

## Edição especial

# Investigação de eventos de drenagem de ar frio durante a noite sobre terreno ondulado

Investigation of cold-air drainage events during the night over undulating terrain

Luiz Eduardo Medeiros <sup>I</sup>, Maicon Fonseca Andrades <sup>II</sup>,  
Otávio Costa Acevedo <sup>II</sup>, Débora Regina Roberti <sup>II</sup>, Thiago Ferreira Gomes <sup>I</sup>,  
Gilberto Fisch <sup>III</sup>, Felipe Denardin Costa <sup>I</sup>, Rafael Maroneze <sup>I</sup>

<sup>I</sup>Universidade Federal do Pampa, Bagé, RS, Brasil

<sup>II</sup>Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil  
<sup>III</sup>Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, Brasil

## RESUMO

O propósito do trabalho é investigar a possibilidade de ocorrência de escoamentos de drenagem de ar frio sobre um terreno ondulado com cobertura de gramado. Esse tipo de relevo e cobertura de superfície é tipicamente encontrado no bioma do Pampa, que abrange o sul do Brasil, Uruguai e Argentina. Escoamentos de drenagem de ar frio têm sido reportados na literatura e parecem ocorrer em diversas escalas espaciais de topografia. Sob condições estáveis da atmosfera, massas de ar frio se formam sobre a superfície e, se o relevo for complexo, a força peso delas pode exceder o gradiente local de pressão. Nesse tipo de situação, o ar frio tende a descer nos locais onde a superfície é inclinada e se acumular nas partes baixas do terreno. Na investigação são analisados dados de temperatura, velocidade do vento e radiação de onda longa coletados de uma torre micrometeorológica. Em diversas ocasiões são observados períodos nos quais o escoamento mais próximo da superfície (alturas inferiores a 4 m) segue a direção de queda do terreno, enquanto em níveis mais elevados, direções diferentes. Esses eventos possuem velocidades inferiores a  $1 \text{ ms}^{-1}$  e acontecem quando o vento no topo da torre é fraco ( $< 4 \text{ ms}^{-1}$ ).

**Palavras-chave:** Escoamento de ar frio; Superfície inclinada; Condições estáveis

## ABSTRACT

The aim of the work is to investigate the possibility of cold air drainage flows over gently undulating terrain with a grassland cover. Such type of landscape is found in southern Brazil, Uruguay, and Argentina. Drainage flows have been reported in previous studies and seem to happen over a wide

range of scales of topographic features. Under stable atmospheric conditions, thin-cold air layers may form and accumulate over the surface. If the surface is sloped, the weight can exceed the local vertical pressure gradient causing the cold air to acquire a negative buoyancy and flow down the slope. Such flows make the cold air to accumulate at the lower parts of the terrain. In the work, we analyze temperature, wind, and longwave radiation data collected at a micrometeorological. During several occasions is observed that the flow near the surface, at levels below 4 m, follows the direction of the slope, while the flow above follows different directions. Such events have wind speeds less than  $1 \text{ ms}^{-1}$  and happens when the flow at the top of the tower (30 m) is less than  $4 \text{ ms}^{-1}$ .

