

## EROSÃO EÓLICA EM MEIO TROPICAL: NUVENS DE POEIRA EM FRANCA-SP

Leonardo Henrique Lemes Bezerra  
Fernando Nadal Junqueira Villela  
Sheila Aparecida Correia Furquim

### RESUMO

O termo erosão pode ser definido como um processo de transporte dos materiais inconsolidados de uma área para outra, sendo o mais comum das áreas mais altas para as mais baixas. A ação eólica é pouco associada a ambientes que não sejam aqueles chamados 'ambientes eólicos' (áridos, desérticos e costeiros) e isto ocorre porque tradicionalmente as pesquisas que tratam da ação plúvio-fluvial são designadas principalmente ao mundo tropical, segregando-as daquelas que tratam da deflação. A premissa deste trabalho partiu de Field, Breshears e Whicker (2009) que publicaram um artigo apontando que a erosão de solos não é um evento exclusivo do vento ou da água, mas que se trata de uma ação conjunta e interativa. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o papel do vento como agente erosivo em meio tropical úmido e subúmido, utilizando o fenômeno de nuvens de poeira que ocorreram em Franca-SP no dia 26 de setembro de 2021 como um estudo de caso. Para análise do fenômeno de nuvem de poeira foram utilizados dados fornecidos pelas estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e aplicadas técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto para interpolação dos dados e origem de índices normalizados. Os resultados demonstraram que a região de Franca possui uma configuração ambiental propícia para liberação de material particulado inconsolidado, estes ficaram expostos ao solo com uso agrícola e condições climáticas/meteorológicas que geraram uma zona turbulenta por considerável período, configuração esta que pode explicar a ocorrência da nuvem de poeira.

**Palavras-chave:** Erosão eólica; Tropical; Nuvens de Poeira; Sensoriamento Remoto.

### Characterization of dust clouds phenomenon occurred in Franca-SP in 2021 using climate data of meteorological stations and remote sensing.

### ABSTRACT

The term erosion can be defined as a process of transport of unconsolidated materials from one area to another, being the most common from higher to lower areas. Wind action is little associated with environments that are not called 'eolian environments' (arid, deserts and coastal) and this occurs because traditionally research that deals with water action is mainly designated to the tropical world, segregating it from those that deal with deflation. The proposal for this work came from Field, Breshears and Whicker (2009) who published an article pointing out that soil erosion is not an exclusive event of wind or water, but that it is a joint and interactive action. The objective of this research was to evaluate the role of wind as an erosive agent in humid and sub-humid tropical environments, using the characteristics of dust clouds that occurred in Franca-SP on September 26, 2021 as a case study. To analyze dust cloud occurrences, data provided by the automatic weather stations of the National Institute of Meteorology (INMET) were used and geoprocessing and remote sensing techniques were applied for data interpolation and origination of normalized indexes. The results revealed that the environmental region of Franca has a favorable configuration for the release of unconsolidated particulate matter, which were exposed to the soil with agricultural use

and climatic/meteorological conditions that generated a turbulent zone for a specific period, a configuration that can explain the occurrence of dust cloud.

**Keywords:** Aeolian Erosion; Tropical; Dust Clouds; Remote Sensing.

### 1. Introdução

O termo erosão pode ser definido como um processo de transporte dos materiais inconsolidados de uma área para outra, sendo mais comum das áreas mais altas para as áreas mais baixas. Quando o vento atua transportando material, dá-se a este fenômeno o nome de “erosão eólica”, que é sinônimo de deflação (FAIRBRIDGE, 1968). Os trabalhos sobre erosão eólica têm crescido enormemente desde as publicações pioneiras do século XVII, atingindo uma média de três publicações por dia no século XXI, segundo Stout et al. (2009). Contudo, nota-se que o estudo da erosão eólica é pouco associado a ambientes que não façam parte dos chamados “ambientes eólicos” (áridos, desérticos e costeiros), pois tradicionalmente as pesquisas que tratam da ação plúvio-fluvial são designadas principalmente ao mundo tropical, segregando-as daquelas que tratam da deflação (GOUDIE et al., 1999).

Os ambientes eólicos tradicionais são aqueles em que o vento é o agente mais atuante na remobilização dos materiais, destacando-se a falta de chuvas, que torna o vento o agente erosivo protagonista no processo de esculturação da paisagem (READING, 1996; BIGARELLA et al., 2003). Todavia, isso não significa que não há ação da deflação em ambientes não eólicos, pois na maioria das vezes os fenômenos eólicos e hídricos parecem ocorrer de forma integrada (FIELD et al., 2009; VISSER et al., 2004; CHAPPELL et al., 2005; SUN, 2002; MUHS et al., 2008; Liang et al., 2020).

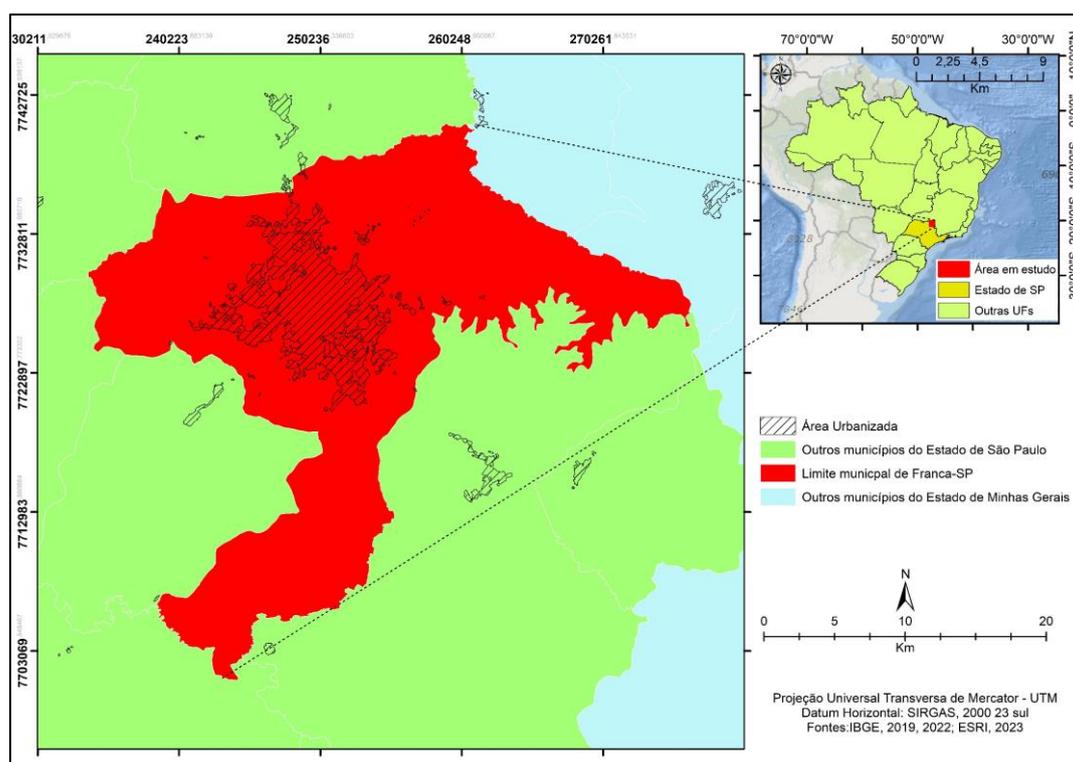
As características ambientais do Sudeste brasileiro são favoráveis para muitos tipos de erosão. O município de Franca, no Estado de São Paulo, por exemplo, tem como bioma predominante o Cerrado, uma vegetação não densa, exceto em áreas marginais à cursos d’água. A região ainda tem um período chuvoso bem definido e uso da terra majoritariamente atribuído à agropecuária, atividade que causa, muitas vezes, exposição sazonal do solo, além de compactação e erosão hídrica por conta do pisoteio do gado.

Além da erosão causada pela água, no ano de 2021 ocorreram nuvens de poeira em partes do sudeste brasileiro, atestando a importância da erosão causada pelos ventos nestas áreas. Em 26 de setembro daquele ano, o fenômeno ocorreu na sede urbana do município de Franca, algo nunca antes registrado para a região. Como estes eventos de nuvens de poeira servem de oportunidade para o aprimoramento do conhecimento científico acerca da erosão eólica no território brasileiro,

este trabalho teve como objetivo descrever, analisar e caracterizar qualitativamente e quantitativamente a causa do fenômeno de poeira ocorrido na sede urbana do município de Franca–SP na data citada.

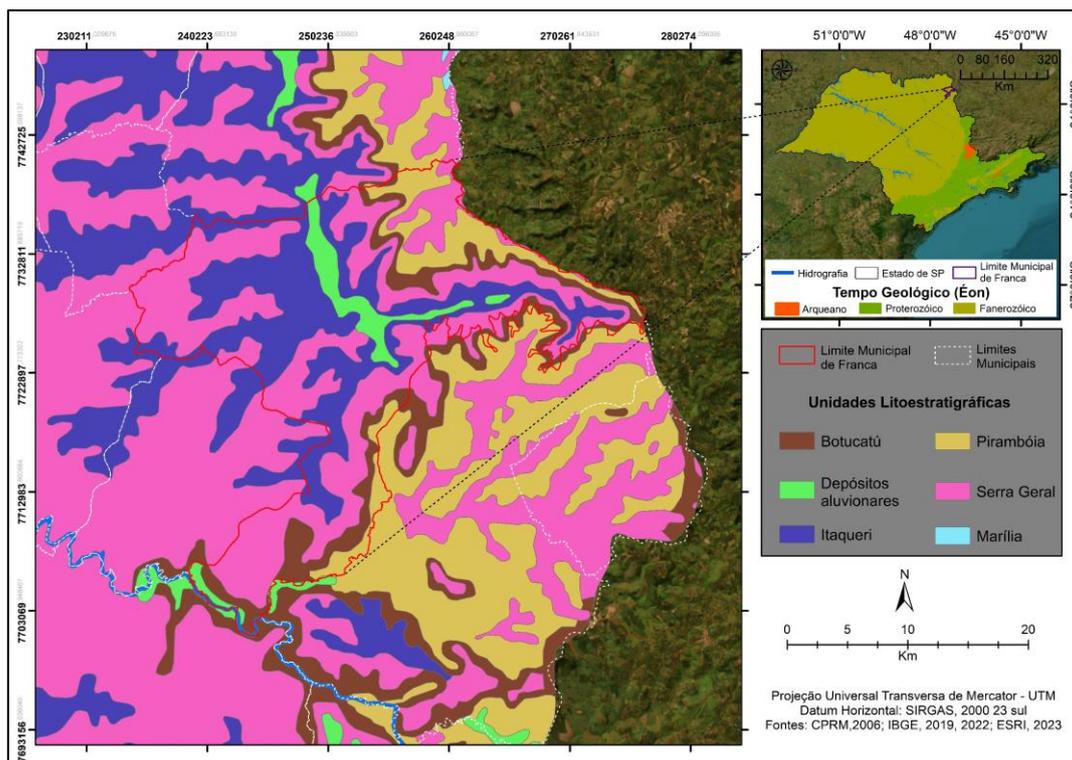
### Caracterização da Área de Estudo

O município de Franca situa-se no nordeste do Estado de São Paulo (SP), mais precisamente nas coordenadas geográficas de latitudes 20°25' a 24°41'S e longitudes 47°08' a 47°33'W (Figura 1). A área do município é de aproximadamente 606 Km<sup>2</sup>, com altitude média de 1.040 metros, sendo inserido na bacia hidrográfica do Rio Sapucaí/Grande, entre as sub-bacias dos rios Canoas e Sapucaí-Mirim (IBGE, 2002).



