

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

**ANÁLISE COMPARATIVA DE ABORDAGENS PARA O ESTUDO DA EMISSÃO DE
MATERIAL PARTICULADO POR EROSÃO EÓLICA EM SOLO AGRÍCOLA**

Ana Paula Paulucci Ferreira

Prof. Dr. Ademir Abdala Prata Junior

Rio Claro (SP)

2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

Ana Paula Paulucci Ferreira

ANÁLISE COMPARATIVA DE ABORDAGENS PARA O
ESTUDO DA EMISSÃO DE MATERIAL PARTICULADO POR
EROSÃO EÓLICA EM SOLO AGRÍCOLA

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Rio Claro – SP

2026

F383a

Ferreira, Ana Paula Paulucci

Análise comparativa de abordagens para o estudo da emissão de material particulado por erosão eólica em solo agrícola / Ana Paula Paulucci Ferreira. -- Rio Claro, 2026

55 p. : tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Ademir Abdala Prata Junior

1. Poluição do ar. 2. Cana-de-açúcar. 3. Velocidade do vento. 4. Modelagem matemática. 5. PM10. I. Título.

Ana Paula Paulucci Ferreira

ANÁLISE COMPARATIVA DE ABORDAGENS PARA O ESTUDO DA EMISSÃO DE MATERIAL PARTICULADO POR EROSÃO EÓLICA EM SOLO AGRÍCOLA

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

Ademir Abdala Prata Junior (Orientador)

Vânia Silvia Rosolen

Bruno Furieri

Rio Claro, 25 de junho de 2026.

Assinatura do(a) Aluno(a)

Assinatura do(a) Orientador(a)

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à minha mãe, Leila, que com toda a sua humildade e força, se fez presente, fazendo aquilo que faz de melhor: sendo mãe. À minha avó, Marina, que desde o início, nunca mediu esforços para que eu pudesse chegar até aqui e que tanto me ensinou sobre a vida. E ao meu tio, Humberto, que me apresentou à cultura e à educação e que sempre acreditou em mim.

Agradeço, em especial, ao meu namorado, Matheus, que há anos ao meu lado, foi a figura mais importante desta trajetória. Além do apoio incessante, me fortaleceu em todos os momentos, diariamente e assim, me lembrou do sentido de cada desafio enfrentado.

Agradeço às minhas amigas Ana Beatriz, Giovanna e Larissa, por serem abrigo, inspiração, risadas, amizade e pertencimento.

Agradeço também, ao professor Ademir, por compartilhar tanto conhecimento, pela orientação e pela humanidade que conduziu este processo. Agradeço, ainda, por este trabalho, realizado com tanto carinho, dedicação e confiança. E por ter feito a ciência acessível, por isso serei eternamente grata.

Por fim, agradeço ao Sistema de Reserva de Vagas para Educação Básica Pública, bem como às políticas de Permanência e Moradia Estudantil, pois sem isso, nada teria se concretizado. À UNESP, pela realização deste sonho e excelência do ensino.

“A dúvida é o princípio da sabedoria.”

Aristóteles

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo comparar diferentes abordagens de modelagem para a estimativa da emissão de material particulado por erosão eólica em solo agrícola na região de Rio Claro (SP). A escolha da área de estudo foi motivada pela importância da atividade agrícola no município e pela expansão territorial destinada ao cultivo de cana-de-açúcar. Neste contexto, buscou-se compreender o comportamento da erosão eólica e avaliar as diferenças entre os modelos da US EPA (2006), de caráter empírico e baseado no potencial erosivo do vento, da abordagem descrita por Shaw et al. (2008), fundamentada no fluxo horizontal de sedimentos, e da parametrização proposta por Choi & Fernando (2008), voltada à estimativa da emissão de partículas inaláveis (PM10). A seleção desses modelos permitiu comparar diferentes abordagens amplamente empregadas para a estimativa de emissões por erosão eólica, utilizando dados meteorológicos referentes ao ano de 2025 e características físicas do solo da área estudada. Os resultados indicaram que a ocorrência da erosão eólica está condicionada à superação da velocidade de fricção limiar, correspondente a velocidade do vento igual e superiores a 5,8 m/s quando medidas a 2 metros de altura, condição necessária para o início do levantamento e transporte de partículas. Embora os modelos tenham apresentado diferenças nas magnitudes estimadas, verificou-se comportamento temporal semelhante entre eles, identificando os mesmos períodos favoráveis à ocorrência de eventos erosivos. Dessa forma, o estudo contribui para a compreensão da erosão eólica em áreas agrícolas e para a avaliação comparativa de diferentes abordagens de modelagem aplicadas à estimativa da emissão de material particulado.

Palavras-chave: poluição do ar; PM10; cana-de-açúcar; velocidade do vento; modelagem matemática.

Abstract

This study aimed to compare different modeling approaches for estimating particulate matter emissions from wind erosion in agricultural soil in the municipality of Rio Claro, São Paulo, Brazil. The study area was selected due to the importance of agricultural activities in the region and the territorial expansion of sugarcane cultivation. In this context, the study sought to investigate the behavior of wind erosion and evaluate the differences among the US EPA (2006) model, an empirical approach based on the wind erosion potential; the approach proposed by Shaw et al. (2008), which is based on horizontal sediment flux; and the parameterization developed by Choi and Fernando (2008), designed to estimate inhalable particulate matter (PM₁₀) emissions. The selection of these models enabled the comparison of widely used approaches for estimating wind erosion emissions using meteorological data collected throughout 2025 and the physical characteristics of the study area's soil. The results showed that the occurrence of wind erosion depends on the friction velocity exceeding the threshold friction velocity, corresponding to wind speeds equal to or greater than 5.8 m s^{-1} , measured at a height of 2 m, which represents the minimum condition required to initiate particle entrainment and transport. Although the models produced different emission magnitudes, they exhibited similar temporal behavior, identifying the same periods favorable for erosive events. Therefore, this study contributes to a better understanding of wind erosion in agricultural areas and provides a comparative assessment of different modeling approaches applied to particulate matter emission estimation.

Keywords: air pollution; PM₁₀; sugarcane; wind speed; mathematical modeling.

Title: Comparative Analysis of Modeling Approaches for Estimating Particulate Matter Emissions from Wind Erosion in Agricultural Soil

Lista de figuras

Figura 1. Esquema dos processos da erosão eólica no solo.	19
Figura 2. Fluxograma do procedimento de estimativa de emissões por erosão eólica.....	28
Figura 3. Mapa de localização da área de estudo. O marcador indica o ponto de amostragem de solo (TR5) utilizado por Nogueira (2021), cujas características foram adotadas no presente estudo.....	33
Figura 4. Rosa dos ventos de Rio Claro (SP) no ano de 2025.....	37
Figura 5. Comportamento do potencial de erosão da US EPA (2006).....	39
Figura 6. Comportamento dos potenciais de erosão de Shaw et al. (2008) e Choi & Fernando (2008).	40
Figura 7. Gráfico dos eventos erosivos mensais durante o ano de 2025.....	42
Figura 8. Média histórica de precipitação acumulada.	43
Figura 9. Comparação entre a velocidade de fricção e a velocidade de fricção limiar nos eventos erosivos.....	44

Lista de quadros

Quadro 1. Características do perfil de solo selecionado no estudo de Nogueira (2021).....	34
Quadro 2. Propriedades físicas do solo TX-5 de Gillete (1988).	35
Quadro 3. Comparação das características físicas entre o solo da área de estudo (TR5) de Nogueira (2021) e o solo de referência TX-5 Agrícola (Gillette, 1988).	35

Lista de tabelas

Tabela 1. Valores médios <i>de threshold friction velocity</i> por texturas e condições de solo.	23
Tabela 2. Valores dos potenciais de erosão (g/m ²).....	40
Tabela 3. Estimativas dos fatores de emissão e do total de material particulado emitido...	41

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
2.	OBJETIVOS.....	15
2.2	Objetivos específicos.....	15
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1	Ação eólica.....	16
3.2	Erosão eólica.....	16
3.2.1	Processos de erosão eólica.....	17
3.2.1.1	Destacamento ou deflação.....	17
3.2.1.2	Transporte das partículas do solo (suspensão, saltação e rastejamento)	18
3.2.1.3	Deposição das partículas do solo.....	20
3.2.2	Velocidade de fricção.....	20
3.2.2.1	Velocidade de fricção limiar.....	22
3.3	Erodibilidade do solo.....	24
3.4	Rugosidade superficial.....	24
3.5	Modelos de emissão de material particulado.....	25
3.5.1	Emissão por erosão eólica da US EPA.....	25
3.5.1.1	Princípios físicos.....	26
3.5.2	DUSTRAN (<i>Dust Transport Model</i>) segundo Shaw et al. (2008)	28
3.5.2.1	Processos físicos.....	29
3.5.2.2	Formulação matemática e dados de entrada.....	30
3.5.3	CMAQ segundo Choi & Fernando (2008)	31
3.5.3.1	Formulação matemática.....	32
4.	METODOLOGIA.....	33
4.1	Área de estudo.....	33
4.2	Solo agrícola.....	34
4.3	Dados meteorológicos.....	35
4.4	Aplicação das modelagens.....	37
4.4.1	Aplicação de US EPA (2006).....	37
4.4.2	Aplicação de Shaw et al. (2008).....	37
4.4.3	Aplicação de Choi & Fernando (2008).....	38

5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1	Estimativa do potencial erosivo.....	39
5.2	Estimativa do fator de emissão.....	41
5.3	Fatores climáticos	41
5.4	Compreensão da velocidade de fricção limiar.....	43
5.5	Matriz de análise comparativa.....	45
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
6.1	Recomendações para trabalhos futuros	47
	REFERÊNCIAS	48
	ANEXO A. Matriz comparativa.....	54

1. INTRODUÇÃO

A erosão eólica é um processo físico natural caracterizado pelo desprendimento, transporte e deposição de partículas do solo pela ação do vento, ocorrendo principalmente em áreas onde o solo se encontra solto, seco e desprovido de cobertura vegetal. Esse fenômeno resulta, de forma recorrente, na remoção das frações mais finas e férteis do solo, comprometendo sua estrutura, reduzindo a capacidade produtiva e acelerando processos de degradação ambiental (NSW Environment, 2020). Além dos impactos diretos sobre o solo - como a perda de material, destacou-se que a erosão eólica contribui significativamente para a emissão de partículas para a atmosfera, configurando-se como um importante fator de deterioração da qualidade do ar.

O material particulado, especialmente aquele com diâmetro aerodinâmico inferior a 10 micrômetros (PM10), representa uma ameaça relevante à saúde pública, uma vez que pode ser facilmente inalado e alcançar as vias respiratórias. Segundo Sousa (2012), a presença de PM10 no ar está associada a diversos efeitos adversos à saúde humana, como o agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares, além de impactos negativos sobre os ecossistemas. Embora frequentemente relacionada a áreas urbanas (oriunda de automóveis) e industriais, a poluição atmosférica por material particulado também se manifesta de forma expressiva em regiões agrícolas, sobretudo aquelas submetidas a práticas intensivas de manejo do solo.

A mobilização de partículas de solo pelo vento é, portanto, um processo natural que pode ser significativamente intensificado por ações antrópicas. Segundo Verдум et al. (2016), a ausência de cobertura vegetal aumenta a suscetibilidade do solo à erosão eólica, ampliando os fluxos de partículas emitidas para a atmosfera. Conforme definido por Spadotto (2002), impacto ambiental corresponde a qualquer modificação nas propriedades físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente resultante de atividades humanas, sendo a intensificação da erosão eólica um exemplo claro dessa interferência nos processos naturais.

