superfície, com base na hipótese dos fluxos superficiais serem aproximadamente constantes nesta região. Foram utilizados dados de turbulência medidos em dois níveis, 20 e 28 metros de altura. Estimou-se a intensidade da turbulência, a energia cinética turbulenta, fluxos verticais turbulentos, escalas de comprimento, temperatura e velocidade e o parâmetro de estabilidade proposto pela Teoria de Similaridade de Monin e Obukhov. Analisando os resultados verificou-se que esta teoria apresenta resultados parcialmente satisfatórios para o período estável, o que não ocorre no período instável. Pretende-se estender esta análise para um conjunto maior de observações, o que pode contribuir para uma aplicação mais precisa da teoria.

Palavras-chave: Camada Superficial, Teoria de Similaridade, Turbulência.

Abstract

Rio Grande is a city located in the southern coast of Rio Grande do Sul state, in crescent industrial development. That leads to a concern with the environmental impact caused by these industrial activities. A more realistic description of the dynamics of turbulence close to the earth's surface is fundamental to understand and model phenomena such as the dispersion of pollutants. Thus, the object of this work is to verify the validity of the Similarity Theory of Monin and Obukhov in the Rio Grande city. This is a theory that applies similarity scales for the characterization of the atmosphere near the surface, based on the hypothesis that the surface fluxes are approximately constant in this region. Turbulence data measured at two levels, 20 and 28 meters high was used to evaluate turbulence intensity, turbulent kinetic energy, turbulent vertical fluxes, temperature and velocity length scales, and the stability parameter proposed by the Monin and Obukhov Similarity Theory. It was verified that this theory is partially fulfilled for the stable period, which does not occur in the unstable period.

Keywords: Surface Layer, Similarity Theory, Turbulence.

¹ Mestranda do Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Campus Carreiros: Av. Itália km 8 - Bairro Carreiros. E-mail: marielyanger@furg.br.

² Professora do Centro de Ciências Computacionais, Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Campus Carreiros: Av. Itália km 8 - Bairro Carreiros. E-mail:nkrusche@furg.br.

Introdução

O município de Rio Grande localiza-se na região litorânea no sul do Estado do Rio Grande do Sul, seus limites hidrográficos são o oceano Atlântico, o estuário da Laguna dos Patos, a Lagoa Mirim e o canal de São Gonçalo. Este município está em constante crescimento industrial o que levanta a preocupação com a dispersão de poluentes e outros problemas ambientais ocasionados pelas atividades de grandes pólos industriais.

A Camada Limite Atmosférica é a camada onde a interação com a superfície ocorre. Portanto, caracterizar a estrutura da turbulência nesta região é fundamental para obter uma descrição mais realista de seu comportamento e conseqüentemente entender e modelar fatores ambientais. Um exemplo empírico da importância do estudo da turbulência é a modelagem do processo de dispersão de poluentes. Os poluentes gasosos e de partículas existentes na atmosfera são difundidos pela turbulência, portanto para que se consiga modelar este fenômeno numa determinada região se faz necessário uma caracterização da turbulência local.

Como as equações que governam a turbulência são bastante complexas, nas últimas décadas vem sendo desenvolvidas teorias de similaridade, as quais organizam as variáveis dentro de grupos adimensionais (STULL, 1988, p.347). Para este estudo, utilizou-se a Teoria de Similaridade de Monin e Obukhov. Esta considera os fluxos turbulentos constantes com a altura na Camada Superficial (CS). Baseia-se em escalas universais de comprimento, de temperatura e de velocidade do vento que são fundamentais para a parametrização dos espectros e coespectros de energia e massa e assim definem com precisão a estrutura e a intensidade da turbulência na CS (SILVA, 2014, p.2).

Desta forma, o objetivo deste trabalho é verificar a validade da Teoria de Similaridade de Monin e Obukhov para a CS no município de Rio Grande e estabelecer uma caracterização breve da turbulência local, tal iniciativa terá extrema contribuição em futuros estudos de gerenciamento ambiental para este município.