**Figura 1.** Localização da área de estudo.

A região de Franca-SP contém litologia associada à Era Mesozoica, havendo formações geológicas arenosas (Pirambóia, Botucatu e Itaqueri), formações vulcânicas (Serra Geral) e depósitos aluvionares quaternários (CPRM, 2006) (Figura 2).



**Figura 2.** Geologia da área de estudo, conforme CPRM (2006).

A área de estudo faz parte da morfoestrutura da Bacia Sedimentar do Paraná, na compartimentação geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista (ROSS e MOROZ, 1996). Em escala de maior detalhe, o município de Franca estabelece-se sobre duas morfoesculturas: o Planalto em Patamares Estruturais de Ribeirão Preto, no setor norte e nordeste, e os Planaltos Residuais de Batatais-Franca em quase todo o limite do município (Figura 3). Os Planaltos em Patamares Estruturais de Ribeirão Preto apresentam altitudes entre 650 a 860 metros, já a variabilidade altimétrica dos Planaltos Residuais de Batatais-Franca está entre 860 e 1.070 metros (Figura 4).

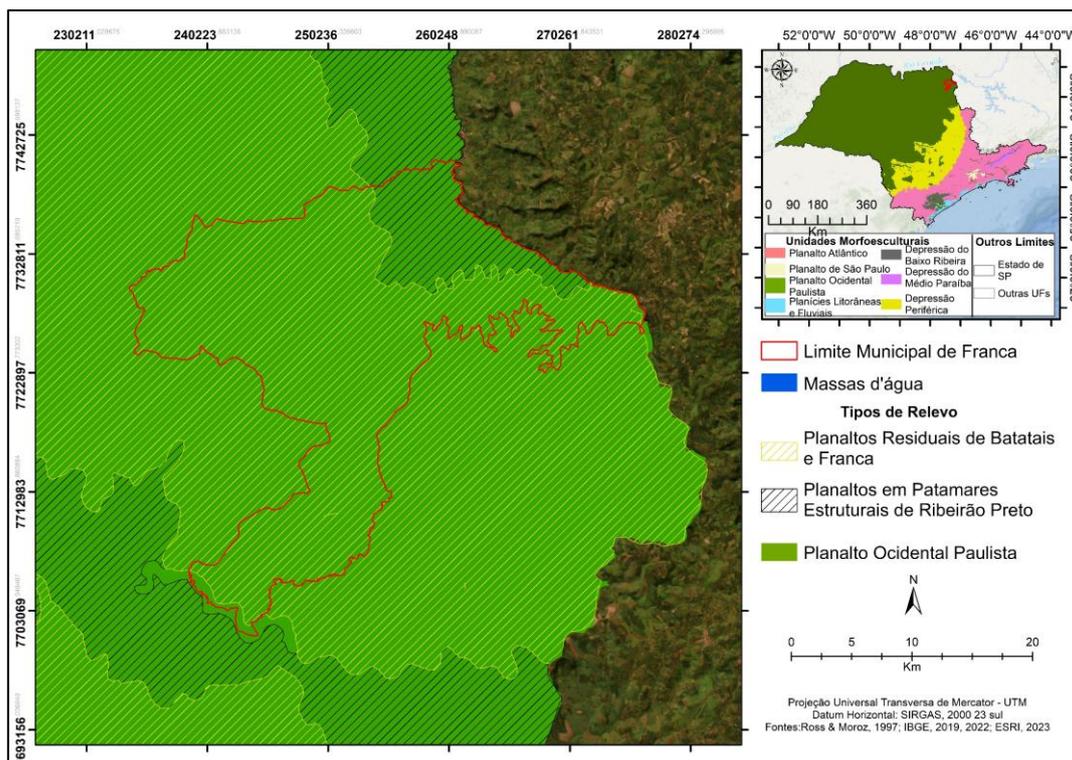


Figura 3. Unidades geomorfológicas na área de estudo, segundo Ross e Moroz (1996).

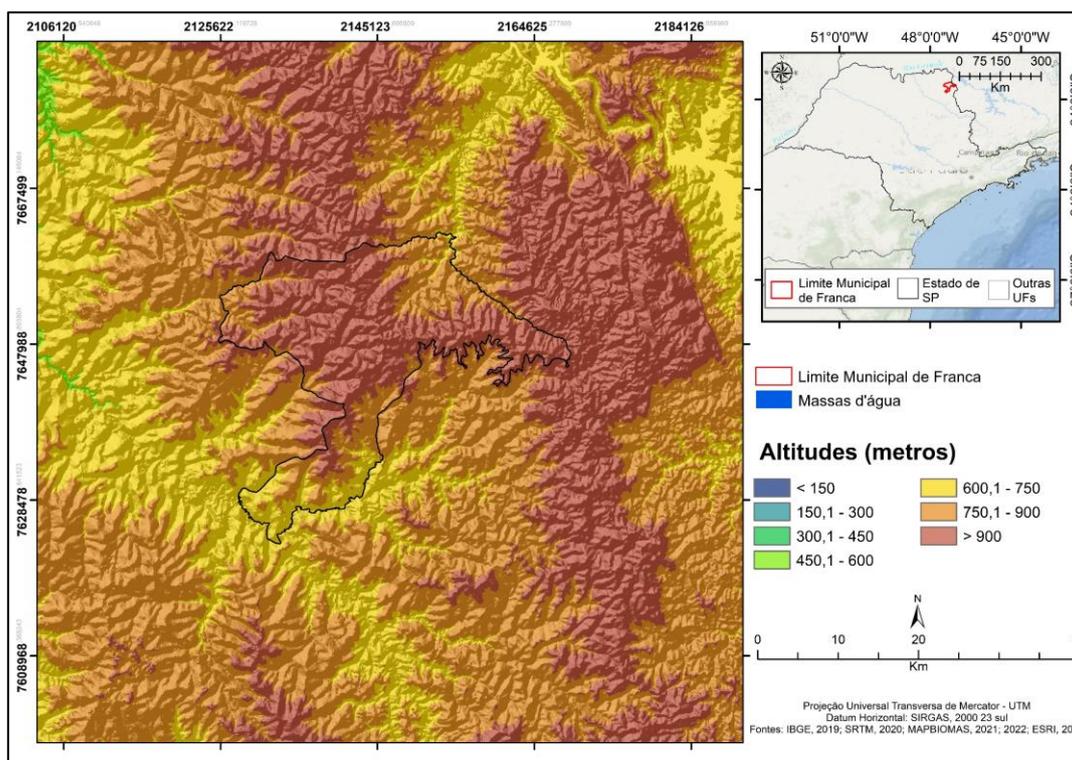
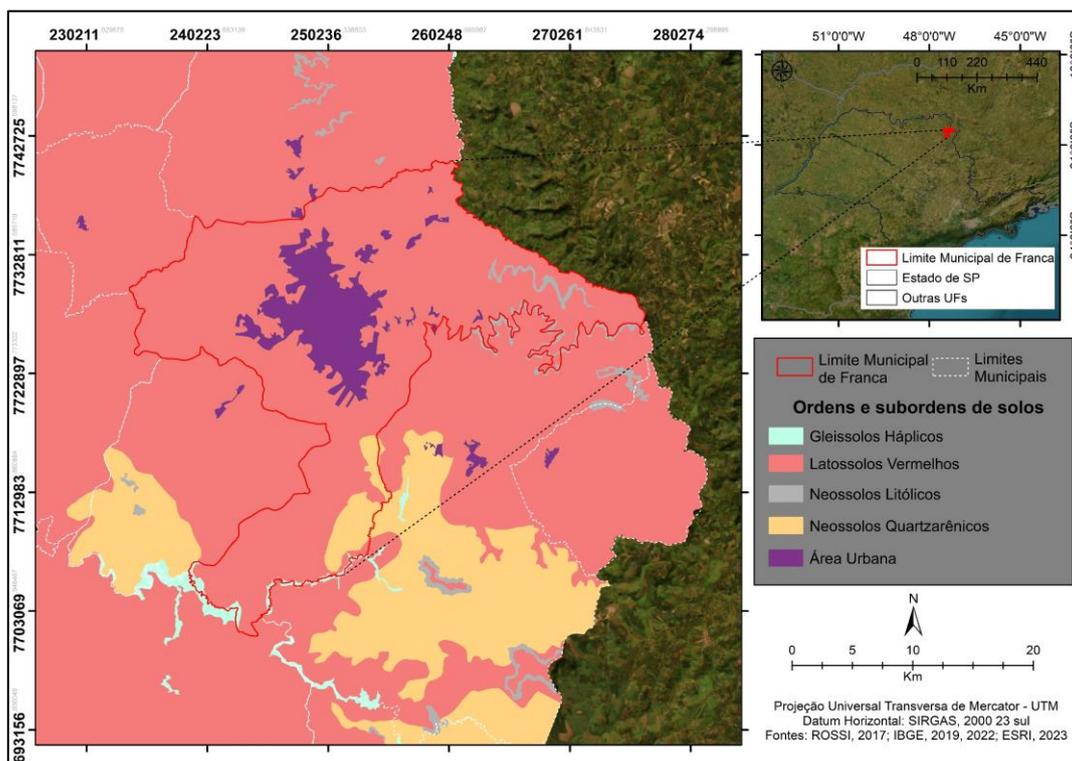


Figura 4. Hipsometria da área de estudo. Fonte: Imagem SRTM.