Nesse contexto, destaca-se o cultivo da cana-de-açúcar no município de Rio Claro, localizado no estado de São Paulo, onde, segundo Pilachevsky (2011), essa cultura ocupa aproximadamente 22.005 hectares, correspondendo a cerca de 45% da área total do município. A expressiva expansão da atividade canavieira, aliada à intensa mecanização agrícola, favorece a exposição do solo e potencializa a mobilização de partículas pela

ação do vento. Assim, a erosão eólica passa a exercer papel relevante na dinâmica ambiental local, contribuindo para a dispersão de material particulado e para alterações na qualidade do ar em áreas adjacentes às zonas agrícolas.

Diante da complexidade dos fatores envolvidos na emissão e dispersão de material particulado em áreas agrícolas, torna-se fundamental o uso de ferramentas capazes de quantificar e avaliar esse fenômeno de maneira integrada. Nesse sentido, a aplicação de diferentes modelos matemáticos de estimativa de emissão e concentração de partículas apresentam-se como instrumentos para a compreensão da ação eólica sobre o solo. Destacam-se, entre esses, o modelo da *United States Environmental Protection Agency* (US EPA, 2006), que estima taxas de emissão em g/m^2 , e de caráter empírico; o sistema DUSTRAN (*Dust Transport Model*) cuja formulação conceitual e avaliação são apresentados por Shaw et al., (2008), que fornece informações sobre taxa de emissão de PM_{10} (em g/m^2), descrevendo a emissão de poeira a partir das relações físico-empíricas baseadas na interação entre o vento e as propriedades superficiais do solo; e o trabalho de revisão de Choi & Fernando (2008), o qual traz uma parametrização a ser incluída no modelo CMAQ, que traz também taxa de emissão de partículas em $\text{g/m}^2/\text{s}$. No entanto, a maioria dos estudos nesse sentido elegem um modelo para utilização na avaliação de impactos ambientais, havendo uma carência de pesquisas que se concentrem na comparação sistemática de diferentes modelos para um mesmo caso de aplicação.

Considerando o exposto, o presente trabalho tem por objetivo comparar modelos de emissão de material particulado por erosão eólica, tomando como estudo de caso uma área de solo agrícola na região de Rio Claro (SP).

A análise comparativa entre esses modelos, associada ao levantamento bibliográfico, à coleta de dados meteorológicos e à representação gráfica dos resultados obtidos, possibilita uma avaliação mais precisa do comportamento das partículas na atmosfera e dos impactos decorrentes da erosão eólica em áreas agrícolas. Dessa forma, este trabalho busca contribuir para o entendimento dos efeitos da ação do vento sobre o solo e a qualidade do ar, fornecendo subsídios científicos para a adoção de práticas de manejo mais sustentáveis e para a mitigação dos impactos ambientais associados à atividade agrícola, a qual é tão expressiva no Brasil.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é comparar modelos de emissão de material particulado por erosão eólica em solo agrícola na região de Rio Claro (SP).

2.2 Objetivos específicos

- i. Determinar valores das velocidades de fricção limiar (*threshold friction velocity*) aplicáveis para o solo da área de estudo.
- ii. Estimar a taxa de emissão de material particulado devido à erosão eólica do solo na área de estudo, comparando-se três abordagens distintas: o modelo empírico da US EPA (2006), a abordagem conceitual de emissão por erosão eólica adotada no sistema DUSTRAN, conforme descrito por Shaw et al. (2008), e a parametrização de Choi & Fernando (2008), revisada para conversão em PM₁₀.
- iii. Analisar como os diferentes modelos representam as variações temporais da taxa de emissão de material particulado a partir do solo na área de estudo.
- iv. Construir uma matriz de análise comparativa da aplicabilidade das diferentes abordagens de modelagem avaliadas, comparando-se os parâmetros de entrada, referência, áreas de aplicação e objetivos específicos dos diferentes modelos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Ação eólica

A ação eólica corresponde ao conjunto de processos responsáveis pelo desprendimento, transporte e deposição de partículas do solo sob a influência do vento. O deslocamento dessas partículas é condicionado por diversos fatores, entre os quais se destacam as características físicas do solo, como textura, agregação e teor de umidade, além da rugosidade superficial e da velocidade do vento (Jarrah et al, 2020). Solos secos, pouco coesos e com baixa cobertura vegetal apresentam maior suscetibilidade à erosão eólica, especialmente quando expostos a ventos de elevada intensidade.

Segundo Silva (1995), as condições edafoclimáticas (conjunto de características do solo e do clima) exercem papel determinante na ocorrência e na intensidade da erosão eólica. Solos secos, de textura fina, pouco agregados, com superfície uniforme e topografia plana são particularmente vulneráveis ao processo erosivo. Do ponto de vista climático, a ocorrência de ventos fortes, associada a altas temperaturas e baixos índices pluviométricos contribui para o aumento da suscetibilidade do solo à ação do vento. Em situações extremas, em função da velocidade do vento e da elevada carga de material em suspensão, podem ocorrer processos intensos de transporte de sedimentos e até mesmo o desgaste de rochas por abrasão, evidenciando o potencial erosivo desse agente natural (Jarrah et al, 2020).

3.2 Erosão eólica

A erosão eólica é o resultado da ação do vento sobre o solo, e tem início quando a velocidade do vento atinge o denominado limiar de erosão, isto é, o valor mínimo necessário para vencer as forças de coesão e de atrito que mantêm as partículas aderidas à superfície do solo. Uma vez desprendidas, as partículas passam a colidir com a superfície, promovendo a mobilização de novas partículas (incluindo partículas mais finas) e intensificando o processo erosivo. Esse mecanismo caracteriza-se como um fenômeno dinâmico e autocatalítico (processo que se intensifica a si próprio, ou seja, o próprio efeito do processo passa a estimular sua continuidade ou aumento), no qual o impacto das partículas em movimento contribui para o aumento da taxa de erosão e emissão de material particulado (Gillette & Walker, 1977).

Segundo Almeida (2019), o vento atua frequentemente como um agente erosivo; e a erosão eólica tende a ocorrer com maior intensidade em áreas desprovidas de vegetação ou com cobertura vegetal esparsa, onde predominam partículas soltas de tamanho arenoso ou inferior, associadas à ocorrência de ventos moderados a fortes.

De acordo com Shaw et al (2008), a poeira é introduzida na atmosfera por meio de processos ativos e naturais. Os processos ativos estão associados, principalmente, às atividades antrópicas que promovem a perturbação direta da superfície, tais como o tráfego de veículos em estradas de terra e em outras áreas não pavimentadas, bem como a ressuspensão de material particulado depositado sobre vias pavimentadas. Por sua vez, os processos naturais incluem a erosão eólica, a qual ocorre predominantemente em ambientes áridos e semiáridos, podendo ser intensificada pela perturbação do solo decorrente de atividades humanas recentes ou de eventos naturais, como incêndios em áreas de vegetação. Ambos os processos podem resultar em concentrações atmosféricas de material particulado capazes de afetar significativamente a qualidade do ar (Claiborn et al., 2000; Liu et al., 2006) e causar impactos potenciais à saúde humana (Kwon et al., 2002; Chen et al., 2004). Ademais, a erosão eólica em escala regional e global exerce influência sobre as mudanças climáticas (Prospero e Lamb, 2003).

3.2.1 Processos de erosão eólica

Segundo Jarrah et. al (2020), a erosão eólica consiste em três fases distintas: iniciação do movimento das partículas do solo (destacamento ou deflação), transporte das partículas do solo (suspensão, saltação e rastejamento superficial) e deposição das partículas do solo.

3.2.1.1 Destacamento ou deflação

O destacamento, também denominado deflação, corresponde à fase inicial da erosão eólica, na qual as forças exercidas pelo vento sobre a superfície do solo promovem o desprendimento das partículas. Esse processo está relacionado ao tipo de solo e às condições superficiais, como textura, grau de agregação, rugosidade aerodinâmica e teor de umidade. A quantidade de material removido depende, ainda, do tamanho das partículas e da intensidade do vento atuante (Chepil e Woodruff, 1963).

O início do movimento das partículas ocorre quando a velocidade do vento atinge a denominada velocidade limiar, definida como a velocidade mínima necessária para vencer as forças de coesão e de atrito que mantêm as partículas aderidas ao solo. Segundo

Stallings (1951), a uma altura de 15 cm acima da superfície, a velocidade limiar varia entre 12 e 14 m por hora para partículas de solo com diâmetro entre 0,1 e 0,15 mm. Esse limiar também pode ser caracterizado de forma mais robusta por meio de uma velocidade de fricção limiar (*threshold friction velocity*, u_{*t}), como será detalhado mais adiante (Seção 3.2.2 e 3.2.2.1). Uma vez desprendidas, as partículas mais finas podem ser elevadas pelo vento e, ao impactarem novamente a superfície, provocar o deslocamento de novos grãos a partir dos agregados do solo, intensificando o processo erosivo (Shao, 2008).

3.2.1.2 Transporte das partículas do solo (suspensão, saltação e rastejamento)

O transporte das partículas do solo ocorre após o destacamento, quando estas são elevadas pelo fluxo de ar e deslocadas a diferentes alturas acima da superfície, frequentemente colidindo entre si e com o solo (Cheng et al., 2017). A energia necessária para o transporte varia conforme o tamanho e o peso das partículas, sendo que ventos de maior intensidade são capazes de transportar partículas mais pesadas (Stallings, 1951).

O deslocamento dos sedimentos erodidos pelo vento ocorre por meio de três mecanismos principais: rastejamento superficial, saltação e suspensão (Hagen et al., 1999; Lyles, 1988).

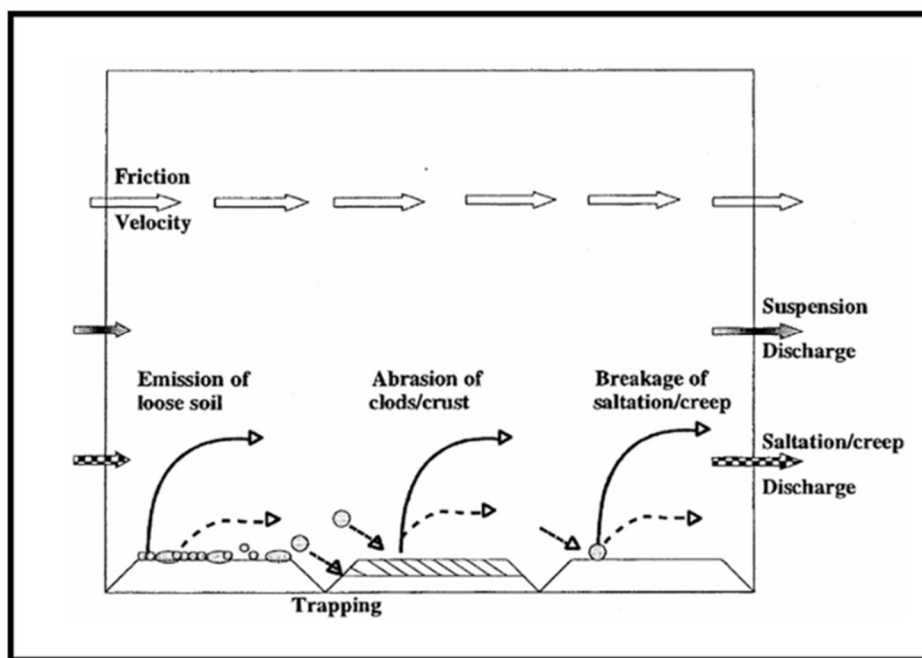
O rastejamento superficial envolve partículas de maior diâmetro, geralmente entre 0,5 mm e 1 mm, que não são elevadas pelo vento, mas se deslocam por rolamento ou deslizamento sobre a superfície do solo. Esse movimento ocorre em função da ação direta do vento ou do impacto de partículas em saltação, podendo resultar no desprendimento de outras partículas. O rastejamento transporta sedimentos por curtas distâncias, contribuindo para perdas e deposições localizadas (Stallings, 1951; Hagen et al., 1999).