**Keywords:** Tropical forests; Biogenic volatile organic compounds; Emission drivers

## 1 INTRODUÇÃO

O escoamento do ar atmosférico, devido a sua presença mais próxima da superfície, sofre diversas alterações. Dentre as alterações mais importantes estão o aquecimento e resfriamento da superfície terrestre. Durante o dia, a superfície terrestre recebe mais radiação do que emite para o espaço e, como resultado, a mesma se aquece, aquecendo o ar adjacente. Como consequência, esse ar adjacente mais aquecido torna-se menos denso que o ar ao redor, ou seja, a força peso sobre ele passa a ser menor que o gradiente local de pressão, fazendo com que ele adquira uma flutuabilidade positiva. Por outro lado, o ar mais acima é mais denso que o ar mais abaixo e tende a descer. Essa situação favorece a ocorrência de movimentos verticais que dão origem ao processo de convecção. Durante a noite, a superfície terrestre perde mais radiação do que recebe e, como consequência, o ar adjacente resfria-se mais do que o ar acima, passando a ter flutuabilidade negativa. Sob essas condições, a convecção tende a ser extinta porque os movimentos verticais de ar são inibidos. A única maneira de gerar mistura vertical é através do cisalhamento do vento horizontal. Durante o dia, os movimentos turbulentos, associados a convecção, podem ter escalas espaciais de centenas de metros ou até poucos quilômetros, enquanto à noite a escala desses movimentos tende a ser menor que dezenas de metros.

Outro aspecto interessante da condição de flutuabilidade do ar diz respeito a ocorrência de correntes de densidades. Esse tipo de corrente toma a forma de

drenagem quando o ar frio, mais denso, se encontra sobre superfície inclinada e desce morro abaixo, visto que seu peso excede o gradiente local de pressão (flutuabilidade negativa). Esse tipo de escoamento pode se tornar importante sob condições muito estáveis da atmosfera, que acontecem quando há elevada perda radiativa e vento sinóptico fraco. Nessa situação, escoamentos de drenagem (catabáticos) podem promover advecção de calor escalares. Os trabalhos de Staebler e Fitzjarrald (2004) e Tóta et al. (2008) mostram que escoamentos de drenagem devem ser levados em conta para o balanço de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) em regiões de florestas. Já Amanatidis et al. (1992) mostram que escoamentos catabáticos na bacia de Atenas, na Grécia, podem estar relacionados com eventos severos de poluição do ar na região. Por outro lado, o trabalho de Mahrt et al. (2001) mostra que o escoamento de drenagem acontece quando o ar próximo à superfície se desacopla do escoamento de larga escala na atmosfera, e Fitzjarrald (1986) discute a questão do desenvolvimento de escoamentos catabáticos em um ambiente com ventos alísios de sentido contrário.