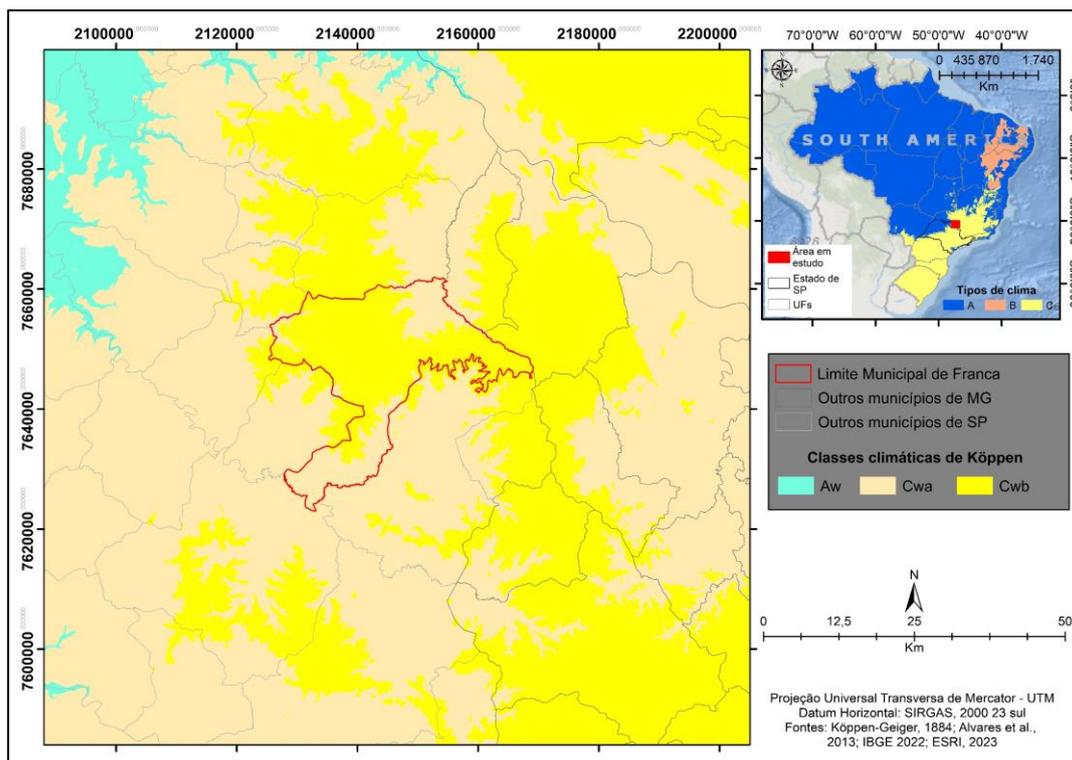
Segundo Rossi et al. (2017), ocorrem duas unidades de solo na área de estudo. Os Neossolos Quartzarênicos encontram-se mais no entorno do município, estendendo-se sobre o sul dos

Planaltos Residuais de Batatais-Franca e no setor central dos Planaltos em Patamares de Ribeirão Preto. Ao norte e ao sul do município ocorrem Neossolos Litólicos, normalmente presentes em localidades de afloramentos rochosos, e finalmente a classe dos Latossolos domina praticamente toda a área de estudo. Às margens do Rio Sapucaí e Rio Grande é possível averiguar a presença se Gleissolos Háplicos (Figura 5).



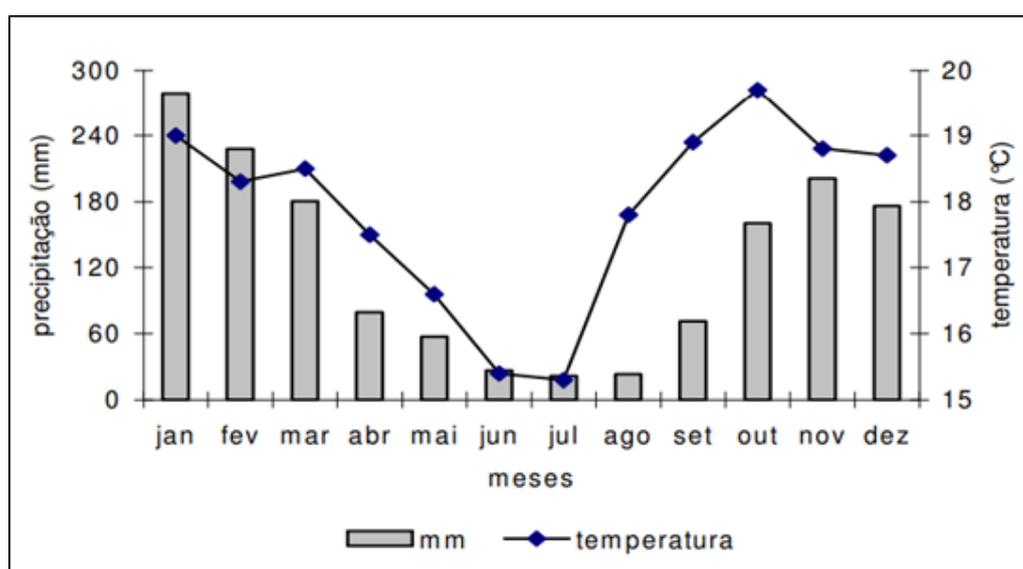
**Figura 5.** Solos presentes na área de estudo, segundo Rossi et al. (2017).

Quanto ao clima, segundo Alvares et al. (2013) a região de Franca está sob os tipos de climas Cwa e Cwb (Figura 6). Os tipos de clima Cwa e Cwb sofrem influência de monções e somente se diferenciam pelo verão quente no Cwa e verão frio no Cwb. O clima Cwb, que ocupa grande parte da região estudada, é muitas vezes descrito como “clima marítimo” ou “temperado oceânico”, sendo caracterizado por ter temperaturas máximas médias dificilmente superiores a 22°C. Em ambos os tipos climáticos as temperaturas mínimas são dificilmente menores que 8°C e as máximas não ultrapassam 29°C.



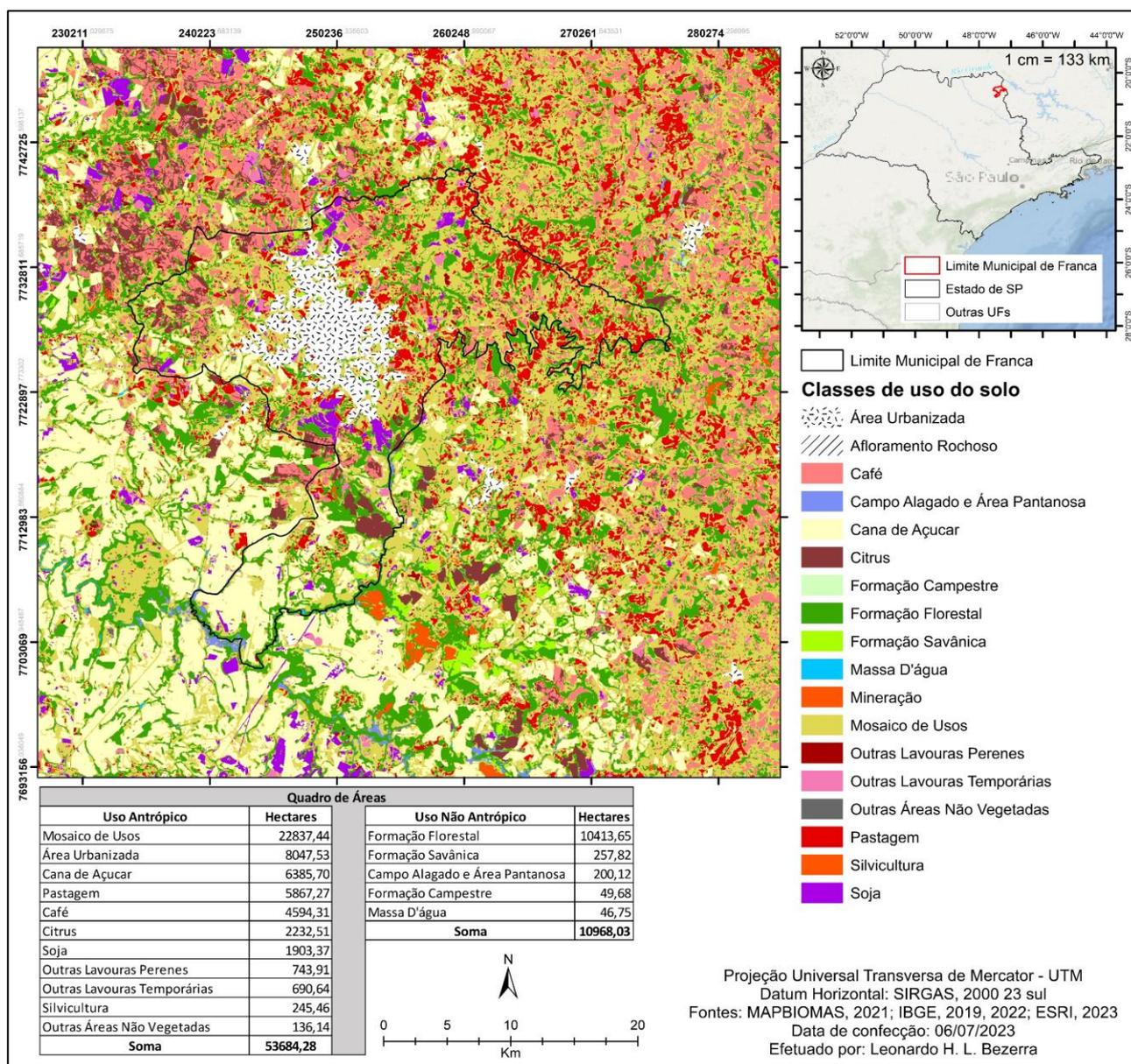
**Figura 6.** Tipos climáticos da área de estudo segundo Alvares et al. (2013).