A saltação é o principal mecanismo de transporte na erosão eólica e envolve partículas de tamanho intermediário, com diâmetro entre 0,1 e 0,5 mm (Lyles, 1988). Essas partículas são desprendidas da superfície e lançadas no ar, descrevendo trajetórias curtas e intermitentes, deslocando-se horizontalmente sobre o solo. O impacto das partículas em saltação promove a fragmentação de agregados, reduz a rugosidade superficial e favorece o desprendimento de partículas menores, que podem ser transportadas por suspensão. Além disso, a saltação pode causar danos à superfície do solo, às crostas superficiais e à vegetação jovem, comprometendo sua sobrevivência (Stallings, 1951; Lyles, 1988).

A suspensão ocorre quando partículas muito finas, com diâmetro inferior a 0,1 mm (como silte fino e argila) são elevadas pelo vento ou pelo impacto de outras partículas (Gillette, 1978; Gillette e Walker, 1977). Essas partículas podem atingir grandes altitudes, permanecer longos períodos na atmosfera e ser transportadas por grandes distâncias, até que a velocidade do vento diminua ou que sejam removidas pela precipitação. As partículas transportadas por suspensão incluem o material particulado inalável, conhecido como PM10, que apresenta potencial risco à saúde humana (OMS, 2021).

Os mecanismos de transporte por rastejamento, saltação e suspensão ocorrem de forma integrada e dinâmica, sendo responsáveis tanto pela fragmentação dos agregados superficiais quanto pela redistribuição e emissão de partículas do solo. A Figura 1 ilustra esquematicamente as etapas do processo de erosão eólica, desde o destacamento até a deposição dos sedimentos.

Figura 1. Esquema dos processos da erosão eólica no solo.



Fonte: Adaptado de Hagen et. al. (1999).

As setas dispostas no esquema representam os diferentes sentidos e trajetórias associados ao movimento das partículas do solo sob a ação do vento. As setas horizontais indicam o escoamento do vento ao longo da superfície, evidenciando a atuação do atrito entre o vento e o solo. As setas localizadas próximas à superfície representam a emissão inicial de partículas soltas, enquanto as setas curvas ilustram as trajetórias resultantes dos

impactos das partículas com o solo, associados à abrasão de torrões e crostas superficiais e à fragmentação de agregados. As setas tracejadas indicam trajetórias intermitentes decorrentes de sucessivos impactos. As setas orientadas para baixo representam a retenção das partículas na superfície, enquanto as setas horizontais posicionadas à direita do esquema indicam, respectivamente, a transferência de partículas finas para a atmosfera e o transporte de partículas ao longo da superfície, caracterizando a saída de sedimentos da área representada.

3.2.1.3 Deposição das partículas do solo

A deposição corresponde à fase final do processo de erosão eólica e ocorre quando a energia do vento diminui, tornando-se insuficiente para manter as partículas em movimento. Nesse momento, os sedimentos transportados são depositados sobre a superfície do solo. Em áreas agrícolas, a deposição ocorre com maior frequência em sulcos, áreas vegetadas ou regiões protegidas por obstáculos naturais ou artificiais, como cercas, valetas e quebra-ventos (Clow et al., 2016; Suter-Burri et al., 2013).

Para partículas de maior tamanho, a deposição ocorre relativamente próximo à área de origem. Entretanto, partículas muito finas transportadas por suspensão podem permanecer na atmosfera por longos períodos e percorrer quilômetros antes de serem depositadas. À medida que o material transportado se acumula, obstáculos naturais podem ser progressivamente soterrados, formando montículos e, em condições favoráveis, originando dunas. Esse tipo de feição é comumente observado em ambientes arenosos, como desertos e regiões costeiras, que atuam como importantes fontes de sedimentos para o transporte eólico (Jiang et al., 2017).

3.2.2 Velocidade de fricção

A velocidade de fricção (*friction velocity*) representada por u_* é um parâmetro aerodinâmico utilizado na caracterização da interação entre o escoamento atmosférico (movimento do ar na atmosfera) e a superfície terrestre. No entanto, não corresponde a uma velocidade física diretamente mensurável, esse parâmetro expressa a intensidade da tensão de cisalhamento exercida pelo vento sobre a superfície do solo. A velocidade de fricção relaciona-se à tensão do vento por meio da expressão $\tau = \rho u_*^2$, na qual τ corresponde à tensão de cisalhamento e ρ à densidade do ar. Trata-se de um parâmetro utilizado na análise dos processos de transporte de sedimentos, emissão de material particulado e erosão eólica, conforme estabelecido por Gillette (1986).

De acordo com De Visscher (2013), a caracterização da velocidade de fricção está diretamente associada ao perfil vertical da velocidade do vento na atmosfera próxima à superfície. Em condições de atmosfera neutra (adiabáticas) e escoamento totalmente turbulento, a variação da velocidade média do vento com a altura é controlada predominantemente pela interação entre o escoamento atmosférico e a superfície terrestre, sendo os efeitos da viscosidade molecular do ar desprezíveis quando comparados aos efeitos da turbulência.

Nessas condições, o perfil de velocidade do vento pode ser descrito com base na teoria da similaridade e na análise dimensional, resultando na chamada lei logarítmica do vento, também conhecida como lei da parede. Essa relação expressa a dependência da velocidade do vento em função da altura acima da superfície e da rugosidade do terreno, sendo representada por:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

Em que $u(z)$ é a velocidade média do vento na altura z , u_* é a velocidade de fricção, k é a constante de von Kármán (aproximadamente igual a 0,4) e z_0 é o comprimento de rugosidade da superfície.

O comprimento de rugosidade z_0 constitui um parâmetro aerodinâmico que representa a influência das características físicas da superfície, tais como a altura, a forma e a distribuição dos obstáculos presentes, incluindo vegetação, edificações e irregularidades do solo. Ressalta-se que z_0 não corresponde a uma altura física real, mas a um parâmetro empírico que expressa a eficiência da superfície em dissipar o momento do escoamento atmosférico. Superfícies mais lisas apresentam valores reduzidos de z_0 , enquanto superfícies mais rugosas, como áreas urbanas e florestais, apresentam valores mais elevados.

Embora a velocidade de fricção seja um parâmetro fundamental na caracterização do escoamento atmosférico próximo à superfície, ela não é diretamente mensurável por métodos convencionais. Assim, sua determinação prática é realizada a partir de medições da velocidade do vento em uma altura conhecida. A partir da equação do perfil logarítmico, a velocidade de fricção pode ser obtida isolando-se z_0 , resultando em:

$$u_* = \frac{ku_m}{\ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right)} \quad (2)$$

Em que u_m corresponde à velocidade do vento medida experimentalmente na altura z_m . Dessa forma, conhecendo-se o comprimento de rugosidade da superfície e a velocidade do vento em uma altura de referência, torna-se possível estimar a velocidade de fricção e, conseqüentemente, descrever o perfil vertical da velocidade do vento na camada atmosférica próxima à superfície.

No contexto da erosão eólica e da emissão de material particulado, a velocidade de fricção é utilizada como parâmetro aerodinâmico representativo do limiar de mobilização das partículas na superfície. Quando a velocidade de fricção atinge um valor crítico, denominado velocidade de fricção limiar, ocorre o desprendimento das partículas do solo e o seu subsequente transporte pelo vento, intensificando os processos de ressuspensão e emissão de material particulado para a atmosfera (De Visscher, 2013).

3.2.2.1 Velocidade de fricção limiar

A partir da conceituação de velocidade de fricção, define-se a velocidade de fricção limiar (*threshold friction velocity*), indicada por u_{*t} , que corresponde ao valor mínimo de u_* necessário para que se inicie o movimento das partículas do solo, caracterizando o início da erosão eólica (Shao, 2008). De acordo com Gillette (1988), esse limiar é atingido quando a tensão de cisalhamento do vento se torna suficiente para superar as forças coesivas e os efeitos associados à umidade do solo. Assim, a ocorrência da erosão eólica está diretamente condicionada ao atingimento da velocidade de fricção limiar.

Segundo o estudo de Shao (2008), a velocidade de fricção limiar pode ser interpretada como uma medida da capacidade de uma superfície eólica em resistir à ação do vento. As partículas do solo submetidas ao escoamento atmosférico são influenciadas por um conjunto de forças, dentre as quais se destacam o arrasto aerodinâmico, a sustentação aerodinâmica, a força gravitacional e as forças coesivas entre as partículas. As forças aerodinâmicas estão diretamente associadas à velocidade de fricção.

O valor da velocidade de fricção limiar não é constante e varia em função de um conjunto de propriedades físicas e ambientais da superfície do solo. Entre os principais fatores que influenciam esse parâmetro destacam-se a textura do solo, o teor de umidade, o conteúdo de sais solúveis, a presença de crostas superficiais, a rugosidade do terreno (*roughness*) e a distribuição da cobertura vegetal.

Resultados empíricos obtidos por Gillette (1988) evidenciam a variabilidade da velocidade de fricção limiar em função das propriedades físicas do solo. A Tabela 1 apresenta valores médios da velocidade de fricção limiar para diferentes texturas e condições superficiais, evidenciando a influência da textura, da estabilidade do solo e da presença de crostas no controle do início da erosão eólica.

Tabela 1. Valores médios de *threshold friction velocity* por texturas e condições de solo.

Textura	u_{*t} , cm s ⁻¹			Percentual < 1 mm		Estabilidade média (%)	Módulo de ruptura (bars)
	Solto	Com crosta	Torrão	Solto	Torrão		
Areia	28,2	65,7	75	97,06	30	48	0,03
Areia franca	33,6	103	85	74	53	62,3	0,5
Franco-arenoso	28,7	290	105	70,4	35,9	87,1	0,42
Argila	54,3	>200	>150	57,6	5,5	86,4	0,75
Argila siltosa	56			94		12,8	
Franco-argiloso	67,6	120	>109	72,3	18,6	45	0,38
Franco argiloso-siltoso	64	>150		81,8		12,9	
Franco-siltoso	108	>150	>200	23	10,8	60,7	0,8
Franco argilo-arenoso		>100		26,7		72,1	0,78
Franco	78,3	>150	>150	50,7	11,2	70,6	0,66
Franco calcário	71,2	>100	>100			13,1	0,34

Fonte: Adaptado e traduzido de Gillette (1988).

Observa-se, a partir dos dados apresentados na Tabela 1, que solos arenosos apresentam menores valores de velocidade de fricção limiar, refletindo a menor coesão interparticular característica desse tipo de material. Em contrapartida, solos com maior fração de silte e argila exibem valores significativamente mais elevados de u_{*t} , associados ao aumento das forças coesivas e à maior resistência do solo à ação do vento. A presença de crostas superficiais e agregados também contribui para o aumento do limiar

de mobilização das partículas, indicando que a estrutura superficial do solo desempenha papel fundamental na dinâmica da erosão eólica.