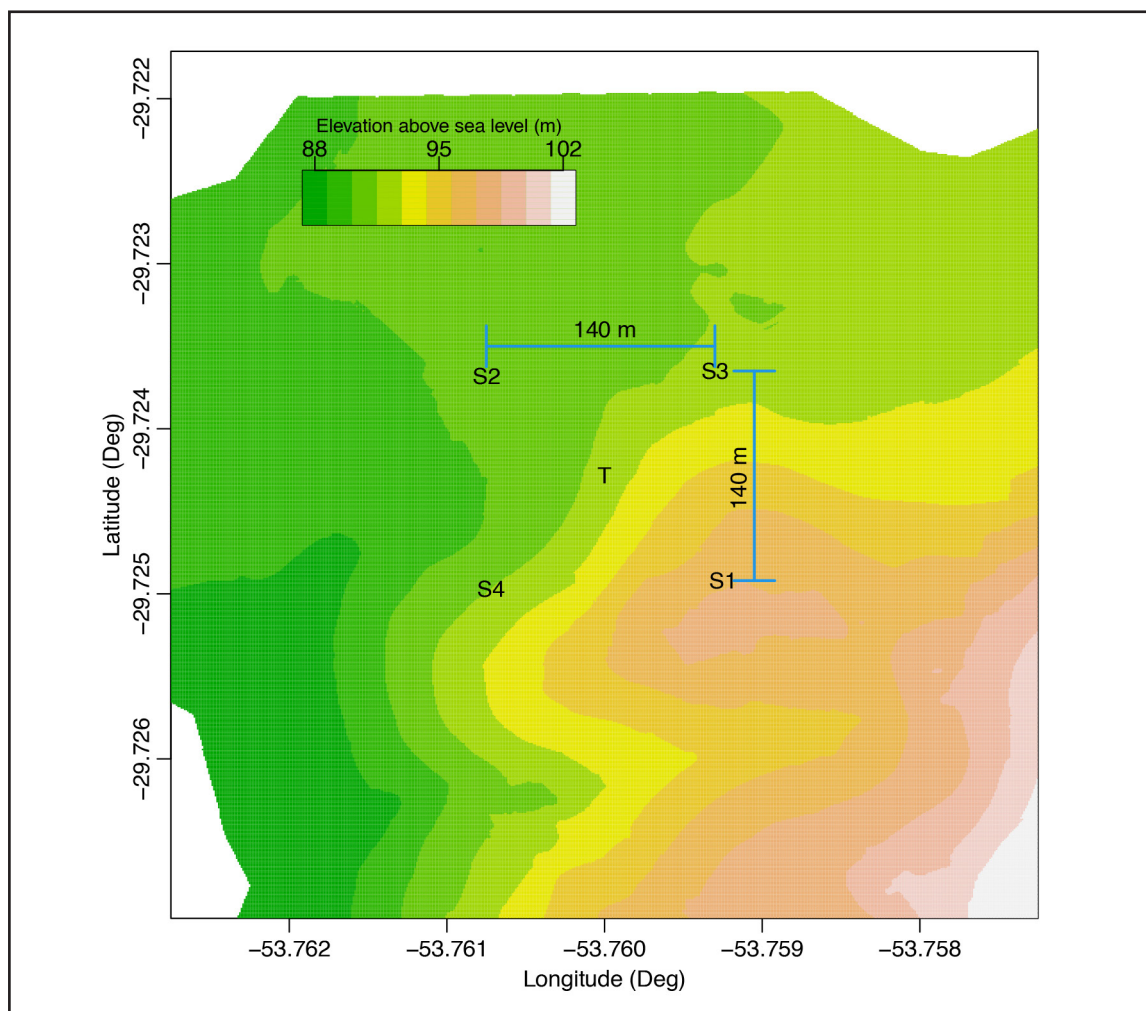
Tendo em vista a possível importância que este tipo de escoamento pode ter na distribuição espacial de calor e demais escalares, devido ao transporte que causam, e mais o fato da complexidade dinâmica envolvida em tais escoamentos, o presente trabalho tem como objetivos investigar e entender a ocorrência de tais escoamentos. O estudo é feito a partir de dados de temperatura, vento e radiação sobre terreno ondulado, com cobertura de superfície composta tipicamente por vegetação de gramíneas (Figura 1).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados utilizados no trabalho correspondem a duas campanhas de observação, sendo a primeira durante o outono do ano de 2015 (Andrades, 2019), onde havia uma torre micrometeorológica de 30 m equipada com dois sensores sônicos, anemômetros tridimensionais e mais três níveis com sensores de temperatura. Em volta da torre,

dispostas em forma de "X", havia quatro plataformas de estações meteorológicas, sendo cada uma com um sônico anemômetro montado 1 m acima da superfície e um sensor de temperatura a 1,5 m. Maiores detalhes podem ser encontrados em Andrades (2019). A segunda campanha corresponde ao período de abril a agosto de 2021.

Figura 1 – Mapa topográfico do sítio de observação. "T" indica posição da torre de 30 m, "S1" da plataforma com o sônico 1, "S2" com o sônico 2, "S3" com o sônico 3, e "S4" com o sônico 4



Fonte: Autores

Nesse período, as quatro plataformas das estações meteorológicas em volta da torre foram eliminadas, mas a torre ganhou 12 (1,5, 3, 5, 7, 9, 11, 14, 17, 20, 23, 26, e 30 m) níveis de altura com medidas de sônicos anemômetros, 15 (0,5, 1, 2,25, 3, 4,

6, 8, 10, 12, 15,5, 18,5, 21,5, 24,5, 28 e 29,5 m) níveis com medidas de temperatura, e dois níveis (3 e 30 m) com medidas de radiação de onda longa ascendente (*upwelling*) e descendente (*downwelling*). O sítio experimental se encontra localizado em zona rural da cidade de Santa Maria, RS, e é caracterizado por terreno ondulado e coberto por gramíneas (vegetação nativa). A Figura 1 mostra a topografia local do sítio, a torre, e as plataformas das estações meteorológicas com os sônicos.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como a Figura 2 mostra, os escoamentos de drenagem no sítio de observação parecem ter espessura menor do que 4 m e envolvem velocidades menores que  $1 \text{ ms}^{-1}$ .