1 Camada Limite Atmosférica

A troposfera é onde acontece a maioria dos fenômenos atmosféricos que interferem diretamente na vida das pessoas, sua altura é de aproximadamente 10 quilômetros, tendo o solo como ponto de início. Nos primeiros quilômetros da troposfera é que se localiza a Camada Limite Atmosférica. Esta região fica em contato direto com a superfície da Terra sofrendo influências diretas da mesma, e responde as forçantes superficiais com uma escala

de tempo de aproximadamente 1 hora. Seu ciclo natural é de 24 horas, podendo alcançar, em sua espessura no período da tarde, centenas de metros a mais de 1 km (STULL, 1988, p.2). A Camada Limite Superficial é a região inferior da Camada Limite Atmosférica onde os fluxos turbulentos variam em menos de 10% de sua magnitude.

A formação da Camada Limite Atmosférica diurna ocorre pelo aquecimento da superfície pelo sol e conseqüente transferência de calor para a atmosfera mais fria. Surge, então, uma camada convectiva com movimentos de escalas espaciais de 1-2 km na vertical, devido à intensa mistura turbulenta de origem térmica, denominada Camada Limite Convectiva ou Camada de Mistura. Nesta, o vento médio, a temperatura potencial, coeficiente de umidade e concentração de poluentes são praticamente constantes com a altura.

Durante a noite o processo é inverso ao do dia, pois, como a terra esfria mais rapidamente do que a atmosfera acontece uma transferência de calor em sentido oposto. A escala espacial dos movimentos atmosféricos próximos a superfície fica restrita a algumas centenas de metros, região denominada Camada Limite Estável, com turbulência fraca e esporádica (STULL, 1988, p.15).

Enfim, dentre todas as evoluções da Camada Limite Atmosférica, a CS é mais explorada por pesquisas micrometeorológicas, pois além de ser a camada onde a maioria das atividades humanas é realizada ela também é a de mais fácil acesso para implementação de equipamentos meteorológicos.

2 Teoria de Similaridade de Monin e Obukhov

Desde 1954, data que foi publicado o primeiro trabalho referente à hipótese de similaridade para fluxos turbulentos sobre superfícies planas, a TSMO tem se destacado na função de descrição da camada superficial atmosférica e obtido sucesso na parametrização de algumas propriedades de escoamentos (SILVA, 2014, p.14).

A suposição da TSMO vem da combinação da turbulência mecânica com a convectiva, onde os fluxos verticais são considerados constantes com a altura na Camada Superficial. Para isto, vários parâmetros atmosféricos são utilizados e quando normalizados pelas escalas de velocidade (u_*) e de temperatura (T_*) passam a ser funções universais de z/L , denominado parâmetro de estabilidade de Monin e Obukhov, onde z é a altura de medida e L a escala de comprimento de Obukhov, dada por:

$$L = \frac{-u_*^3}{k \frac{g}{T_0} \overline{w'T'}} \quad (1)$$

onde k é a constante de von Karmam ($k = 0.4$), g é a aceleração da gravidade, T_0 é uma temperatura de referência.

O comprimento de Obukhov (L) é um importante parâmetro para determinar as condições de estabilidade atmosférica na camada superficial. Através dele consegue-se estimar a que altura os efeitos da turbulência mecânica são significativos em comparação aos efeitos da turbulência convectiva (STULL, 1988).

Assim, através do comprimento de Obukhov, define-se um parâmetro de estabilidade de Monin e Obukhov, $\xi = z/L$, onde sua melhor definição seria “um parâmetro de escala da camada superficial” (STULL, 1988, p.180). Este parâmetro é estabelecido da seguinte maneira: $\xi > 0$ a CS é estável, $\xi < 0$ a CS é instável e $\xi = 0$ a CS é neutra.