3.3 Erodibilidade do solo

A erodibilidade do solo é definida como a propriedade que expressa a maior ou menor facilidade com que as partículas do solo são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo (Bastos, 1999). Trata-se de uma característica complexa, resultante da interação de fatores físicos, químicos, biológicos e mecânicos, amplamente abordada nos estudos sobre erosão dos solos.

Sua avaliação é realizada principalmente a partir das características físicas, químicas e mineralógicas dos horizontes superficiais do solo, bem como por meio do desenvolvimento de modelos de previsão da perda de solo (Bastos, 1999). Segundo Silva et al. (2000), essa propriedade representa o efeito integrado dos processos que controlam a infiltração de água e a resistência do solo à desagregação e ao transporte de partículas, refletindo a predisposição natural do solo à erosão.

Esse comportamento é governado por atributos intrínsecos do solo, os quais podem variar entre diferentes classes ou para um mesmo solo em função de alterações estruturais e de uso (Bastos, 1999; Panachuki et al., 2006). Inclui-se no conceito tanto a resistência intrínseca do solo ao processo erosivo quanto aspectos relacionados à infiltrabilidade; em abordagens mais restritas, a erodibilidade é associada apenas à resistência do solo à desagregação, independentemente das condições de fluxo atuantes (Bastos, 1999).

3.4 Rugosidade superficial

A rugosidade superficial do solo constitui um dos principais fatores de controle da interação entre o escoamento atmosférico e a superfície terrestre, influenciando a distribuição vertical da velocidade do vento e os processos de erosão eólica. Esse parâmetro se associa às irregularidades físicas da superfície, incluindo a presença de agregados (como crostas formadas pela ação da chuva e secagem do solo), resíduos vegetais, sulcos, elementos que atuam como obstáculos ao escoamento do ar (Shao, 2008).

Do ponto de vista aerodinâmico, a rugosidade superficial é representada pelo comprimento de rugosidade (z_0), já introduzido na Equação (1), sendo definido como parâmetro empírico que expressa a capacidade da superfície em dissipar o momento do

escoamento atmosférico. Embora não corresponda a uma altura física real, a z_0 está relacionado às características estruturais da superfície do solo (Arya, 2001; Wieringa, 1993).

Superfícies com maior rugosidade, como aquelas com cobertura vegetal ou presença de resíduos agrícolas, promovem maior dissipação da energia do vento, reduzindo a velocidade do escoamento próximo ao solo e, conseqüentemente, diminuindo o potencial de destacamento e transporte de partículas. Em contrapartida, superfícies lisas e expostas, comuns em áreas agrícolas após operações de preparo, apresentam baixos valores de z_0 , favorecendo o aumento da velocidade do vento na camada próxima à superfície e intensificando os processos erosivos (Gillette, 1988).

Além disso, a rugosidade superficial tem influência indireta sobre a velocidade de fricção, uma vez que está presente na formulação do perfil logarítmico do vento. Dessa forma, variações na rugosidade resultam em alterações na estimativa do cisalhamento exercido pelo vento sobre o solo, impactando diretamente a condição de início da erosão eólica, definida pela superação da velocidade de fricção limiar.

3.5 Modelos de emissão de material particulado

3.5.1 Emissão por erosão eólica da US EPA

O modelo de erosão eólica industrial da US EPA, descrito no AP-42 (Seção 13.2.5), fundamenta-se nos princípios da mecânica dos fluidos atmosférica e da física da erosão eólica, sendo destinado à descrição da remoção e do transporte de partículas superficiais em função do cisalhamento exercido pelo vento.

O princípio central do modelo estabelece que a erosão eólica ocorre somente quando a tensão de cisalhamento imposta pelo escoamento atmosférico sobre a superfície excede a velocidade de fricção limiar. A partir da superação desse limiar, partículas finas previamente disponíveis na superfície tornam-se passíveis de mobilização e emissão para a atmosfera.

O modelo considera que as superfícies industriais expostas apresentam uma disponibilidade finita de material erodível, definida como potencial de erosão. Ademais, a erosão eólica é caracterizada como um processo intermitente, predominantemente associado a eventos de vento intenso de curta duração, especialmente rajadas, e não às velocidades médias horárias do vento. Considera-se ainda que cada distúrbio da superfície (como movimentação de materiais, revolvimento do solo ou recarga de pilhas) promove

a exposição de material superficial fresco, restaurando o potencial de erosão e reiniciando o processo erosivo.

A formulação do modelo deriva de resultados obtidos em experimentos de túnel de vento, medições de campo e estudos clássicos sobre erosão eólica, com destaque para os trabalhos de Chepil (1952) e Gillette (1988), posteriormente consolidados e sistematizados pela US EPA para a estimativa de emissões fugitivas de material particulado.

3.5.1.1 Princípios físicos

O comportamento do vento na camada limite atmosférica é representado por um perfil logarítmico de velocidades, conforme a Equação (1), que relaciona a velocidade do vento à altura acima da superfície.

A estimativa da velocidade de fricção baseia-se em dados meteorológicos observados, sendo adotado o parâmetro *fastest mile of wind*, que corresponde à rajada mais intensa registrada em um determinado período. Esse parâmetro é utilizado por representar de forma mais adequada os eventos de curta duração responsáveis pela erosão, em detrimento das velocidades médias.

A ocorrência da erosão eólica é condicionada à comparação entre a velocidade de fricção calculada e a velocidade de fricção limiar. A velocidade de fricção limiar (u_{*t}) é determinada a partir das propriedades físicas da superfície, especialmente da distribuição granulométrica dos agregados do solo. O modelo admite sua obtenção por meio de ensaios de peneiramento manual da camada superficial, conforme o procedimento proposto por Chepil (1952), bem como por valores tabelados obtidos experimentalmente pela US EPA para diferentes tipos de materiais.

Uma vez que $u_* > u_{*t}$, calcula-se o potencial de erosão (P), que representa a massa de material erodível disponível por unidade de área. Para superfícies secas e expostas, o potencial de erosão é determinado pela Equação (3):

$$P = 58(u_* - u_{*t})^2 + 25(u_* - u_{*t}) \quad (3)$$

Caso $u_* \leq u_{*t}$, o potencial de erosão é considerado nulo, não havendo emissão de partículas. A forma não linear da equação reflete a elevada sensibilidade do processo erosivo a incrementos da velocidade do vento acima do limiar.

A quantificação das emissões é realizada por meio do fator de emissão anual (EF), expresso em gramas por metro quadrado por ano (g/m²/ano), conforme a Equação (4):

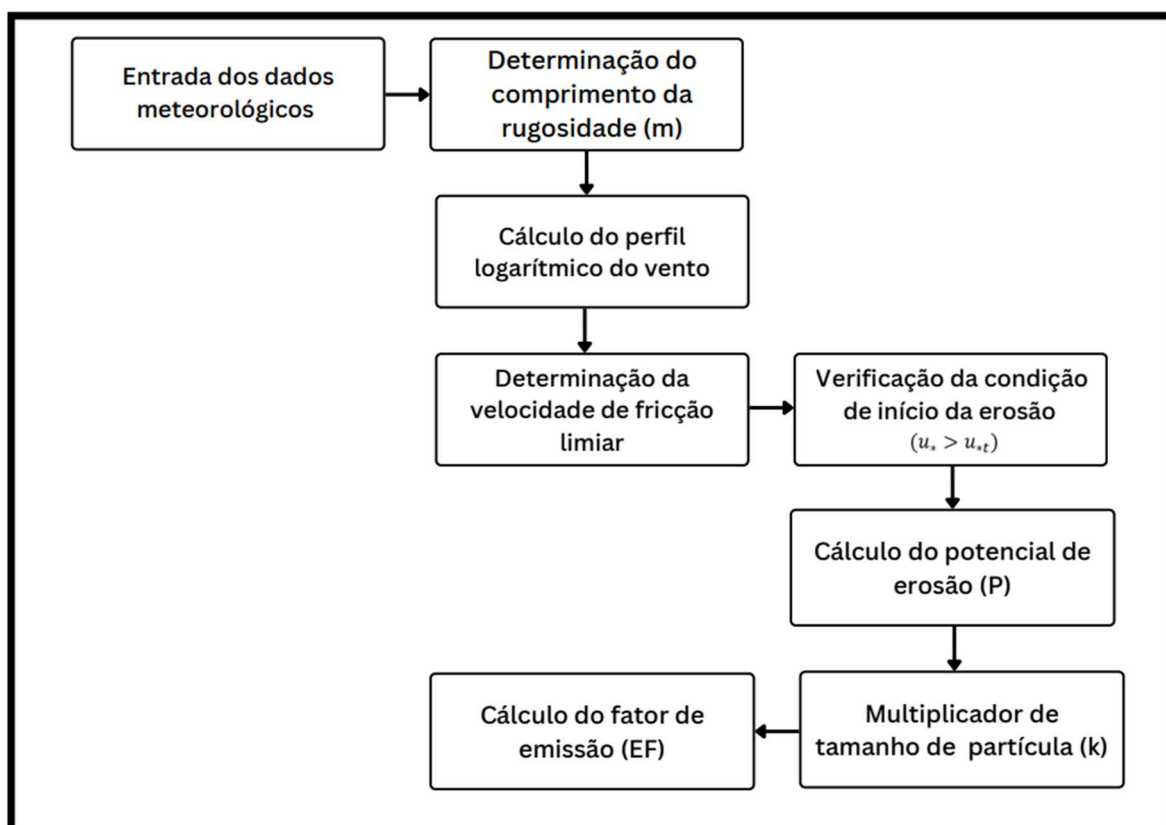
$$EF = k \sum_{i=1}^N P_i \quad (4)$$

Em que k é o multiplicador associado à fração de tamanho aerodinâmico das partículas, N é o número de distúrbios da superfície ao longo do ano (365 dias) e P_i é o potencial de erosão correspondente ao intervalo i entre dois distúrbios consecutivos. O multiplicador k permite a estimativa específica de diferentes frações de material particulado, sendo definido em função do diâmetro aerodinâmico das partículas. De acordo com as recomendações da US EPA, os valores de k são iguais a 1,0 para partículas com diâmetro aerodinâmico inferior a 30 μm , 0,6 para partículas menores que 15 μm , 0,5 para a fração PM10 e 0,075 para a fração PM2.5.

A frequência de distúrbios da superfície constitui um parâmetro operacional fundamental do modelo, sendo definida a partir das características de uso e manejo da área estudada. Cada distúrbio promove a exposição de material superficial fresco, restaurando o potencial de erosão e reiniciando o processo erosivo. Dessa forma, superfícies submetidas a diferentes frequências de intervenção devem ser tratadas separadamente no cálculo das emissões, uma vez que a periodicidade dos distúrbios influencia diretamente o número de eventos erosivos considerados ao longo do ano.

O encadeamento lógico do modelo de erosão eólica da US EPA, bem como as principais etapas de cálculo e seus respectivos parâmetros de entrada, é apresentado de forma esquemática na Figura 2.

Figura 2. Fluxograma do procedimento de estimativa de emissões por erosão eólica.



Fonte: Autoria própria (2026). Baseado em USEPA (2006).

3.5.2 DUSTRAN (*Dust Transport Model*) segundo Shaw et al. (2008)

O sistema DUSTRAN, desenvolvido pelo *Pacific Northwest National Laboratory* (PNNL), destinado à simulação da emissão, transporte e deposição atmosférica de material particulado proveniente de fontes naturais e antrópicas (Shaw et al., 2008).