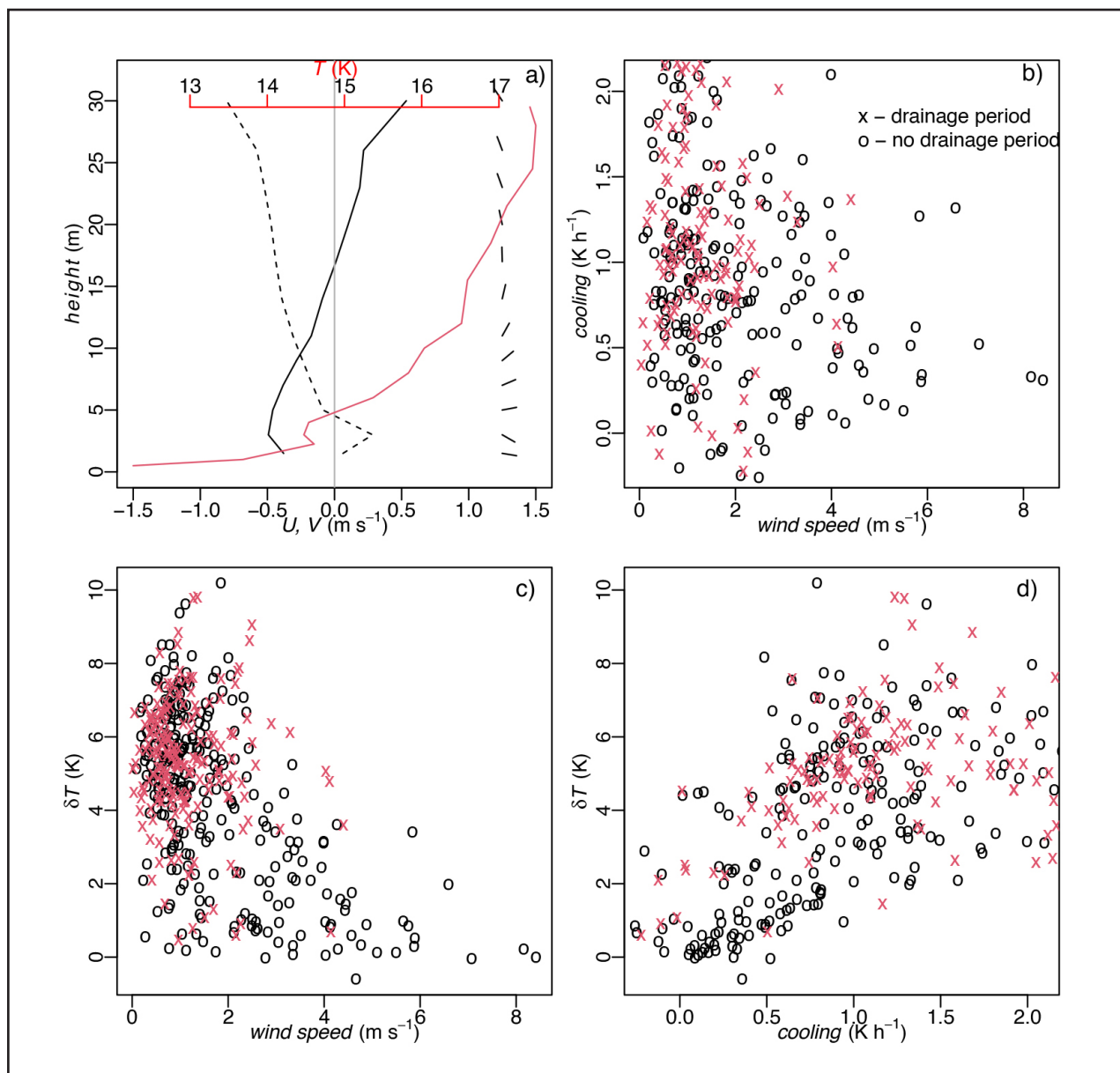
Uma leve diminuição no perfil vertical de temperatura é observada exatamente na região da velocidade máxima desse escoamento. Esses perfis verticais representam média dos eventos encontrados para o período estudado. O claro aumento da temperatura com a altura e a direção predominante de queda do terreno, aproximadamente 135 graus (direção meteorológica), foram utilizados para definir os períodos dos eventos de drenagem.