A escala da velocidade, ou velocidade de atrito, é calculada a partir do método do tensor de Reynolds e é dada por:

$$u_* = \left[(\overline{u'w'})^2 + (\overline{v'w'})^2 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

Uma escala de temperatura derivada desta é:

$$T_* = \frac{-\overline{w'T'}}{u_*} \quad (3)$$

onde, $\overline{u'w'}$, $\overline{v'w'}$ e $\overline{w'T'}$ são, respectivamente, os fluxos verticais turbulentos da componente u do vento, da componente v do vento e de calor sensível.

Para a validação desta teoria foi calculado algumas relações de semelhança que foram determinadas empiricamente e consistem em estimar valores de variáveis através das escalas citadas anteriormente (BERKOWICZ; PRAHM, 1984, KAIMAL; FINNIGAN, 1994; SORBJAN, 1987). Para este trabalho as relações de semelhança utilizadas são as propostas por Stull (1988, p.359), seguem em sequência as relações para a Camada Superficial no período de estabilidade:

$$\frac{\overline{u'v'}}{u_*^2} = \text{constante} \quad (4)$$

$$\frac{(\overline{u'T'^2} + \overline{v'T'^2})^{1/2}}{u_* T_*} = 4 \quad (5)$$

$$\frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2}}{u_*^2} = 8.5 \quad (6)$$

$$\frac{\overline{w'^2}}{u_*^2} = 2.5 \quad (7)$$

$$\frac{\overline{T'^2}}{T_*^2} = 4 \quad (8)$$

$$\frac{\overline{e}}{u_*^2} = \text{constante} \quad (9)$$

onde, $\overline{u'v'}$ é o fluxo longitudinal de momentum transversal, $\overline{u'T'}$ é o fluxo de calor sensível longitudinal, $\overline{v'T'}$ é o fluxo de calor sensível transversal, $\overline{w'^2}$ é a média da componente vertical turbulenta do vento ao quadrado, $\overline{T'^2}$ é a média da temperatura turbulenta ao quadrado e \overline{e} é a energia cinética turbulenta.

A seguir, são apresentadas as relações de semelhança para a CS no período de instabilidade:

$$\frac{(\overline{w'^2})^{1/2}}{u_*^2} = 1.9 \cdot \left(-\frac{z}{L}\right)^{1/3} \quad (10)$$

$$\frac{(\overline{T'^2})^{1/2}}{T_*^2} = -0.95 \cdot \left(-\frac{z}{L}\right)^{-1/3} \quad (11)$$

As variáveis presentes neste segundo grupo de equações já foram mencionadas anteriormente, vale lembrar que para o período de instabilidade todas as relações consistem em uma parametrização com uma função relacionada ao parâmetro de instabilidade.

3 Dados de Turbulência

Os dados utilizados neste estudo foram coletados de uma torre meteorológica presente nas dependências da Universidade Federal de Rio Grande no município de Rio Grande, estado do Rio Grande do Sul, como observado na Figura 1.

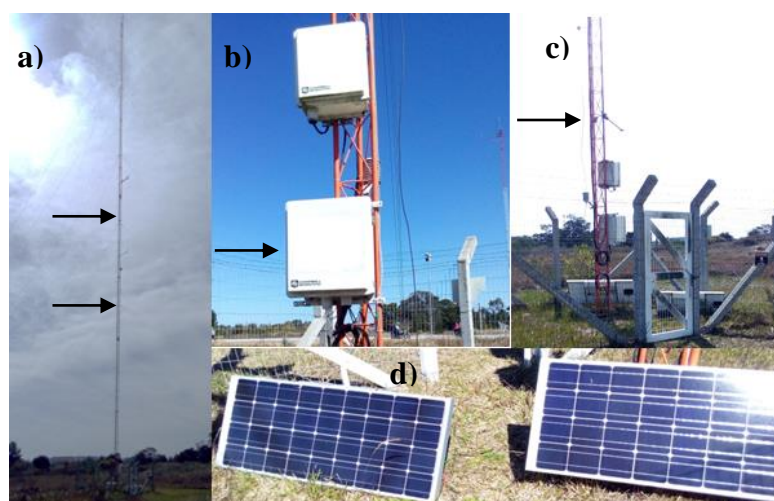
Figura 1 - Imagem que apresenta a localização da torre meteorológica de onde foram coletados os dados. (Adaptação do Google Maps, 2016).