Entretanto, no presente trabalho, não se utiliza diretamente o sistema DUSTRAN como ferramenta, mas sim a formulação conceitual e as relações empírico-físicas descritas por Shaw et al. (2008). Os autores sistematizam os principais processos de emissão de poeira por erosão eólica, estabelecendo relações entre o fluxo de partículas, a velocidade de fricção e as propriedades físicas da superfície do solo.

Fundamenta-se nos princípios da mecânica dos fluidos atmosférica, da física da erosão eólica e do transporte de partículas na camada limite atmosférica. O modelo assume que a emissão de poeira ocorre quando a força de cisalhamento exercida pelo vento sobre a superfície do solo é suficientemente elevada para superar a resistência das

partículas à mobilização. Essa condição é expressa por meio da comparação entre a velocidade de fricção do vento (u_*) e a velocidade de fricção limiar (u_{*t}).

A partir deste princípio, é calculado o fluxo vertical de poeira (*dust flux*) emitida para a atmosfera como uma função altamente não linear da intensidade do vento, incorporando, adicionalmente, os efeitos modulares das propriedades do solo, da umidade superficial e da cobertura vegetal.

3.5.2.1 Processos físicos

Os principais processos considerados na representação da erosão eólica pelo modelo incluem o levantamento aerodinâmico direto de partículas finas, a saltitação e o denominado *sandblasting*. O levantamento aerodinâmico ocorre quando partículas de menor diâmetro e baixa coesão são diretamente removidas da superfície pela ação do escoamento atmosférico, sendo transferidas para a camada inferior da atmosfera (Bagnold, 1941). A saltitação constitui um dos processos dominantes na erosão eólica e caracteriza-se pelo movimento intermitente de partículas relativamente maiores ao longo da superfície.

Associado à saltitação, o processo de *sandblasting*, segundo Grini e Zender (2004), refere-se à fragmentação mecânica de agregados do solo provocada pelo impacto de partículas em movimento. Esse mecanismo promove a desagregação de partículas maiores e a liberação de partículas finas anteriormente protegidas no interior dos agregados, ampliando o potencial de emissão de poeira. O *sandblasting* é relevante em superfícies com baixa coesão mecânica (secas e pouco agregadas).

Em razão da complexidade desses processos e a variabilidade observada em experimentos laboratoriais e medições de campo, o DUSTRAN não busca representar explicitamente cada processo individual. Em vez disso, o modelo adota uma abordagem empírica integrada, na qual os efeitos combinados desses mecanismos são representados por meio do fluxo vertical de poeira. Essa formulação baseia-se no trabalho de Gillette e Passi (1988), que estabeleceram relações empíricas entre o fluxo de emissão e a velocidade de fricção do vento, posteriormente consolidadas e aplicadas no DUSTRAN conforme descrito por Shaw et al. (2008).

3.5.2.2 Formulação matemática e dados de entrada

Segundo Shaw et al. (2008), a estimativa das emissões de poeira no DUSTRAN baseia-se na representação física do escoamento atmosférico próximo à superfície e na resposta do solo à ação do vento. A variável central do modelo é a velocidade de fricção do vento (u_*), que representa a intensidade da tensão de cisalhamento exercida pelo escoamento atmosférico sobre a superfície do solo (Seção 3.2.2). A emissão de poeira ocorre somente quando $u_* > u_{*t}$. A velocidade de fricção limiar depende das propriedades físicas do solo, especialmente da textura, do tamanho das partículas e da coesão interparticular. Shaw et al. (2008) destacam que esse parâmetro é fortemente influenciado pela umidade do solo e pela fração de argila, sendo usualmente ajustado por fatores empíricos que elevam o valor de u_{*t} em solos mais úmidos ou mais coesos, reduzindo, assim, a suscetibilidade à erosão eólica.

Segundo Shaw et al. (2008), a estimativa das emissões de material particulado por erosão eólica baseia-se na relação entre o escoamento atmosférico próximo à superfície e as propriedades físicas do solo. Nesse contexto, o fluxo vertical de poeira é inicialmente descrito por uma formulação semiempírica dependente da velocidade de fricção do vento. A expressão é dada por:

$$G = \alpha C u_*^4 \left(1 - \frac{f_w u_{*t}}{u_*} \right) \quad (5)$$

Em que G representa o fluxo total de poeira ($\text{g/m}^2/\text{s}$), C é uma constante empírica (ajustada por Shaw et al., 2008, como $C = 0,01 \text{ g/m}^6/\text{s}^3$), f_w é o fator de umidade do solo e α é o fator de cobertura vegetal.

Destaca-se que essa equação fornece o fluxo total de material particulado emitido pela superfície, não correspondendo diretamente à fração inalável (PM10). Assim, torna-se necessário realizar o particionamento granulométrico do fluxo total para a obtenção das frações de interesse.

A distribuição das partículas é determinada por meio do fator de produtividade (Nickovic et al., 2001) de poeira, onde são consideradas três faixas de poeira potencialmente emitida, indicadas por um índice k : $k = 1$, partículas com diâmetro até $2 \mu\text{m}$; $k = 2$, partículas com diâmetro entre 2 e $20 \mu\text{m}$; $k = 3$, partículas com diâmetro entre

20 e 50 μm . A emissão de partículas de diferentes faixas de tamanhos em um tipo específico de solo é dada por:

$$G'_k = G \frac{\delta_k}{\sum_{k=1}^3 \delta_k} \quad (6a)$$

$$\delta_k = \gamma_k \beta_{j,k} \quad (6b)$$

Em que G vem da Equação (5), δ_k representa a contribuição da classe granulométrica k , γ_k corresponde à fração de massa disponível para emissão da classe k , e $\beta_{j,k}$ representa a proporção das classes de partículas para diferentes texturas de solo (ver Nickovic et al., 2001, e Shaw et al., 2008, para a descrição das diferentes texturas).

A partir dessa distribuição, obtêm-se as frações relativas de cada classe granulométrica, permitindo decompor o fluxo total G em parcelas associadas a cada classe, representadas por G'_k . Nesse contexto, Shaw et al. (2008) propõem que o fluxo de material particulado inalável (PM10) pode ser estimado por:

$$G_{PM10} = G'_1 + 0,32G'_2 \quad (7)$$

Em que G'_1 e G'_2 correspondem às frações mais finas das partículas emitidas (Shaw et al., 2008).

Ressalta-se que os termos G'_1 e G'_2 são definidos a partir da distribuição granulométrica do solo, não sendo influenciados diretamente pela cobertura vegetal. A vegetação, por sua vez, atua previamente no cálculo do fluxo total G , por meio do fator α , reduzindo a intensidade da emissão ao limitar a área exposta à ação do vento.

Dessa forma, considerando que os parâmetros granulométricos do solo são fixos, o fator de partição para PM10 também permanece constante, sendo possível expressar o fluxo de PM10 como proporcional ao fluxo total de poeira. Assim, a variabilidade da emissão ao longo do tempo passa a depender principalmente da velocidade de fricção do vento.

3.5.3 CMAQ segundo Choi & Fernando (2008)

Choi & Fernando (2008) desenvolveram uma parametrização para estimativa das emissões de poeira por erosão eólica, incorporada ao sistema de modelagem atmosférica CMAQ/MM5/SMOKE. Com o objetivo de representar eventos episódicos de elevadas

concentrações de material particulado em regiões áridas e semiáridas, considerando a influência das condições meteorológicas, da cobertura superficial e das características do solo sobre a emissão da poeira. A formulação parte do mesmo princípio que os outros modelos ($u_* > u_{*t}$), sendo assim, a emissão está diretamente relacionada à intensidade da tensão de cisalhamento exercida pelo vento sobre o solo, como detalhada na Seção 3.2.2.

3.5.3.1 Formulação matemática

A estimativa do fluxo de emissão de poeira (F_a) é realizada por meio de relações empíricas distintas para diferentes classes texturais do solo. As equações 8a e 8b foram transformadas a fim de padronizar u_* em m/s.

Para solos predominantemente constituídos por silte e argila, o fluxo de emissão é calculado por:

$$F_a = 0,13(1 - R) \times 10^{-2} \times u_*^4, \quad \text{para } u_* \geq u_{*t} \quad (8a)$$

Já para solos predominantemente arenoso, a emissão é determinada por:

$$F_a = 0,13(1 - R) \times 10^{-3} \times u_*^3, \quad \text{para } u_* \geq u_{*t} \quad (8b)$$

Em que F_a corresponde ao fluxo de emissão de poeira ($\text{g/m}^2/\text{s}$) e R é o fator de redução associado à cobertura da superfície.

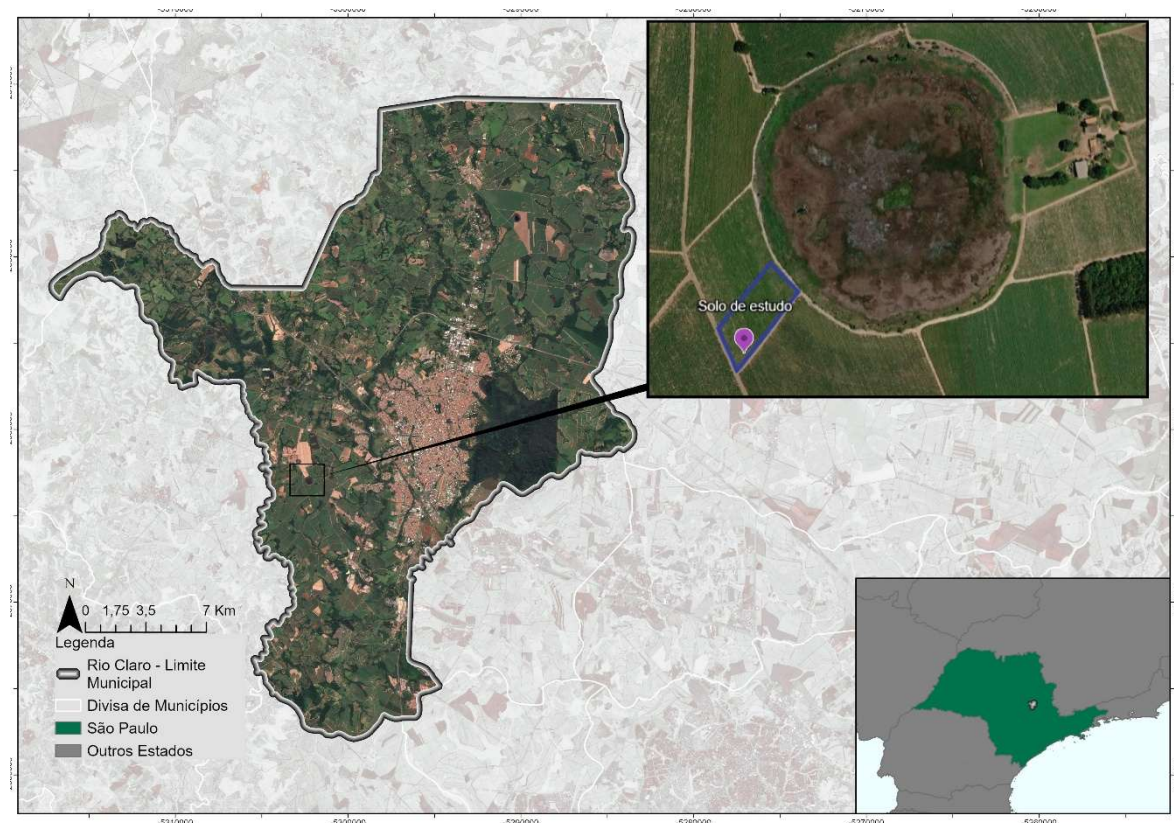
O fator de redução da cobertura superficial (R) representa a influência dos elementos presentes na superfície sobre a suscetibilidade do solo à erosão eólica. Segundo Choi e Fernando (2008), diferentes tipos de cobertura recebem valores específicos desse parâmetro, refletindo sua capacidade de atenuar a ação do vento próximo ao solo. Superfícies com menor cobertura apresentam menor rugosidade e maior área exposta à erosão.

4. METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

O solo agrícola selecionado para esta pesquisa localiza-se no município de Rio Claro, estado de São Paulo, inserido na bacia hidrográfica do rio Corumbataí, sob as coordenadas centrais na latitude: 22°25'46.68"S e longitude: 47°37'59.96"W. De acordo com Oliveira (1999), a área apresenta predominância de Argissolo Vermelho-Amarelo, enquanto o CEAPLA (2010) indica que o uso do solo é destinado ao cultivo de cana-de-açúcar. A localização da área de estudo encontra-se ilustrada na Figura 3.

Figura 3. Mapa de localização da área de estudo. O marcador indica o ponto de amostragem de solo (TR5) utilizado por Nogueira (2021), cujas características foram adotadas no presente estudo.



Fonte: Autoria própria (ArcGIS Pro, 2026).

A área foi previamente investigada por Nogueira (2021), que realizou atividades de campo e análises laboratoriais dos solos coletados. A área demarcada em azul, é aproximadamente de 10.055,1 m², com um perímetro de 443,65 m; sua altimetria, a qual se manteve entre 623 m a 625 m, aproxima-se de uma superfície plana. Com base nesse estudo, foi selecionado o solo amostrado no ponto indicado na Figura 4 (TR5, na

nomenclatura original do trabalho), que apresentou maior adequação aos objetivos da presente pesquisa (Quadro 1).

Quadro 1. Características do perfil de solo selecionado no estudo de Nogueira (2021).

Perfil	Profundidade	Estrutura	Textura
TR5	20-60	Solo agrícola, com muita areia lavada, coeso, compacto, seco	Transição franco argiloso arenoso

Fonte: Adaptado de Nogueira (2021).

4.2 Solo agrícola

A erosão eólica é mais frequentemente associada a ambientes desérticos, dunas costeiras e áreas litorâneas, podendo, contudo, ocorrer em áreas agrícolas quando as condições físicas da superfície do solo são favoráveis ao seu desenvolvimento (NSW Environment, 2020). Considerando que a presente pesquisa parte de um solo agrícola, procedeu-se à interpretação do triângulo textural (o qual apresenta a classificação de solos com diferentes texturas superficiais suscetíveis à erosão) proposto por Gillette (1988), a partir do qual foram obtidos os parâmetros necessários para a caracterização do solo em estudo.

Com base nos dados apresentados no referido estudo, selecionou-se o solo denominado TX-5 por Gillette (1988) (Quadro 2). O solo TX-5 analisado por Gillette (1988) corresponde a uma região do Texas, nos Estados Unidos, cujas características pedológicas e condições de uso agrícola apresentam similaridade com o solo TR5 da área analisada por Nogueira (2021), e do solo para cultivo de cana-de-açúcar. O valor da velocidade de fricção limiar associado a esse solo, $u_{*t} = 0,287$ m/s, foi adotado para a aplicação nos cálculos dos modelos de emissão utilizados neste estudo. Além disso, adotou-se o valor de rugosidade $z_0 = 0,001$ m, representativo de solo descoberto.

Quadro 2. Propriedades físicas do solo TX-5 de Gillette (1988).

Solo	Textura	Superfície	Descrição	u_{*t} (m/s)
TX-5 Agrícola	Franco arenoso	Plana	Campo de cultivo	0,287

Fonte: Adaptado e traduzido de Gillette (1988).

Para verificar a compatibilidade entre o solo da área de estudo (TR5) de Nogueira (2021) e o solo de referência utilizado por Gillette (1988), elaborou-se o Quadro 3, no qual são comparadas suas principais características físicas. A semelhança observada entre os perfis justifica a utilização do solo TX-5 Agrícola na aplicação dos modelos de emissão avaliados.

Quadro 3. Comparação das características físicas entre o solo da área de estudo (TR5) de Nogueira (2021) e o solo de referência TX-5 Agrícola (Gillette, 1988).

Solo/Perfil	Textura	Superfície	Descrição
TR5	Franco arenoso	Plana (profundidade 0-20)	Solo agrícola
TX-5 Agrícola	Franco arenoso	Plana	Campo de cultivo

Fonte: Autoria própria (2026).

4.3 Dados meteorológicos

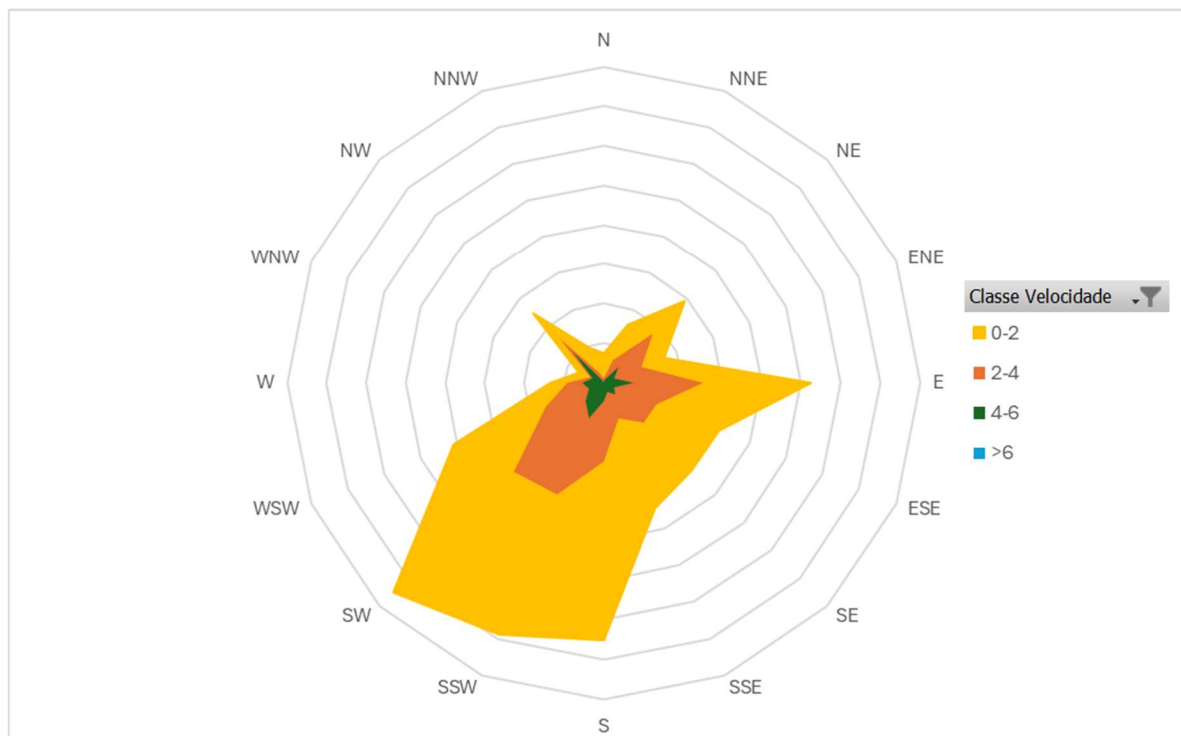
De acordo com Dubreuil et al. (2018), a região de Rio Claro enquadra-se na classificação Cwa segundo o sistema climático de Köppen-Geiger, caracterizando um clima subtropical úmido, com inverno seco e verão quente. Esse tipo climático apresenta temperaturas médias elevadas no mês mais quente, além de invernos mais amenos e verões chuvosos (Monteiro, 1973). No que se refere à dinâmica atmosférica do Estado de São Paulo, destaca-se a variabilidade dos ventos, que pode ser influenciada por alterações nos padrões de circulação atmosférica associadas às mudanças climáticas (IPCC, 2021). A área de estudo localiza-se na direção oeste-sudoeste em relação ao ponto de referência das medições, com azimute de 244,46°.

Os dados meteorológicos utilizados neste estudo foram obtidos na Estação Meteorológica de Rio Claro, pertencente ao Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA) do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP. Foi inaugurada em 1993, em convênio com a Prefeitura Municipal de Rio Claro, e iniciou a coleta de dados em janeiro de 1994. Está localizada nas coordenadas 22°23' S de latitude 47°32' W de longitude, a 626,5 m de altitude (CEAPLA, s.d.). A escolha da estação deve-se à proximidade com a área de estudo, à acessibilidade aos dados e à confiabilidade das medições meteorológicas.

Entre os principais elementos meteorológicos de superfície monitorados destacam-se precipitação pluviométrica, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento, pressão atmosférica, radiação solar e radiação ultravioleta (UV), sendo também realizada a medição de radiação fotossinteticamente ativa. Para esta pesquisa, foi selecionada a série de dados do ano de 2025. As variáveis consideradas para os cálculos dos modelos foram velocidade do vento (corresponde à intensidade do deslocamento horizontal do ar na atmosfera); a maior rajada de vento; e a direção do vento (indica a origem do fluxo de ar em relação aos pontos cardeais) para a realização da rosa dos ventos, na Figura 4 (Varejão-Silva, 2006).

Utilizando o Excel, foram processados os dados meteorológicos disponibilizados pelo CEAPLA, obtidos mediante solicitação formal. A planilha contém registros meteorológicos com intervalos de 5 minutos, referentes a todo o ano de 2025. A rosa dos ventos apresentada na Figura 4 permite visualizar a frequência de ocorrência das direções do vento no período analisado, sendo as cores utilizadas para representar as classes de velocidade em m/s. Observou-se que a velocidade média anual do vento foi de 0,73052 m/s, enquanto a velocidade máxima registrada no período analisado atingiu 6,7 m/s no mês de novembro.

Figura 4. Rosa dos ventos de Rio Claro (SP) no ano de 2025.



Fonte: Autoria própria (Excel, 2026).

4.4 Aplicação das modelagens

4.4.1 Aplicação de US EPA (2006)

Com base nas Equações (1), (3) e (4), apresentadas em sua revisão bibliográfica, foram realizados os cálculos da velocidade de fricção (u_*), do potencial de erosão e do fator de emissão de material particulado, respectivamente, considerando os valores de z_0 e u_{*t} definidos na Seção 4.2. Os cálculos foram aplicados a cada registro meteorológico da planilha, considerando os dados de velocidade do vento medidos em intervalos de 5 minutos.

A determinação do potencial de erosão foi realizada considerando todos os registros presentes na base de dados, possibilitando a obtenção dos valores correspondentes a cada período analisado. Por fim, o fator de emissão foi calculado a partir dos valores obtidos de potencial de erosão, sendo posteriormente aplicado o fator de multiplicação correspondente ao PM10.

4.4.2 Aplicação de Shaw et al. (2008)

No presente estudo, adota-se a condição de solo seco, para a qual Shaw et al. (2008) indicam que o fator de umidade assume valor unitário ($f_w = 1$). Além disso,

considera-se superfície totalmente exposta, de modo que $\alpha = 1$. Esses valores, juntamente com u_{*t} (Seção 4.2) e u_* (calculada para cada registro meteorológico), foram aplicados na Equação (5) para estimar o fluxo total de partículas no respectivo intervalo de tempo correspondente ao registro meteorológico.