Na distribuição da pluviometria (Figura 7), verifica-se que o ano hídrico se inicia em setembro. O período de chuva ocorre entre outubro e março, sendo janeiro o mês mais chuvoso, ultrapassando 250 mm. O período mais seco ocorre entre os meses de abril a setembro, sendo os meses de junho e julho os mais secos, podendo, inclusive, existir escassez hídrica (ENDRES et. al. 2006).



**Figura 1.** Distribuição das médias mensais da temperatura (°C) e precipitação (mm) do município de Franca no ano de 1990. Fonte: Endres et al. (2006).

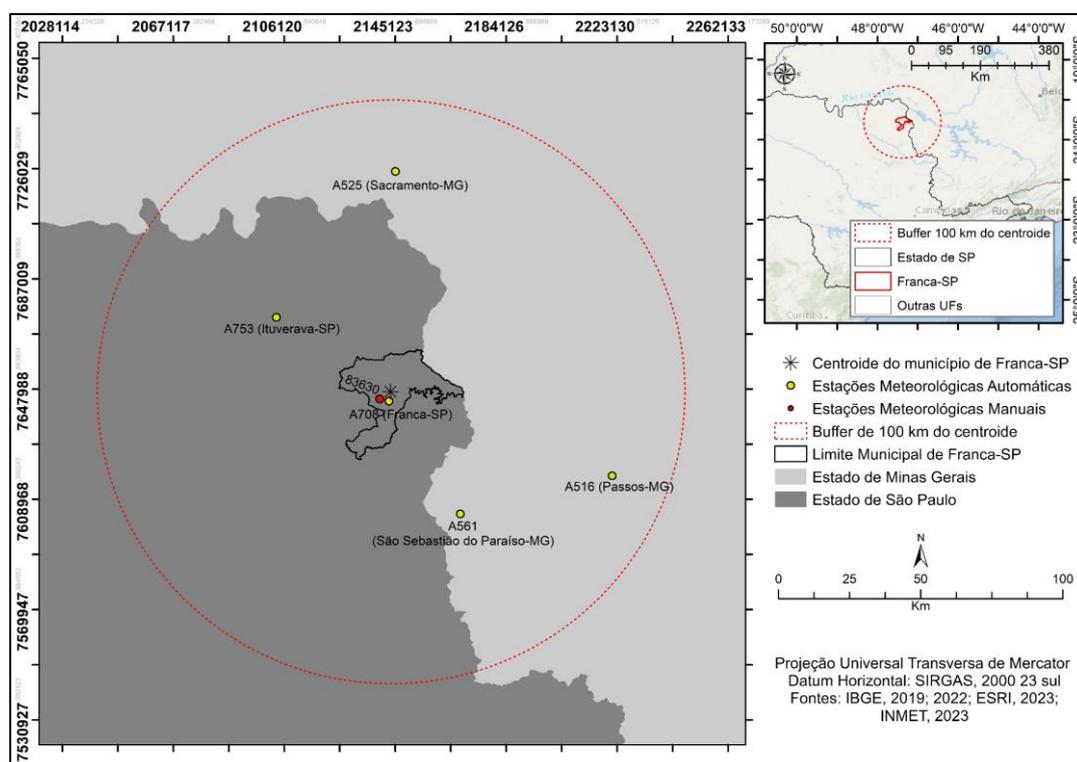
O município de Franca tem a maior parte de sua área ocupada por uso antrópico, visto que a soma das áreas antropizadas é de 53.684,26 ha. Destaca-se a mancha urbana, além das lavouras temporárias e perenes dentro e nos arredores do município, como cana de açúcar e café. As outras áreas classificadas como não antropizadas (formações florestais, campestres e massas d'água) somam 10.968,03 ha (Figura 8).



**Figura 2.** Uso da terra na área de estudo, segundo o MapBiomas (2021).

## Procedimentos Operacionais

Para análise do fenômeno meteorológico contemplado, foram utilizados dados fornecidos pelas estações meteorológicas automáticas (EMAs) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram aplicadas as seguintes técnicas de geoprocessamento para a seleção das estações meteorológicas utilizadas: a) espacialização das estações meteorológicas (utilizando as coordenadas disponibilizadas pelo INMET); b) apontamento do centroide do município de Franca - SP ; e c) criação de buffer de 100 quilômetros a partir do centroide do município, raio escolhido por abranger satisfatoriamente os compartimentos geomorfológicos presentes na área de estudo (Figura 9 e Tabela 1).



**Figura 9.** Estações Meteorológicas Automáticas utilizadas para análise. Fonte: INMET (2023).

Estações Automáticas (INMET)					
Cidade sede	Estado	Situação	Altitude (m)	Data de início de funcionamento	Código da Estação
São Sebastião do Paraíso	MG	Operante	845,00	16/08/2015	A561
Passos	MG	Operante	781,70	15/07/2006	A516
Franca	SP	Operante	1002,74	11/12/2002	A708
Ituverava	SP	Operante	610,58	16/07/2008	A753
Sacramento	MG	Operante	913,12	18/08/2006	A525

**Tabela 1.** Estações Automáticas selecionadas para análise. Fonte: INMET (2023).

Foram selecionadas as seguintes variáveis climáticas para análise: umidade relativa do ar (UR), temperatura (temp.), pluviometria (pluv.), velocidade do vento (vel. vent.) e direção predominante do vento (dir. vent.). Dentre todas as variáveis disponibilizadas pelo INMET, estas são as que melhor demonstram correlação com a velocidade e direção do vento conforme pesquisas anteriores (FIELD et al., 2009).

A produção dos resultados para análise ocorreu em escala horária, averiguando-se os dados horários entre duas horas antecedentes ao evento e duas horas posteriores ao evento (entre as 15:00 e 19:00 horas), pois conforme as informações coletadas por moradores locais e pela divulgação dos noticiários, o evento ocorreu às 17:00 horas de 26/09/2021.

Nesta pesquisa foram utilizados dois métodos de interpolação dos dados climáticos: a “Krigagem” (utilizando os padrões previamente estabelecidos pelo software Arcgis Pro) e “*Inverse Distance Weighting*”. O uso de mais de uma técnica de interpolação foi necessário pela natureza e distribuição dos conjuntos de dados analisados, e a melhor espacialização dos dados modelados não obedeceu a um único modelo matemático (Tabela 2).

Variáveis climáticas	Técnica para interpolação
Temperatura e Pressão	Krigagem
Umidade e Pluviometria	IDW
Velocidade e Direção do Vento	Krigagem

**Tabela 2.** Sobreposição de variáveis e técnicas utilizadas para interpolação.

Na interpolação entre os dados de temperatura e pressão, a estação de Sacramento foi desconsiderada nas horas 17, 18 e 19 pela ausência de dados. Pelo mesmo motivo, na sobreposição entre os dados de umidade e pluviometria, a estação de Ituverava foi desconsiderada para a variável precipitação, e os dados da estação de Sacramento em ambas as variáveis somente foram utilizados nas medições de 15 e 16 horas, pois os horários restantes não foram mensurados. Por fim, na interpolação e sobreposição dos dados de direção e velocidade do vento, a estação de Sacramento apenas mensurou dados para as 15 e 16 horas, portanto, nos outros horários a estação foi desconsiderada. Destaca-se, ainda, que a estação de São Sebastião (A561) teve que ser inteiramente desconsiderada pela ausência de dados.

Por fim, foram efetuados os cálculos do índice de vegetação de diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) e do Índice de Água de Diferença Normalizada (*Normalized*

*Difference Water Index – NDWI*). Para estes índices foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8 mais próximas da data do evento (antes e depois do evento). O NDVI é um indicador gráfico amplamente utilizado em estudos ambientais para identificação de existência ou não de vegetação, cujo cálculo é demonstrado por:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{Infravermelho próximo} - \text{Vermelho}}{\text{Infravermelho próximo} + \text{Vermelho}}$$

Deste modo, para o cálculo do NDVI utiliza-se das seguintes faixas do espectro de ondas eletromagnéticas: 0.64 a 0.67  $\mu\text{m}$  (luz vermelha) e 0.85 – 0.88  $\mu\text{m}$  (infravermelho próximo). Como resultado da técnica, observaram-se valores para cada pixel que variaram de -1 a 1, sendo os valores de -1 a 0 oriundos majoritariamente de áreas não vegetadas ou indivíduos arbustivos não vivos. Entre 0.1 e 0.33 observaram-se plantas vivas, porém não saudáveis (ex: indivíduos com estresse hídrico). Entre os valores de 0.34 e 0.66 foi comum observar vegetação moderadamente saudável ou em regeneração. Valores acima de 0.66 representaram vegetação saudável (DUAN, 2017).

O NDWI também é um indicador gráfico e é utilizado para destacar o teor de umidade em parcelas do solo ou superfície terrestre. Este índice é obtido a partir do cálculo:

$$\text{NDWI} = \frac{\text{Verde} - \text{NIR}}{\text{Verde} + \text{NIR}}$$

Deste modo, para o cálculo do NDWI utiliza-se das seguintes faixas do espectro de ondas eletromagnéticas: 0.53 a 0.59  $\mu\text{m}$  (luz verde) e 0.85 – 0.88  $\mu\text{m}$  (infravermelho próximo). Os resultados, tal como no NDVI, geram pixels com valores de -1 a 1 e quanto menor o valor, menor a umidade da superfície. Quando não associados à vegetação, é comum classificar pixels com valores  $\leq 0$  como “não água”, e pixels com valores  $>$  que 0 com algum teor de umidade.

## Resultados

Como pode ser averiguado na Figura 10 e Tabela 3, as estações registraram, entre as 15 e 19 horas do dia 26/09/21, um aumento na temperatura. Especificamente na região de Franca-SP, o horário das 17h, coincidente com a ocorrência das nuvens de poeira, registrou a maior temperatura (27,15°C) desta estação. Contudo, a estação de Franca tende a registrar as menores temperaturas dos arredores. A pressão atmosférica sofreu pouca variação para mais ou para menos, havendo um decréscimo mais considerável na estação de Passos-MG A516 (1016,74 mbar), demarcando um

gradiente em relação a Franca-SP de 3,07 mbar. Em Franca, observou-se que a pressão atmosférica no horário do evento ficou em valores próximos a 1020,00 mbar.