Fonte: Elaborada pelos autores.

A torre possui 50 metros de altura e é composta pelos seguintes instrumentos: um datalogger, que armazena os sinais elétricos e está programado para coletar e registrar os dados numa frequência de 20 Hz; dois anemômetros, um em 20 metros de altura e o outro em 28 metros; um analisador de CO₂ e H₂O em 28 metros; um sensor de radiação solar líquida em seis metros; um sensor de temperatura e umidade relativa em dois metros e um fluxímetro de solo enterrado a 2,5 centímetros. As variáveis analisadas são: temperatura (°C), velocidade do vento zonal (u), meridional (v) e vertical (w) em m/s. Alguns destes equipamentos são indicados na Figura 2.

Figura 2 - Equipamentos que compõem a torre: a) Anemômetros e analisadores de CO₂ e H₂O, b) datalogger, c) Radiômetro e d) painéis fotovoltaicos.



Fonte: Elaborada pelos autores.

4 Metodologia

Para este estudo, utilizou-se dados do dia 26 de maio do ano de 2014. A análise da qualidade dos dados foi realizada previamente através das sugestões presente em Vickers e Mahrt (1997). Os dados foram concatenados em médias de 20 minutos. Como este trabalho é uma análise de um dia, depois de serem descartados os dados inadequados identificados pela análise citada anteriormente, obteve-se um grupo de 61 arquivos, que corresponde a aproximadamente 20 horas de medição.

Para o início das atividades do estudo, partiu-se do pressuposto da teoria estatística dos movimentos turbulentos. Esta teoria expressa o comportamento irregular das grandezas físicas envolvidas na atmosfera, bem como um valor médio e uma flutuação estatística em torno dessa média. Segundo Stull (1988, p.41), Reynolds ampliou esta teoria e sugeriu a separação do escoamento das grandezas físicas em partes turbulentas e não turbulentas. Assim, as componentes zonal (u), meridional (v) e vertical (w) da velocidade do vento, por exemplo, podem ser escritas como:

$$\begin{aligned}u &= \bar{u} + u' \\v &= \bar{v} + v' \\w &= \bar{w} + w'\end{aligned}\tag{12}$$

onde, \bar{u} , \bar{v} e \bar{w} são as componentes médias e u' , v' e w' são as componentes turbulentas.

Sabendo disso, foi calculada a Energia Cinética Turbulenta (ECT).

$$\bar{e} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})\tag{13}$$

É importante lembrar que esta desempenha um importante papel em micrometeorologia e está relacionada ao transporte de calor, umidade e momentum através da camada limite.

Concluso o cálculo da energia cinética turbulenta, realizou-se a estimativa da intensidade da turbulência, expressa pela seguinte equação:

$$I = \frac{\sigma_M}{\bar{M}}\tag{14}$$

onde, σ_M é o desvio padrão de M e \bar{M} é a velocidade média na horizontal.

Os fluxos verticais turbulentos foram obtidos pela correlação de turbilhões (*eddy correlation*) ou método das covariâncias. Sendo assim, a hipótese básica deste método é o cálculo das covariâncias entre as flutuações temporais de alta frequência, tanto da propriedade que se quer estimar os fluxos quanto da componente do vento na direção em que o fluxo ocorre. O fluxo de calor sensível por este método é dado como $\overline{w'T}$.

Os parâmetros característicos assim como as escalas de comprimento, velocidade e temperatura foram calculados e analisados em termos da Teoria de Similaridade de Monin e Obukhov, sendo que as equações regentes dos mesmos já foram apresentadas acima.