Para cálculo do fluxo de emissão de PM10, utilizou-se a Equação (7), onde os fluxos G'_1 e G'_2 foram obtidos pelas Equações (6a) e (6b), tendo sido adotados os seguintes parâmetros, seguindo Shaw et al. (2008) e considerando a textura do solo como *coarse-medium* ($j = 4$): $\gamma_1 = 0,08$, $\gamma_2 = 1,00$, $\gamma_3 = 1,00$, $\beta_{4,1} = 0,12$, $\beta_{4,2} = 0,09$, $\beta_{4,3} = 0,09$.

O potencial de erosão (g/m^2) foi determinado a partir da multiplicação dos valores obtidos pela Equação (5) pelo período de 300 segundos, equivalente a 5 minutos. O cálculo foi aplicado individualmente a cada linha. Posteriormente, o fator de emissão (g/m^2) corresponde a soma de todos os resultados do potencial de erosão.

4.4.3 Aplicação de Choi & Fernando (2008)

Para utilizar a parametrização dos autores, considerou-se a condição de solo seco. Adicionalmente, foi utilizado o fator de redução da cobertura superficial correspondente à classe *Barren or sparsely vegetated land* ($R = 0,1$), conforme apresentado na Tabela 1 do referido estudo.

Sendo assim, u_* foi calculada para cada registro meteorológico e comparada à u_{*t} . Quando $u_* \geq u_{*t}$, o fluxo de emissão de poeira (F_a) foi estimado pelas Equações (8a) e (8b). Considerando que o solo da área de estudo foi classificado como franco arenoso pelos dois estudos de (Nogueira, 2021) e (Gillette, 1988), optou-se pela utilização de ambas as formulações propostas por Choi & Fernando (2008), com o objetivo de avaliar a sensibilidade das estimativas de emissão em função da textura do solo. Para condições em que $u_* < u_{*t}$, considerou-se a ausência de emissão de partículas ($F_a = 0$). Para a estimativa do fluxo de PM10, a partir do fluxo total de poeira, aplicou-se a mesma abordagem descrita para o modelo de Shaw et al. (2008) (Seção 4.4.2).

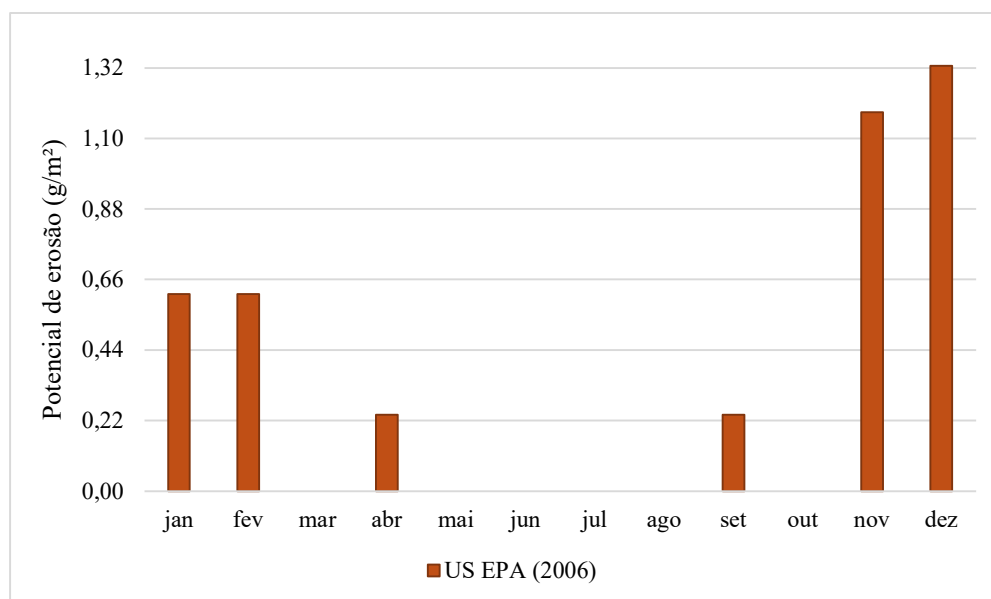
O potencial de erosão (g/m^2) foi calculado com a mesma lógica da Seção 4.4.2, mas utilizando os dados da Equação (8a) e (8b). O fator de emissão (g/m^2) corresponde também à soma dos resultados do potencial de erosão.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Estimativa do potencial erosivo

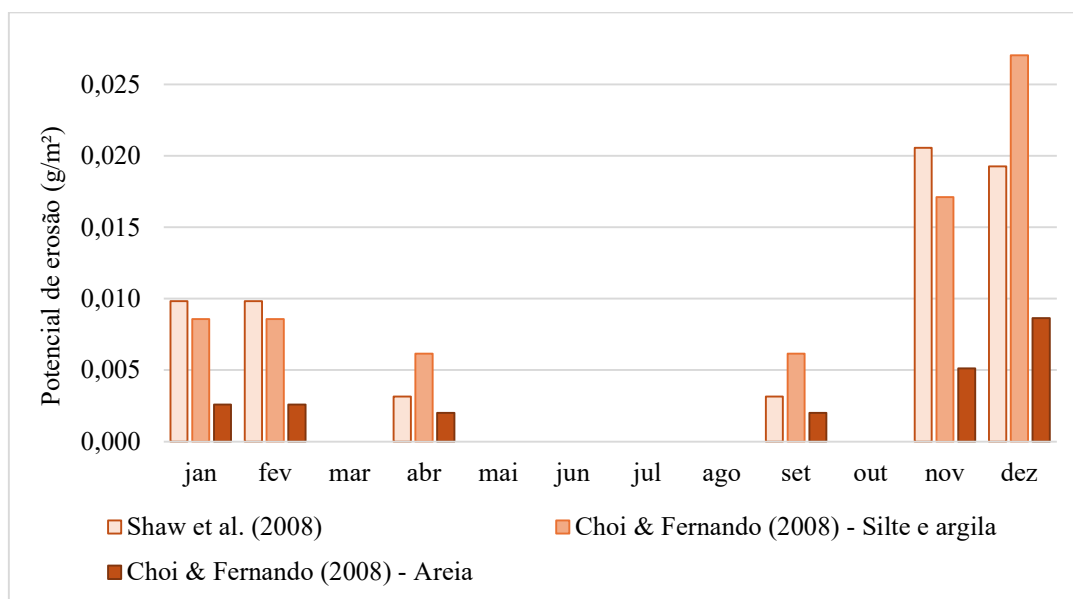
A partir do tratamento e processamento dos dados meteorológicos e das variáveis de entrada dos modelos, foram obtidas as estimativas mensais do potencial erosivo para o ano de 2025, conforme apresentado nas Figuras 5 e 6, conjuntamente com a Tabela 2 para visualização dos valores a cada mês. Os resultados permitiram analisar o comportamento temporal da erosão eólica e comparar as respostas dos diferentes modelos aplicados.

Figura 5. Comportamento do potencial de erosão da US EPA (2006).



Fonte: Autoria própria (Excel, 2026).

Figura 6. Comportamento dos potenciais de erosão de Shaw et al. (2008) e Choi & Fernando (2008).



Fonte: Autoria própria (Excel, 2026).

Tabela 2. Valores dos potenciais de erosão (g/m²).

Meses	US EPA (2006)	Shaw et al. (2008)	Choi & Fernando (2008) - Silte e argila	Choi & Fernando (2008) - Areia
Jan	0,61	0,01	0,009	0,003
Fev	0,61	0,01	0,009	0,003
Mar	0	0	0	0
Abr	0,24	0,003	0,006	0,002
Mai	0	0	0	0
Jun	0	0	0	0
Jul	0	0	0	0
Ago	0	0	0	0
Set	0,24	0,003	0,006	0,002
Out	0	0	0	0
Nov	1,19	0,019	0,018	0,006
Dez	1,33	0,02	0,03	0,009

O comportamento temporal dos modelos apresentou a mesma tendência, isso é, nos meses em que temos um potencial de erosão igual a 0, tem-se que $u_* < u_{*t}$, corroborando a proposição apresentada por Gillette (1988), segundo a qual a ocorrência de erosão eólica está condicionada à situação em que $u_{*t} > u_*$.

O modelo da US EPA (2006) apresentou estimativas significativamente superiores às obtidas pelos modelos de Shaw et al. (2008) e o de Choi & Fernando (2008). Observou-se, ainda, que os resultados gerados pelos modelos de Shaw et al. (2008) e de Choi e Fernando (2008), principalmente para solos classificados como silte e argila, foram os mais semelhantes entre si, fato que pode ser atribuído à natureza desses modelos, ambos baseados na estimativa do fluxo da taxa de emissão. Em contrapartida, o modelo da US EPA (2006) é destinado à estimativa do potencial de erosão.

5.2 Estimativa do fator de emissão

A Tabela 3 apresenta os valores estimados de fator de emissão obtidos pelos modelos avaliados para o ano de 2025, bem como o total de material particulado emitido considerando a área de estudo de 10.055,10 m².

Tabela 3. Estimativas dos fatores de emissão e do total de material particulado emitido.

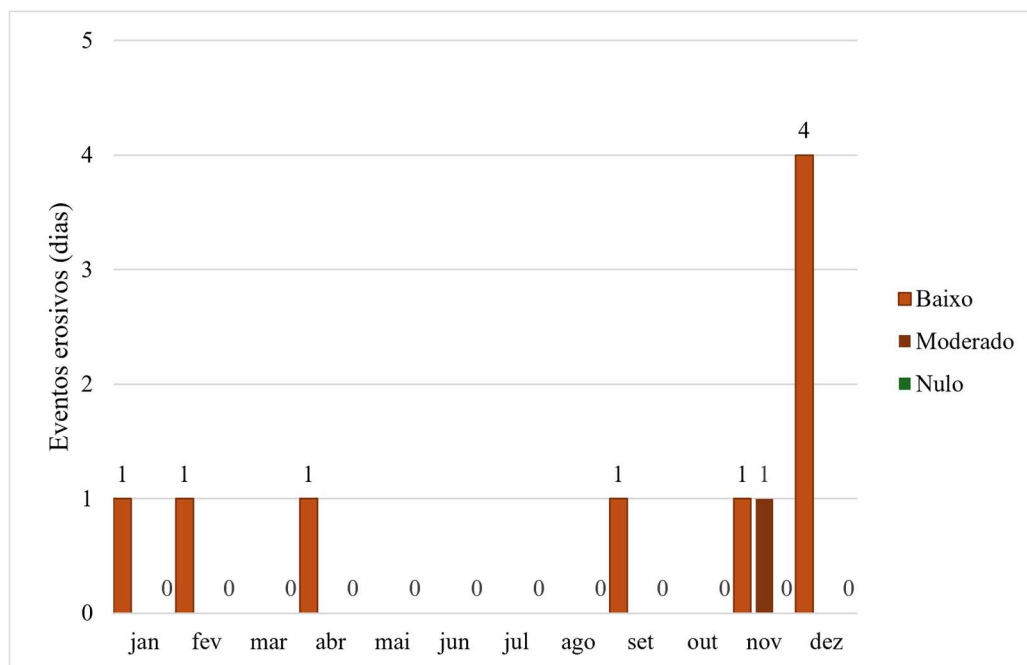
Modelos	Fator de emissão (g/m ² /ano)	Área (m ²)	Total emitido (kg/ano)
US EPA (2006)	4,21	10.055,10	42,3
Shaw et. al (2008)	0,066	10.055,10	0,66
Choi & Fernando (2008)	0,074	10.055,10	0,74
	0,023		0,23

5.3 Fatores climáticos

A Figura 7 apresenta a distribuição mensal dos eventos erosivos registrados em 2025. Verificou-se que as estimativas de potencial erosivo acompanharam a frequência desses eventos. Para auxiliar na interpretação dos resultados, foram definidas quatro classes de suscetibilidade erosiva ("nulo", "baixo", "moderado" e "alto"), baseadas na relação entre a velocidade de fricção calculada e a velocidade de fricção limiar. A classe "nulo" correspondeu às situações em que a velocidade de fricção foi inferior ou igual ao valor limiar, enquanto as classes "baixo", "moderado" e "alto" representaram valores até 10%, entre 10% e 20% e superiores a 20% acima da velocidade de fricção limiar,

respectivamente, indicando aumento progressivo do potencial de desprendimento e transporte de partículas pelo vento.