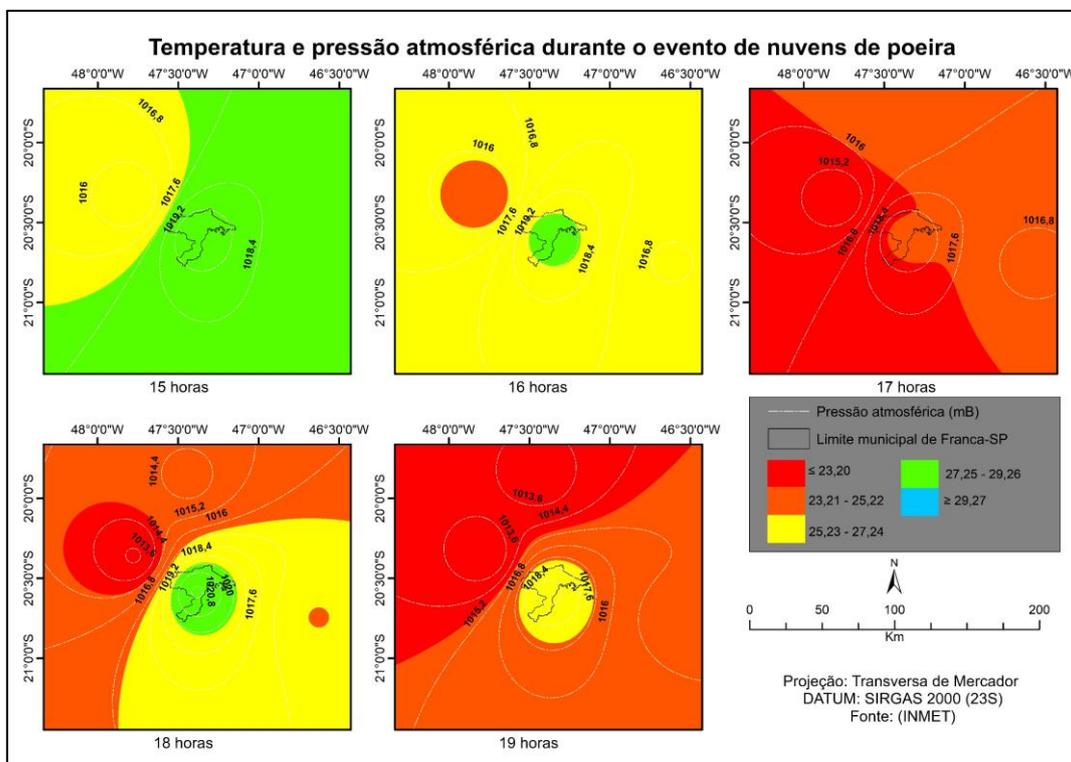
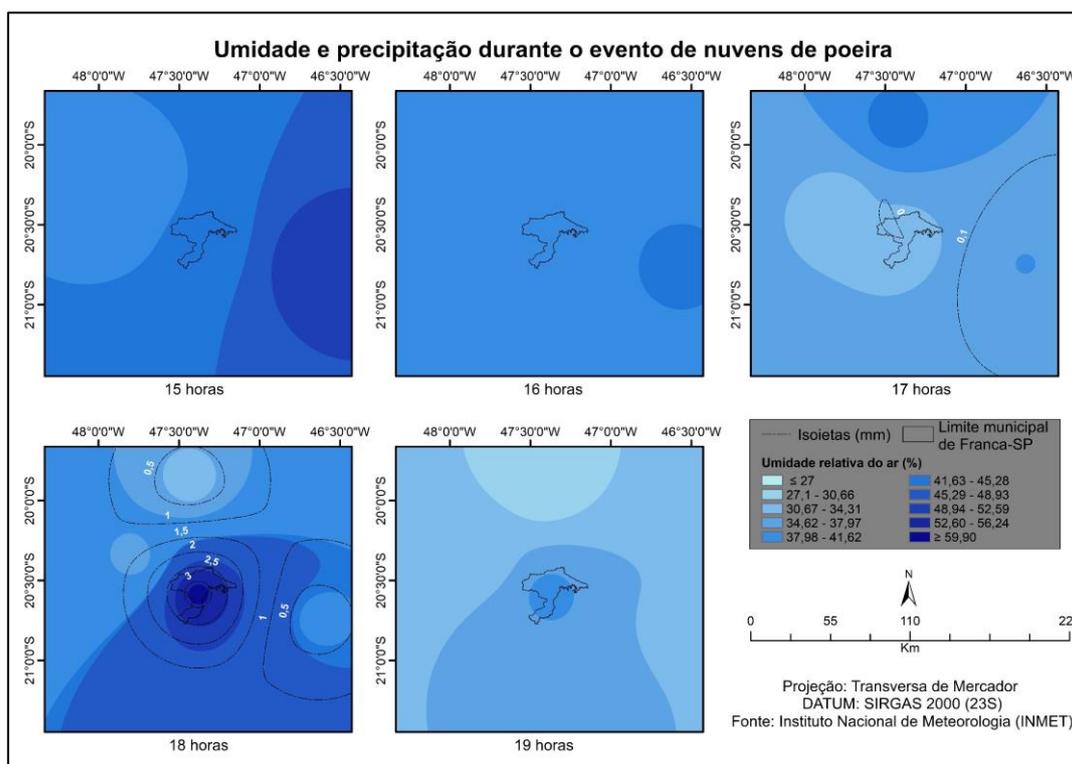


Figura 10. Temperatura e pressão no momento do evento. Fonte: INMET.

Temperatura horária (°C)					
Estação	15 horas	16 horas	17 horas	18 horas	19 horas
Passos - MG (A516)	23,20	25,45	27,15	27,25	28,40
Sacramento - MG (A525)	-	-	25,30	28,55	31,05
Franca - SP (A708)	23,30	24,95	27,15	23,65	25,75
Ituverava - SP (A753)	27,05	27,65	29,35	31,00	31,30
Pressão atmosférica horária (mb)					
Estação	15 horas	16 horas	17 horas	18 horas	19 horas
Passos - MG (A516)	1017,72	1016,74	1016,71	1016,12	1014,98
Sacramento - MG (A525)	-	-	1016,52	1014,14	1013,16
Franca - SP (A708)	1019,84	1019,81	1019,20	1020,87	1018,65
Ituverava - SP (A753)	1015,39	1015,21	1014,52	1013,52	1012,92

Tabela 3. Dados de temperatura e pressão no dia do evento das nuvens de poeira (26/09/21). Fonte: INMET.

Na Figura 11 e Tabela 4 observa-se que não houve precipitação nas horas antecedentes ao evento. Contudo, havia um considerável percentual de umidade na região às 15 horas, sendo que o maior percentual de umidade registrado para este horário ocorreu na estação A516 (52%) e o menor percentual na estação A753 (39%). Igualmente, nenhuma chuva foi registrada às 19 horas, isto é, após a ocorrência das nuvens de poeira no dia 26/09/21.



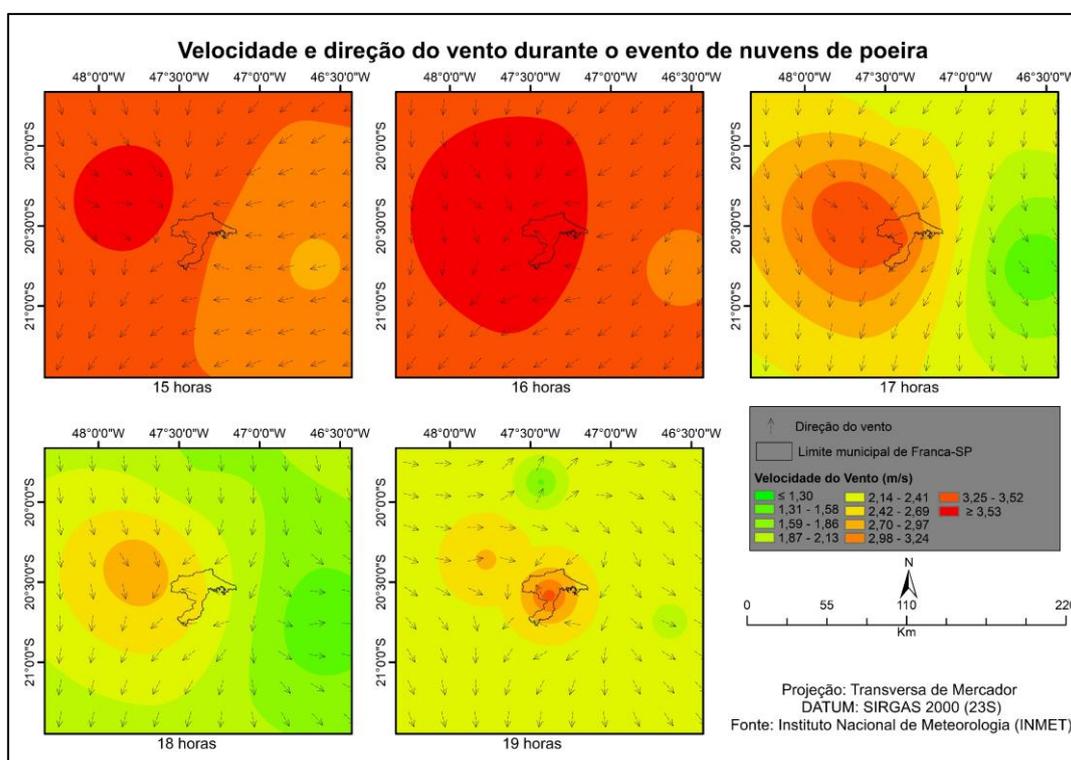
**Figura 11.** Umidade relativa do ar e pluviometria no momento do evento. Fonte: INMET.