Em estudo prévio, Andrades (2019) mostrou que a direção do escoamento 3 m acima superfície, na torre, coincidia com ou aproximava-se muito da direção do escoamento em quatro pontos a 100 m de distância da torre. Outra característica desse tipo evento é que a temperatura, no nível da mais baixo da torre (0,5 m) tende a aumentar durante a evolução do evento. Esse tipo de escoamento parece, de fato, ocorrer sob condições de vento de larga escala fraco ( $< 4 \text{ m s}^{-1}$ ), bastante perda radiativa ( $> 0.5 \text{ K h}^{-1}$ ), e com uma diferença de temperatura maior que 2 K. Todavia, sob essas mesmas condições, também há possibilidade deste tipo de escoamento não acontecer, como mostram os painéis da Figura 2b e 2c.

Outro aspecto é que os eventos de drenagem acontecem de forma intermitente (resultado não apresentado). A Figura 2d indica que a inversão térmica está relacionada

com a divergência radiativa na camada da torre, porém nenhuma dessas quantidades foi suficiente para separar os eventos de drenagem dos períodos de não drenagem.

Figura 2 – a) Perfis verticais médios da temperatura (vermelho), componente zonal da velocidade (U – linha preta sólida), componente zonal da velocidade (V – linha preta tracejada); b) magnitude da velocidade do vento em 30 m vs. resfriamento radiativo; c) magnitude da velocidade do vento em 30 m vs. diferença de temperatura entre 0,5 e 29,5 m; d) resfriamento radiativo vs. diferença de temperatura entre 0,5 e 29,5 m



Fonte: Autores

## 4 CONCLUSÃO

Eventos de drenagem de ar frio foram observados sob noites com bastante perda radiativa, inversão térmica pronunciada e ventos de larga escala fracos. Tais escoamentos parecem ter espessura de poucos metros, velocidades menores que  $1 \text{ m s}^{-1}$ , e acontecem de forma intermitente. Vale salientar que a inclinação no local de estudo é inferior a 3 graus. O resultado mostra que uma pequena inclinação, como a do local de estudo, pode ser suficiente para desencadear tal tipo de escoamento. Apesar deste tipo de escoamento acontecer sob condições estáveis da atmosfera e vento sinóptico fraco, valores de inversão térmica, velocidade do vento no topo da torre e divergência radiativa não parecem ser suficientes ou capazes de separar os eventos de drenagem dos períodos em que não ocorre drenagem. Fica como estudo futuro analisar os perfis verticais de fluxo de momentum e calor durante os eventos e períodos em que não há drenagem.