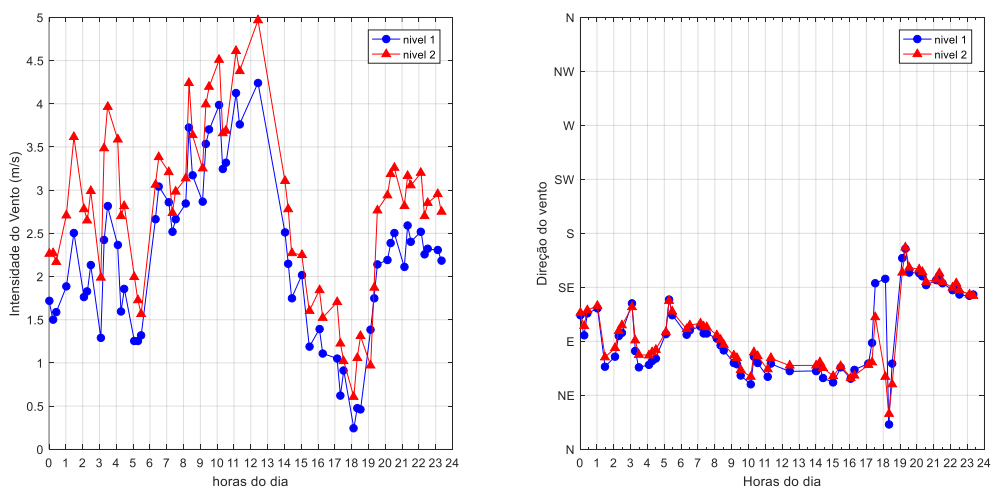
5 Resultados

As análises da característica da CS foram realizadas em termos da Teoria da Similaridade de Monin e Obukhov em diferentes condições de estabilidade. Determinou-se, para cada arquivo de dados, os parâmetros citados no decorrer deste trabalho. Serão destacados os mais relevantes e será descrito brevemente o comportamento da turbulência local.

Os ventos zonais (leste-oeste) e meridionais (sul-norte) tiveram um comportamento variando de 0 a 5 m/s, apresentando variações muito semelhantes durante o decorrer do dia. A velocidade vertical no período da noite se manteve constante numa média próxima de zero e no período do dia as amplitudes de oscilação foram mais intensas com variação de 0.2 a 0.25 m/s. A temperatura mostrou comportamento padrão, com máxima de 17°C ao meio dia e mínima de 9°C às duas horas.

O comportamento do vento em relação a sua direção e intensidade está presente na Figura 3. Consegue-se perceber que próximo das 12 horas a intensidade do vento diminui e volta a se estabelecer próximo das 20 horas, horário em que a direção do vento muda repentinamente.

Figura 3 - Intensidade e direção do vento respectivamente. Nível 1 é a medição em 20 metros e nível 2 é a medição em 28 metros de altura.



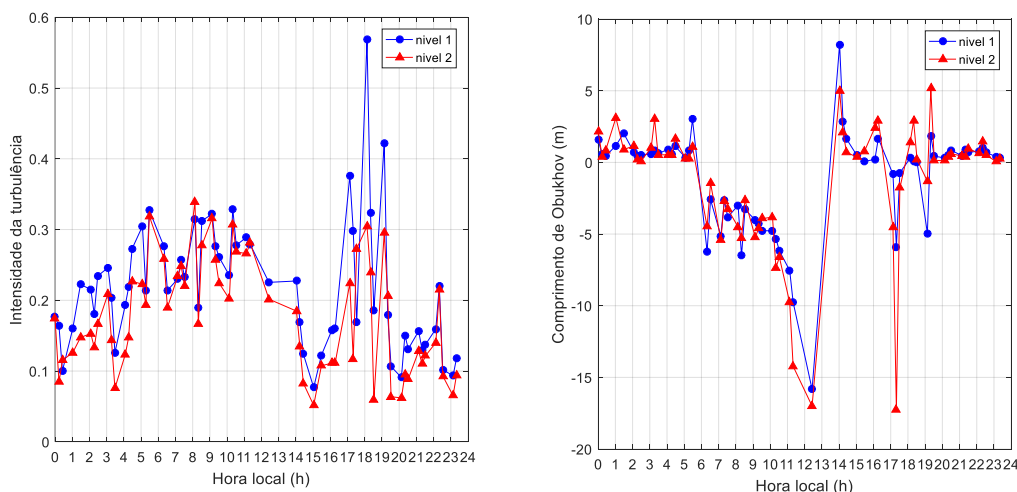
Fonte: Elaborada pelos autores.