Umidade relativa do ar horária (%)					
Estação	15 horas	16 horas	17 horas	18 horas	19 horas
Passos - MG (A516)	52	42	38	41	34
Sacramento - MG (A525)	-	-	43	29	27
Franca - SP (A708)	43	39	33	57	39
Ituverava - SP (A753)	39	39	33	33	33
Pluviometria horária (mm)					
Estação	15 horas	16 horas	17 horas	18 horas	19 horas

Passos - MG (A516)	0	0	0,2	0	0
Sacramento - MG (A525)	-	-	0	0	0
Franca - SP (A708)	0	0	0	3,4	0
Ituverava - SP (A753)	-	-	-	-	-

**Tabela 4.** Dados de umidade relativa e pluviometria no dia do evento das nuvens de poeira (26/09/21). Fonte: INMET.

A velocidade e a direção do vento no momento do evento são demonstradas na Figura 12 e na Tabela 5. Às 15 e 16 horas é verificável que toda a área em estudo teve ventos com velocidades superiores a 2,5 m/s, com ventos de Nordeste. As 17 horas, é perceptível um padrão de diminuição das velocidades dos ventos, que assumem direções mais a Norte. O ponto de confluência dos ventos manteve-se no limite Noroeste do município de Franca-SP. Uma hora após o início do evento de nuvens de poeira, o núcleo de maiores ventos que sobrepuseram Franca aparenta dissipar-se e os ventos tendem a perder velocidade (diminuindo para 2,7 e 3,0 m/s).

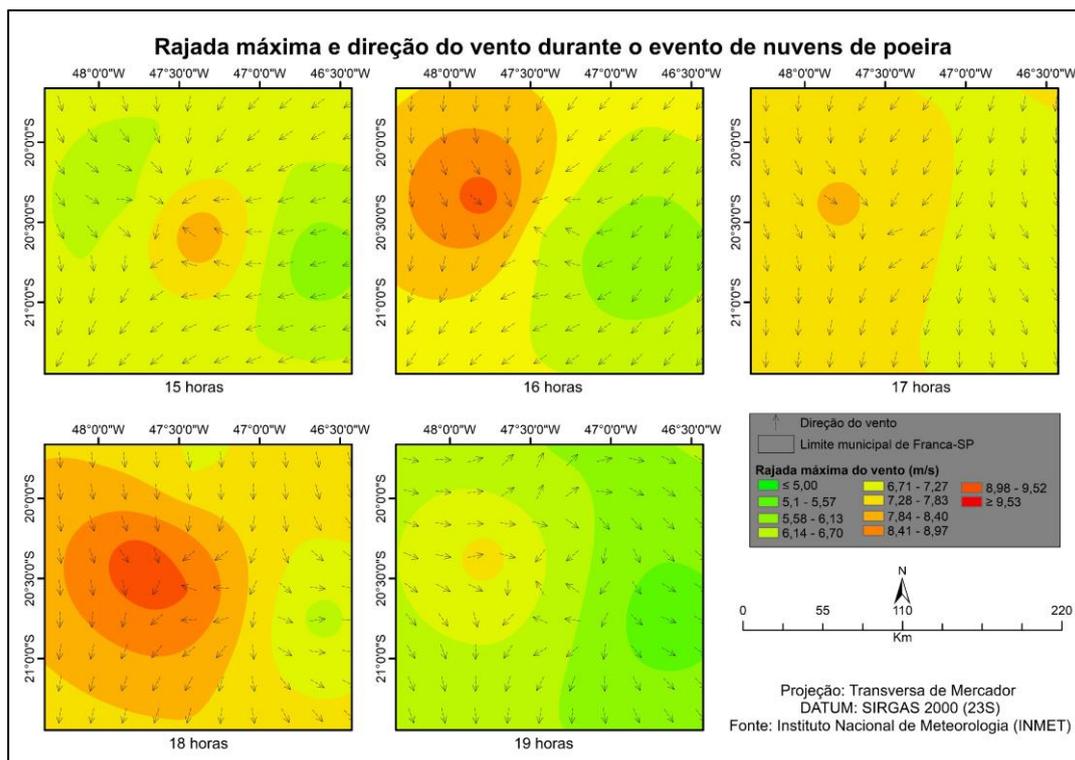


**Figura 12.** Velocidade e direção do vento no momento do evento. Fonte: INMET.

Velocidade do vento horária (m/s)					
Estação	15 horas	16 horas	17 horas	18 horas	19 horas
Passos - MG (A516)	2,9	2,8	1,3	1,3	1,9
Sacramento - MG (A525)	-	-	2,4	1,9	1,5
Franca - SP (A708)	3,3	3,8	3,3	2,5	3,4
Ituverava - SP (A753)	3,7	3,8	3,5	2,9	2,8
Direção do vento horária (º)					
Estação	15 horas	16 horas	17 horas	18 horas	19 horas
Passos - MG (A516)	77	24	320	262	292
Sacramento - MG (A525)	-	-	21	352	197
Franca - SP (A708)	132	134	75	116	162
Ituverava - SP (A945,50)	270	309	301	324	255

**Tabela 5.** Dados de velocidade e direção do vento no dia do evento das nuvens de poeira (26/09/21). Fonte: INMET.

A Figura 13 e a Tabela 6 demonstram as rajadas máximas registradas pelas EMAs em análise em sobreposição com a direção do vento. Às 15 horas é verificável que as maiores rajadas foram anotadas pela estação A708 de Franca-SP (8,3 m/s). Às 16 horas as rajadas máximas de Franca-SP diminuíram para 6,6 m/s, com maior velocidade na Estação A753 (Ituverava), que registrou uma rajada de 10,1 m/s. Uma hora após o evento, às 18 horas, as rajadas aumentaram em quase todas as estações, exceto na Estação A525 (Sacramento), que demonstrou um valor 0,1 m/s menor que na hora anterior. Em Franca-SP, foi registrada uma rajada de 8,9 m/s, a maior dentre os horários analisados. Por fim, às 19 horas, houve a diminuição nos valores de rajadas em todas as EMAs.



**Figura 13.** Rajadas máximas do vento no momento do evento. Fonte: INMET.

<b>Rajada máxima</b>					
<b>Estação</b>	<b>15 horas</b>	<b>16 horas</b>	<b>17 horas</b>	<b>18 horas</b>	<b>19 horas</b>
Passos - MG (A516)	5,6	5,8	5,8	6,5	5
Sacramento - MG (A525)	-	-	7,4	7,3	6,2
Franca - SP (A708)	8,3	6,6	7,6	8,9	6,6
Ituverava - SP (A753)	6,7	10,1	9,2	9,3	7,7

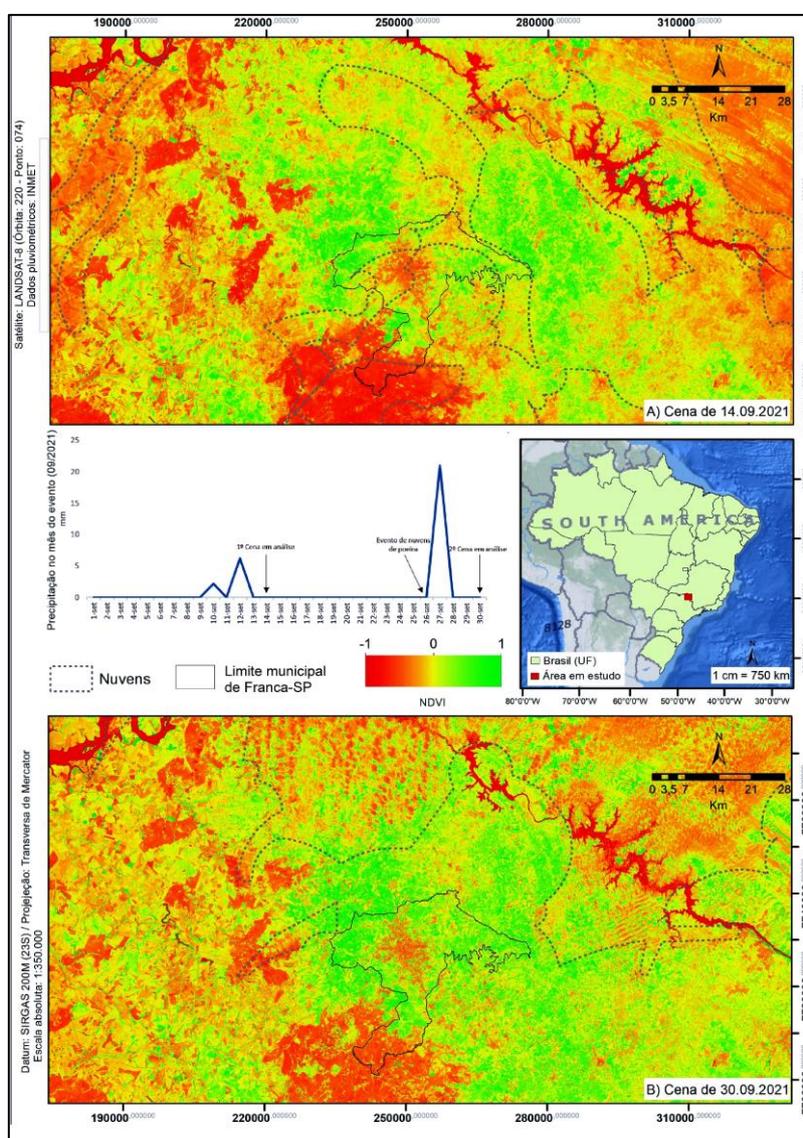
**Tabela 6.** Dados de rajadas máximas dia do evento das nuvens de poeira (26/09/21). Fonte: INMET.

Além dos dados meteorológicos, foram analisados os produtos de índice de diferença de vegetação e água normalizada de imagens Landsat 8 (das datas de 14 e 30 de setembro de 2021), próximos à data do evento de nuvens de poeira.

Com o resultado do NDVI (Figura 14) é possível notar uma parcela de valores negativos (de coloração mais avermelhada) no centro de Franca-SP, que corresponde à mancha urbana do município. Circundando o município de Franca é observável uma faixa de valores positivos (de coloração esverdeada) que abrangem os setores noroeste, norte, nordeste e leste próximos ao município. Esta faixa não aparenta ter modificações entre as cenas de 14/09/2021 e 30/09/2021.