## REFERÊNCIAS

- Amanatidis, G., Papadopoulos, K., Bartzis, J., Helmis, C. (1992). Evidence of katabatic flows deduced from a 84 m meteorological tower in athens, greece. *Boundary-layer meteorology*, 58, 117–132.
- Andrades, M. F. (2019). *Escoamento de drenagem na camada limite planetária estável* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Pampa, Alegrete, RS, Brasil. Recuperado de <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/riiu/5460>
- Fitzjarrald, D. R. (1986). Slope winds in veracruz. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 25(2), 133–144.
- Mahrt, L., Vickers, D., Nakamura, R., Soler, M., Sun, J., Burns, S., Lenschow, D. (2001). Shallow drainage flows. *Boundary-layer meteorology*, 101, 243–260.
- Staebler, R. M., Fitzjarrald, D. R. (2004). Observing subcanopy  $\text{CO}_2$  advection. *Agricultural and Forest Meteorology*, 122(3-4), 139–156.
- Tóta, J., Fitzjarrald, D. R., Staebler, R. M., Sakai, R. K., Moraes, O. M., Acevedo, O. C., Wofsy, S. C., Manzi, A. O. (2008). Amazon rain forest subcanopy flow and the carbon budget: Santarém Iba-eco site. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G1).

## **Contribuições de autoria**

### **1 – Luiz Eduardo Medeiros**

Doutor (2011) em Ciências Atmosféricas, Professor da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete

<https://orcid.org/0000-0002-0805-9571> - [luizmedeiros@unipampa.edu.br](mailto:luizmedeiros@unipampa.edu.br)

Contribuição: Processamento e análise de dados, escrita, e conceituação

### **2 – Maicon Fonseca Andrades**

Mestre em Engenharia, Aluno de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Santa Maria

<https://orcid.org/0000-0002-7953-3330> – [maicon.andrades@gmail.com](mailto:maicon.andrades@gmail.com)

Contribuição: Processamento e análise de dados, e escrita

### **3 – Otávio Costa Acevedo**

Doutor em Ciências Atmosféricas, Professor da Universidade de Oklahoma

<https://orcid.org/0000-0003-2606-4726> – [otavio@ufsm.br](mailto:otavio@ufsm.br)

Contribuição: Escrita e conceituação

### **4 – Débora Regina Roberti**

Doutora em Física, Professora do Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Maria

<https://orcid.org/0000-0002-3902-0952> – [debora@ufsm.br](mailto:debora@ufsm.br)

Contribuição: Escrita e conceituação

### **5 – Thiago Ferreira Gomes**

Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, aluno de Mestrando em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete

<https://orcid.org/0009-0006-1259-846X> – [thiagogomes.aluno@unipampa.edu.br](mailto:thiagogomes.aluno@unipampa.edu.br)

Contribuição: processamento e análise de dados

### **6 – Gilberto Fisch**

Doutor em Meteorologia, Professor Titular da Universidade de Taubaté

<https://orcid.org/0000-0001-6668-9988> – [fisch.gilberto@gmail.com](mailto:fisch.gilberto@gmail.com)

Contribuição: Escrita e conceituação

### **7 – Felipe Denardin Costa**

Doutor em Física, Professor da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete

<https://orcid.org/0000-0003-0004-7100> – [felipecosta@unipampa.edu.br](mailto:felipecosta@unipampa.edu.br)

Contribuição: Escrita e conceituação



## 8 – Rafael Maroneze

Doutor em Física, Professor da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete

<https://orcid.org/0000-0002-3025-9676> – [rafaelmaroneze@unipampa.edu.br](mailto:rafaelmaroneze@unipampa.edu.br)

Contribuição: Escrita e conceituação

### Como citar este artigo

Medeiros, L. E., Andrades, M. F., Acevedo, O. C., Roberti, D. R., Gomes, T. F., Fisch, G., Costa, F. D., & Maroneze, R. (2023) Investigação de eventos de drenagem de ar frio durante a noite sobre terreno ondulado. *Ciência e Natura*, 45(sp. n. 2) e77188. DOI 10.5902/2179460X77188. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/77188>. Acesso em: dia mês abreviado ano.