O comportamento da ECT assim como os das escalas de temperatura e de velocidades propostas pela TSMO também obtiveram resultados satisfatórios (mantiveram seus valores dentro dos padrões estabelecidos em Stull (1988, p.357). No período estável (noite), a ECT apresentou baixas amplitudes e no período instável (dia) as amplitudes tiveram variação mais intensa, próximo ao meio dia, atingiu um valor de $2\text{m}^2/\text{s}^2$.

Para caracterizar a turbulência foi feito uma análise quanto as condições de estabilidade e instabilidade da CS através do parâmetro $\xi = z/L$, ou seja a altura da medição dividida pelo comprimento de Obukhov. Na figura seguinte, Figura 4, é apresentado um comparativo entre o comprimento de Obukhov e a intensidade da turbulência.

O período diurno é usualmente instável. Entretanto, verificou-se nas proximidades das 15 horas condições estáveis ($L > 0$). Por momento justifica-se este fato no decaimento da intensidade do vento médio e mudança repentina de direção neste mesmo intervalo de tempo, Figura 3. Por outro lado, o fluxo de calor sensível não apresentou nenhuma anormalidade, no período da noite se manteve próximo de zero e durante o dia registrou valores variando no intervalo de zero a 200 W/m^2 .

Figura 4 - Intensidade da turbulência e comprimento de Obukhov respectivamente. Nível 1 é a medição em 20 metros e nível 2 é a medição em 28 metros de altura

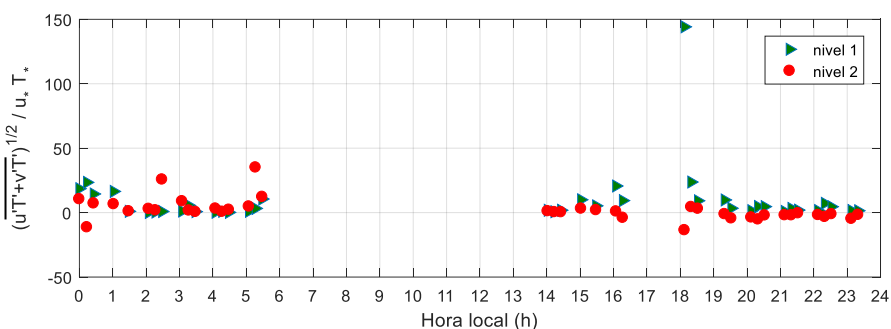


Fonte: Elaborada pelos autores.

Além das interpretações dos fenômenos ocorridos nas Figuras 3 e 4, pode-se acrescentar como justificativa da camada estável ocorrer durante o dia o fato de que a região estudada é litorânea, o que, segundo Stull (1988, p.16), propicia uma superfície subjacente mais fria que o ar ocasionando na formação da CLE neste período.

Os resultados das seis relações para o período estável, equações 4, 5, 6, 7, 8 e 9, apresentaram comportamento próximo do desejado. Nenhuma das relações foi satisfeita com exatidão, lembrando que todas as relações para o período estável deveriam apresentar valores constantes. Segue abaixo, na Figura 5, o comportamento da relação que calcula fluxo de calor sensível longitudinal somado ao fluxo de calor sensível transversal normalizado pela escala de velocidade e escala de temperatura.