Fica nítida a existência de valores negativos na cena “A” que tendem a se amenizar (se aproximar de valores neutros próximos a 0) na cena “B”. Na parte sul do município de Franca verificou-se a existência de uma notável mancha de valores negativos que tendem a diminuir na cena “B” como nas outras partes de valores negativos. Esta referida mancha de valores negativos pode ser atribuída à presença de uma área com predominância do plantio de cana de açúcar. Conforme o calendário agrícola sugerido pela companhia nacional de abastecimento, setembro é um mês sugerido para a colheita e deste modo, o solo estaria exposto (CONAB, 2022).

O contato entre áreas de valores negativos e valores positivos que ocorre dentro do município de Franca, sendo o conglomerado urbano (com valores negativos) cingido de áreas com valores acima de zero, gera um contato entre microclimas, cenário favorável para zonas turbulentas.



**Figura 14.** NDVI das cenas do satélite Landsat 8 próximas a do evento de nuvens de poeira.

Na análise de NDWI observou-se sensibilidade a estruturas construídas e áreas plantadas, o que requereu cautela quanto aos dados obtidos, ainda que tenha ocorrido alta performance na discriminação de massas d'água e ambientes alagados (Figura 15). Nota-se que no centro do município de Franca, onde nos produtos de NDVI (Figura 14) foram observados valores negativos (avermelhados), nesta se observam valores positivos. Isto se deve à presença de estruturas construídas (urbanas) que não devem ser interpretadas como uma área úmida ou pantanosa.

É também notável no centro urbano de Franca a presença de áreas com valores negativos de NDWI em padrão espacial parecido com o padrão apresentado na análise de NDVI. Ainda, nota-se que estes valores negativos de NDWI não apresentam considerável variação entre a cena A e B, e, portanto, é razoável considerar que a precipitação ocorrida em 26 de setembro de 2021 não teve grande relevância para os resultados na utilização deste índice. Assim, a quase nula alteração no índice de NDWI anterior e posterior ao evento pode ser explicada pela presença de ocupação antrópica em grande parte da cena.

Há, entre as cenas A e B, uma mudança relevante no setor nordeste, com existência de uma mancha de valores positivos (azulados) na cena A, que diminuem notadamente na cena B. Esta alteração pode ser explicada pela existência de nuvens do tipo "Cirrus" na cena A que, quanto às técnicas de fotointerpretação, são de difícil mapeamento, pois estas se fazem presentes através de sua umidade e em muitas ocasiões não apresentam reflectância no espectro visível em suas extremidades. Desse modo, as extremidades não mapeadas por fotointerpretação podem influenciar nos resultados do índice NDWI. Na cena B, estas nuvens aparentemente não se fazem presentes na mesma densidade que na cena A, e, portanto, as mudanças para níveis abaixo de zero no NDWI podem estar diretamente ligadas a esta causa.

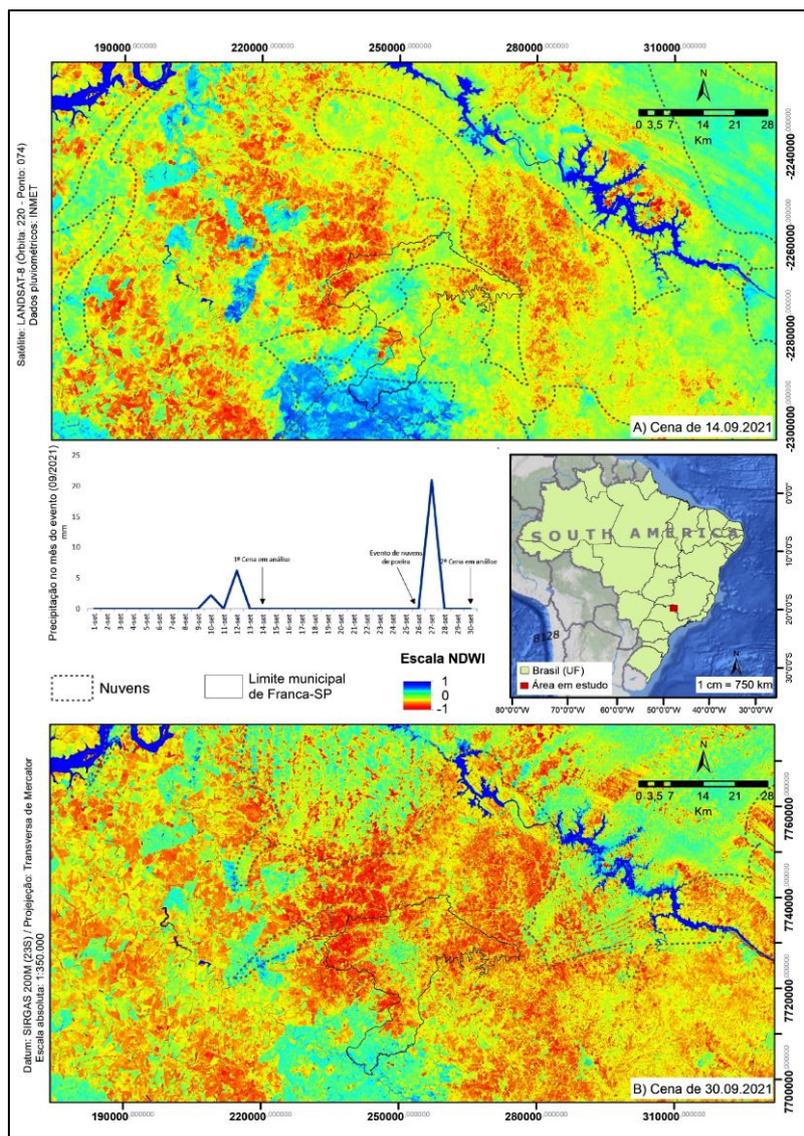


Figura 15. NDWI das cenas do satélite Landsat 8 próximas a data do evento de nuvens de poeira.

## Discussão

Apesar dos valores de pressão atmosférica apresentarem pequena variação na área de estudo, registrou-se maior gradiente entre os municípios paulistas de Franca (ao centro) e Ituverava (a noroeste). Quanto a temperatura, a estação A708 (Franca), na área de ocorrência das nuvens de poeira, demonstrou menores temperaturas dentre todas as estações analisadas, também com maiores diferenças entre Franca e Ituverava. Ainda, averiguou-se a maior quantidade de águas pluviais o período analisado na região de Franca, mas com diferenças muito pequenas em relação a de outras estações meteorológicas.

Na estação A708 (Franca) as velocidades do vento foram mais tímidas quando comparadas ao norte da área de estudo (Sacramento-MG), ou mesmo a noroeste (Ituverava-SP). Na data do evento das nuvens de poeira, é observável que a média de velocidade do vento em Ituverava-SP nas duas horas anteriores ao evento em nenhum momento foi menor que 3,7 m/s. É importante notar, contudo, que a direção dos ventos em Franca-SP era de noroeste, o que torna possível considerar que as fortes rajadas ocorridas em Ituverava (acima de 10 m/s), a uma hora antes do evento de nuvem de poeira em uma zona perceptivelmente turbulenta (Figura 10 e tabela 3) tenham retirado os materiais particulados, colóides e agregados dos Latossolos Vermelhos da região nas áreas de solo exposto, fazendo com que a poeira em estado de repouso no setor ao noroeste de Franca tenha dado origem às nuvens de poeira. Além disso, este setor mencionado denotou contato entre valores positivos e negativos de NDVI, conforme demonstrado na Figura 15, setor este com grande presença de culturas anuais em um momento de entressafra, ou seja, muito provavelmente com solo exposto. Os Latossolos são ricos em materiais que, quando expostos a ambientes secos por longo período, tendem a ressecar e desagregar, ainda mais em períodos de estresse hídrico, como é o caso, reforçando a possibilidade destes serem fonte dos materiais particulados disponíveis para a deflação durante o período de secas (BUOL, 2011; BIGHAM, 2002, FITZPATRICK & SCHULZE, 2002). Todo este cenário ocorreu sob o Planalto Ocidental Paulista e no contato entre as unidades litoestruturais Itaqueri e Serra Geral, caracteristicamente transicionais entre sedimentos continentais e materiais mais maciços respectivamente, o que reforça a atuação da deflação.

Ao serem verificadas as razões para a ocorrência do evento analisado tipicamente turbulento, lembra-se que, para remover materiais particulados da superfície em seu momento de repouso, é necessário que haja um significativo movimento descendente do ar em velocidade mínima conforme apontado por Livingstone e Warren (2019), e é neste sentido que aqui se argumenta que este momento de turbulência ocorreu entre 15 e 16 horas do dia 26 de setembro de 2021, ou seja, uma ou duas horas antes do evento de nuvens de poeira ser nitidamente perceptível. Esta zona turbulenta ocorreu no setor noroeste do município de Franca-SP (em direção a Ituverava-SP), sugerindo que os maiores gradientes de pressão e as rajadas mais velozes ocorreram entre as 15 e 16 horas desta data, sendo o maior gradiente de temperatura e pressão entre as estações A708 e A753, com rajadas de vento mais velozes em Ituverava-SP. Neste sentido, o vento medido pela estação de Franca possui predominância de norte/noroeste (em todos os horários analisados), e, no setor noroeste deste município é observável uma zona de confluência que se manteve por todos os horários.

No momento principal em que a nuvem de poeira ganhou maior pujança, segundo relatos locais (às 17 horas de 26/09/2021), não se averiguam maiores velocidades de ventos ou gradientes de temperatura e pressão, pois o ambiente tende a manter equilíbrio e estabelecer menor turbulência. Isto é plausível e deveria acontecer para que as nuvens de poeira se mantivessem por tempo mínimo, pois, em caso de grandes rajadas e turbulência significativa a mesma se dissiparia.

### **Considerações Finais**

Entre as mais recentes publicações sobre o tema eólico, a importância da ação eólica na escultura da superfície não é considerada nas pesquisas recentes. Isso fica evidente ao analisar as pesquisas sobre deflação e averiguar o baixo número de pesquisas efetuadas em ambientes não tradicionalmente eólicos. Na perspectiva deste trabalho há uma contraposição, já que, enquanto autores da literatura (Poortinga *et al.* 2011; Field *et al.*, 2009; Foulds, S. A.; Warburton, J. 2007; Pye, 1987) sugerem que as pesquisas eólicas deveriam incorporar a ação pluvial, entende-se nesta pesquisa que isso deveria ocorrer também de maneira inversa, isto é, as pesquisas voltadas aos trabalhos das águas fluviais e pluviais deveriam incluir o papel da ação eólica.

Apesar de medidas em campo e elaboração de modelos serem necessários para aprofundamento das interpretações, este estudo de caso já foi capaz de demonstrar que um evento eólico da magnitude de nuvens de poeira poderia ser previsto com base na relação entre os tipos de solo,

geomorfologia, geologia, condições climáticas e meteorológicas e situação do uso da terra na região. O manejo tradicional, expondo solos vermelhos ricos em materiais finos, combinados a anos consecutivos com baixa pluviometria entre os meses de maio e setembro (típico do clima da região), e as formações de centros de alta pressão na área de ocorrência da nuvem de poeira configuram um cenário em que a atuação eólica não deveria ser descartada.

Finalmente, é preciso dar atenção à estrutura fornecida no Brasil para as pesquisas que envolvam uma perspectiva climatológica ou meteorológica diante da ineficácia das estações meteorológicas. Apesar desta pesquisa ter seu estudo de caso localizado no sudeste brasileiro (região do Brasil com maior acessibilidade a dados climáticos), a frequência de falhas de dados compromete grandemente a produção de resultados (como interpolações), e até mesmo a fidelidade destes à realidade. Este cenário ainda é pior em outras regiões do Brasil (nordeste, centro-oeste e norte). Assim, uma boa estrutura de EMAs que de fato façam coletas automatizadas com baixa densidade de falhas é imprescindível para que o Estado Brasileiro conheça a realidade das paisagens do território nacional em diversas frentes: agricultura de precisão, gestão ambiental, planejamento estratégico, reconhecimento/mapeamento agro-climático-meteorológico, produção científica e prevenção de desastres ambientais.

### Referências

- BIGARELLA, J. J., PASSOS, E. "Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais". Florianópolis: Ed. Da UFSC, 2003 v. 3.
- BIGHAM, J. M., et al. "Iron Oxides". SSSA Book Series. 2002.
- BUOL, S.W.; SOUTHARD, R.J.; GRAHAM, R.C. & McDANIEL, P.A. Soil Genesis and Classification. John Wiley & Sons. Sixt edition. 2011.
- CHAPPELL, A., ZOBECK, T.M., BRUNNER, G. "Using on-nadir spectral reflectance to detect soil surface changes induced by simulated rainfall and windtunnel Abrasion". Earth Surf. Proc. Land. 4, 489–511. 2005.
- CONAB. "Calendário de plantio e colheita". <https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/outras-publicacoes/item/15406-calendario-agricola-plantio-e-colheita>> acessado em 29/04/2023.
- CPRM. "Relatório anual do serviço geológico brasileiro – geologia". Disponível em< [http://www.cprm.gov.br/publique/media/informacao\\_publica/geologia\\_ano6.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/informacao_publica/geologia_ano6.pdf)> acessado em 29/04/2023.

- Duan, T., Chapman, S. C., Guo, Y., & Zheng, B. "Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle". *Field Crops Research*, 2017.
- ENDRES et. al. "MEasurement of the erosiona classes and land use in Franca Minicpality – SP, Brazil". *Topografia, fotogrametria e Sensoriamento Remoto*. 2006.
- FAIRBRIDGE, R. W. "The Eyclopedia of Geomorfology". Vol. 3. Stroudsburg, Pa. New York: Dowden, Hutchinson & Ross: distributed by Halsted Press, 1968.
- FIELD, J. P. et al. "Toward a more holistic perspective of soil erosion: Why aeolian research needs to explicitly consider fluvial processes and interactions". *Journal of Aeolian Research*. 2009.
- FOULDS, S. A.; WARBURTON, J. Wind erosion of blanket peat during a short period of surface desiccation (North Pennines, Northern England). *Earth Surface Processes and Landforms*. 2007
- GOUDIE, et al. "Aeolian Environments, sediments and landforms". 2ª ed. Oxford:1999.
- INTITUTO Brasileiro de Geografia e Estatística. "Bacias e Divisões Hidrográficas do Brasil". Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/31653-bacias-e-divisooes-hidrograficas-do-brasil.html>>. Acessado em 29/04/2023.
- LIANG, A. et al. "Using Spatial variation of grain size to reveal sediment transport in the Kumtagh Sand Sea, Northwest China". *Aeolian Research Journal*. 2020.
- MUHS, D.R., BETTIS, E.A., ALEINIKOFF, J.N., MCGEEHIN, J.P., BEANN, J., Skipp, G., Marshall, B.D., Roberts, H.M., Johnson, W.C., Benton, R. "Origin and paleoclimatic significance of late Quaternary loess in Nebraska: evidence from stratigraphy, chronology, sedimentology, and geochemistry". *Geol. Soc. Am. Bull.* 120, 1378– 1407. 2008.
- POORTINGA, A., VISSER, S. M., RIKSEN, M. J. P. M., & STROOSNIJDER, L. Beneficial effects of wind erosion: Concepts, measurements and modeling. *Aeolian Research*. 2011.
- PYE, K. *Aeolian Dust and Dust Deposits*. Academic Press, Boca Raton, Florida. 1987.
- Ross & Moroz. "Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo". Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo". 1996.
- ROSSI, M et al. "Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado". São Paulo: Instituto Florestal, 2017
- READING, H. G. "Sedimentary environments: processes, facies, and stratigraphy". Oxford: Blackwell Science, 1996.
- SCHAETZL, R. & ANDERSON, S. *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press. New York, 2005. 817p.

STOUT, J. E.; WARREN, A; GILL, T. Publication trends in aeolian research: An analysis of the Bibliography of Aeolian Research. *Geomorphology*, ed. 105. 2009.

SUN, J.M. "Provenance of loess material and formation of loess deposits on the Chinese Loess Plateau". *Earth Planet. Sci. Lett.* 203, 845–859. 2002.

VISSER, S.M., STERK, G., RIBOLZI, O. "Techniques for simultaneous quantification of wind and water erosion in semi-arid regions". *J. Arid Environ.* 2004.

### Sobre os autores / autoras

**Leonardo Henrique Lemes Bezerra.** Bacharel em Geografia (2019) pela UFMT (Universidade Federal de Mato Grosso). Atualmente mestrando na Universidade de São Paulo - Campus Butantã, com a pesquisa até o momento intitulada "A erosão eólica em Mato Grosso nos períodos de estiagem", sob orientação do Prof. Dr. Fernando Nadal; e Co-orientação da Profª Drª Sheila Furquim. Tem experiência como auxiliar cartógrafo do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. Também trabalhou em projetos em Geoprocessamento e Licenciamento ambiental prestando serviços a empresa Topázio (2018-2019). Contém quatro (04) disciplinas complementares, sendo duas (02) dentro do Instituto de Geografia, História e Documentação (IGHD), sendo estas: Geodésia e Quantificação em geografia. E duas (02) fora do instituto, sendo estas: Avaliação de Impactos Ambientais na Faculdade de Engenharia Florestal (FENF) e Economia Brasileira na Faculdade de Economia (FAEC). Coeficiente curricular: 8,33. Nenhuma reprovação, PF ou segunda época. Selecionado para dois projetos de iniciação científica (PIBIC): um com o professor Petter Zeilhofer na área de sensoriamento remoto - recursos hídricos; e outro com o Professor Emerson Soares dos Santos em Geografia da Saúde/Geoprocessamento (Geografia da Hanseníase em Cuiabá, 2019). Duas monitorias bem sucedidas auxiliando a Prof. Dra. Ivaniza de Lourdes Lazzarotto Cabral nas disciplinas de Geomorfologia I e II. Trilha atualmente com a originação de Créditos de Carbono na empresa Moss Earth. <https://orcid.org/0009-0003-0815-4442>. Email: [leuhbezerra@gmail.com](mailto:leuhbezerra@gmail.com)

**Fernando Nadal Junqueira Villela.** Possui graduação em Geografia pela Universidade de São Paulo (2000), mestrado em Geografia (Geografia Física) pela Universidade de São Paulo (2005) e doutorado em Geografia (Geografia Física) pela Universidade de São Paulo (2011). Atualmente é professor doutor do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo. É Vice-Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geografia Física (PPGF), Coordenador do Curso de Graduação em Geografia (COC Licenciatura), membro do Conselho da União da Geomorfologia Brasileira (UGB), membro do Grupo de Trabalho Direcionado do Sistema Brasileiro de Classificação do Relevo (GTD 2º Táxon) e pesquisador colaborador do Projeto Permaclima na Antártica, Rede de Pesquisa Terrantar (INCT da Criosfera). Tem experiência na área de Geografia, com ênfase em Geomorfologia, atuando principalmente nos seguintes temas: geomorfologia climática, interações pedogeomorfológicas, caracterização do meio físico e de unidades de paisagem, cartografia geomorfológica e estudo de superfícies geomorfológicas. <https://orcid.org/0000-0002-7804-6565>. Email: [geovillela@usp.br](mailto:geovillela@usp.br)

**Sheila Aparecida Correia Furquim.** Docente do Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), campus Diadema. Possui mestrado e doutorado em Geografia Física e pós-doutorado em Ciência do Solo, todos pela Universidade de São Paulo (USP). Atua na área de Ciências da Terra, com ênfase em Pedologia e Mineralogia de Argilas, aplicadas principalmente no estudo da gênese de solos e das relações solo-relevo. É bolsista produtividade em Pesquisa 2 e sua principal linha de pesquisa envolve o estudo de solos afetados por sais, adotando uma abordagem multiescalar, que se estende da caracterização e gênese dos minerais da fração argila às suas relações com a evolução e funcionamento da paisagem. Coordena o grupo de pesquisa em Mineralogia de Argilas - TAUÁ e é credenciada no Programa de Pós-Graduação em "Geografia Física" da Universidade de São Paulo (USP) e no Programa de Pós Graduação em "Análise Ambiental Integrada" da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP)-Campus Diadema. <https://orcid.org/0000-0001-7050-275X>. Email: [sfurquim@unifesp.br](mailto:sfurquim@unifesp.br)