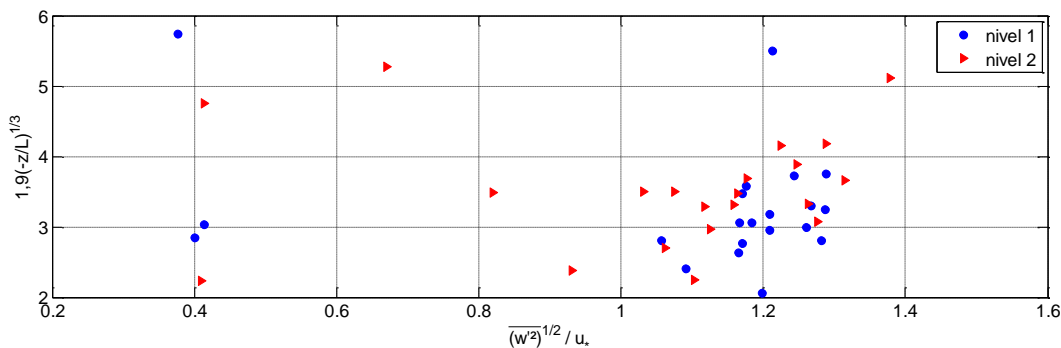
Figura 5 - Resultado da relação presente na Eq.5, (período estável). Nível 1 é a medição em 20 metros e nível 2 é a medição em 28 metros de altura.



Fonte: Elaborada pelos autores.

As duas relações feitas para o período instável não foram bem-sucedidas. Vale ressaltar que o período instável possui um número menor de dados, o que pode ocasionar uma análise estatística equivocada. As equações fazem uma relação de igualdade entre as variações de velocidade e temperatura normalizadas por escalas, com o parâmetro z/L , portanto, o comportamento que se espera quando plotado estes valores é o de uma reta. A Figura 6 mostra o comportamento da relação correspondente à equação 10, para a equação 11 também se obteve comportamento fora do previsto.

Figura 6 - Resultado da relação presente da Eq.10, (período instável). Nível 1 é a medição em 20 metros e nível 2 é a medição em 28 metros de altura.



Fonte: Elaborado pelos autores.

6 Conclusão

Os parâmetros e escalas estimados no intuito de caracterizar brevemente a turbulência apresentaram valores que coincidem com a teoria de micrometeorologia. A Teoria de Similaridade de Monin e Obukhov para o período estável foi parcialmente satisfeita, o que não ocorreu no período instável.

A Teoria de Similaridade de Monin e Obukhov é uma teoria estatística, e as relações usadas neste trabalho para a sua validação foram estimadas empiricamente. Logo, refletindo com os resultados até então obtidos, pensa-se que para obter os mesmos valores apresentados na teoria deverá ser analisado um maior número de dados, assim como adaptar estas relações para que melhor se adequem as condições atmosféricas do município de Rio Grande.

Na próxima etapa desta pesquisa, serão analisados estes mesmos parâmetros assim como as mesmas relações de semelhança num número amostral de tempo maior, assim, espera-se conseguir uma caracterização da CS com maior exatidão.

7 Agradecimentos

Um dos autores, M. Anger, agradece a bolsa de estudos financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), sendo este apoio fator de suma importância na realização deste estudo. Os autores reconhecem o financiamento da FINEP, através do CT-INFRA 2007, aos equipamentos de medida usados para esta pesquisa, bem como a equipe de alunos e técnicos que realizam a instalação e mantêm o funcionamento destes.

Referências

BERKOWICZ, R., PRAHM, L. P. Spectral representation of the vertical structure of turbulence in the convective boundary layer. **Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.**, 1984.

KAIMAL, J. C., FINNIGAN, J. J. Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement. **Oxford University Press**, New York, 1994.

SILVA, F. A. **Características Espectrais e Similaridade na Camada Limite Superficial sobre Floresta Manejada: Flona Tapajós km 83**. 71 p. Dissertação de Mestrado em Recursos Naturais da Amazônia, Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, PA, 2014.

SORBJAN, Z., An examination of local similarity theory in the stably stratified boundary layer. **Bound. -Layer Meteor.**, vol. 38, pp. 63-71, 1987.

STULL, R.B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Kluwer Academic., 1988.

VICKERS, D., MAHRT, L. Quality Control and Flux Sampling Problems for Tower and Aircraft Data. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, vol. 14, pp. 512–526., 1997.