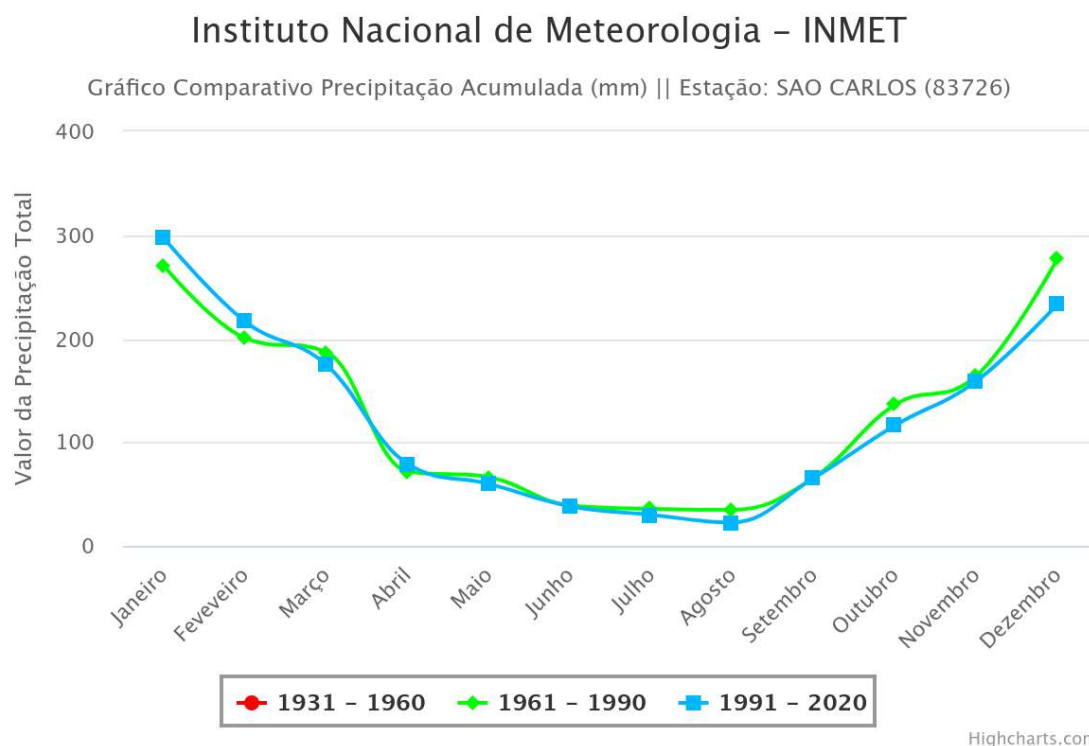
Figura 7. Gráfico dos eventos erosivos mensais durante o ano de 2025.



Fonte: Autoria própria (Excel, 2026).

Tem-se que o mês de dezembro apresentou o maior número de eventos erosivos, totalizando 4 ocorrências, fato que justifica os maiores valores de potencial erosivo estimados pelos três modelos analisados. Observou-se também que, embora novembro tenha registrado apenas dois eventos erosivos, a elevada intensidade do vento observada em um desses eventos resultou em valores expressivos de potencial erosivo quando comparados aos demais períodos do ano.

Para entender o comportamento das chuvas, a Figura 8 traz a média histórica da região de Rio Claro (SP), desde 1931 até 2020. O gráfico é elaborado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Figura 8. Média histórica de precipitação acumulada.

Fonte: <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/SP/83726>.

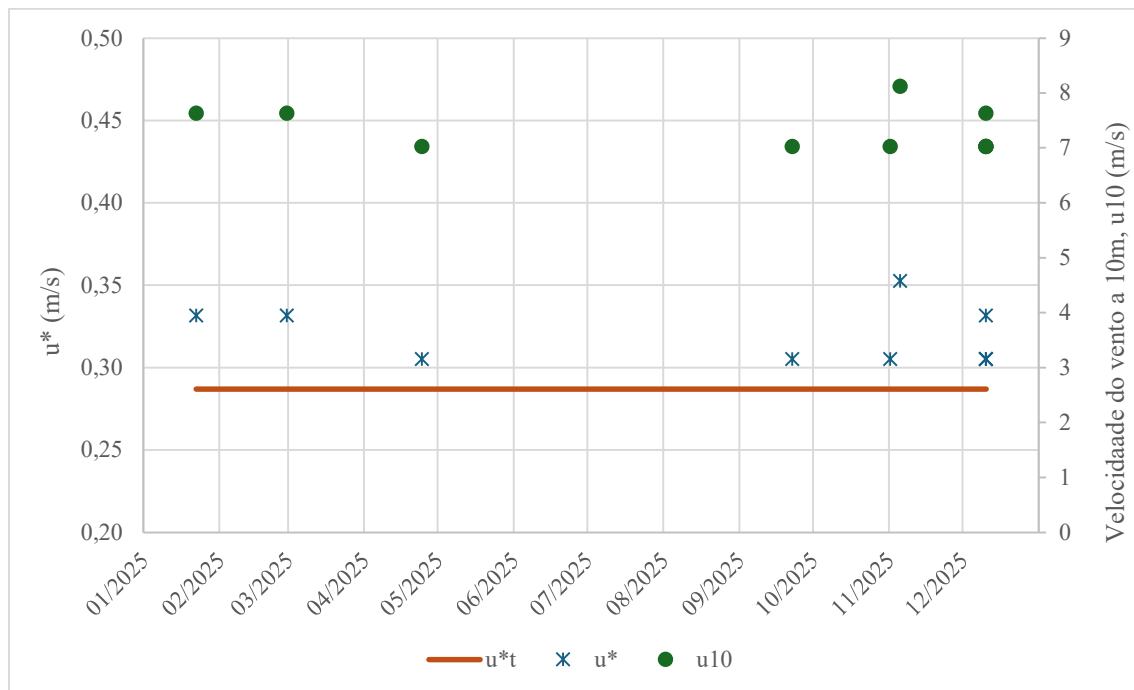
A umidade antecedente do solo, decorrente de eventos de precipitação, tende a reduzir a suscetibilidade à erosão ao favorecer a compactação e a coesão das partículas superficiais. Nesse sentido, é importante destacar que a análise de modelagem realizada neste trabalho se ateve ao potencial máximo de erosão, considerando condições limite de solo seco e exposto (sem cobertura vegetal significativa). A intensidade real da emissão de partículas por erosão eólica pode ser significativamente menor nos períodos de chuva, com o solo úmido e nos quais as plantações de cana-de-açúcar estejam cobrindo o terreno. Entretanto, a ocorrência desse processo não depende exclusivamente de períodos de estiagem, uma vez que eventos extremos, como tempestades, ondas de calor, geadas e fenômenos associados ao El Niño e à La Niña, podem modificar as condições ao longo do ano e, conseqüentemente, a suscetibilidade à erosão eólica.

5.4 Compreensão da velocidade de fricção limiar

Para auxiliar na interpretação dos resultados obtidos, a Figura 10 apresenta o comportamento da velocidade de fricção (u_*) em relação à velocidade de fricção limiar (u_{*t}), estabelecida em (0,287 m/s). A análise foi direcionada aos eventos em que u_* excedeu o valor de u_* , condição necessária para a ocorrência da erosão eólica. O gráfico

apresenta os meses em que esses eventos erosivos foram observados, bem como a variação pela qual os valores de u_* ultrapassaram o limiar estabelecido.

Figura 9. Comparação entre a velocidade de fricção e a velocidade de fricção limiar nos eventos erosivos.



Fonte: Autores (Excel, 2026).

A compreensão desse comportamento auxilia a interpretação dos resultados obtidos, uma vez que a relação entre (u_*) e (u_{*t}) determina a ocorrência dos eventos erosivos e influencia as estimativas de potencial erosivo dos modelos avaliados. Observou-se que a diferença entre (u_*) e (u_{*t}) variou entre os eventos analisados. Os meses de novembro e dezembro apresentaram os maiores valores de (u_*) , indicando condições mais favoráveis à ocorrência da erosão eólica. Em contrapartida, os eventos registrados em fevereiro, março, maio e outubro apresentaram valores de (u_{*t}) mais próximos ao limiar estabelecido, sugerindo menor intensidade erosiva.

Verificou-se também que maiores valores de velocidade do vento a 10 m de altura (u_{10}) estiveram associados a maiores valores de velocidade de fricção (u_*), demonstrando que ventos mais intensos favorecem a superação da velocidade de fricção limiar e, consequentemente, a ocorrência dos eventos erosivos.

5.5 Matriz de análise comparativa

Por fim, foi elaborada uma matriz de análise comparativa (Anexo A) das diferentes abordagens de modelagem avaliadas, com o objetivo de sintetizar e compreender a aplicabilidade de cada modelo estudado.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A determinação da velocidade de fricção limiar possibilitou identificar as condições necessárias para a ocorrência da erosão eólica na área de estudo. Para as condições analisadas, verificou-se que velocidades do vento iguais ou superiores a 5,8 m/s (20,8 km/h) foram suficientes para promover o desprendimento e o transporte de partículas em solos secos, descobertos e com predominância textural franco arenosa.

A comparação entre os modelos da US EPA (2006), Shaw et al. (2008) e Choi e Fernando (2008) evidenciou que, embora todos tenham apresentado comportamento temporal semelhante na identificação dos períodos favoráveis à erosão, diferenças significativas foram observadas nas estimativas obtidas. O modelo da US EPA (2006) apresentou valores superiores aos demais modelos avaliados. Ressalta-se que esse modelo foi originalmente desenvolvido para aplicação em pátios industriais e leitos expostos, utilizando a variável *fastest mile of wind*, enquanto, neste estudo, foi aplicado a condições de solo agrícola e a dados de velocidade do vento, o que representa uma extrapolação de sua aplicação original e pode contribuir para a superestimação dos resultados obtidos.

A análise temporal demonstrou que o mês de dezembro apresentou o maior número de eventos erosivos, justificando os maiores valores estimados pelos modelos analisados. Por outro lado, embora novembro tenha registrado menor número de eventos erosivos, foram observados valores expressivos de potencial erosivo, associados à ocorrência de ventos mais intensos. Adicionalmente, apesar de maio a agosto não apresentar elevadas estimativas de emissão de PM₁₀, destaca-se que esse período coincide com a colheita da cana-de-açúcar, quando o solo tende a permanecer mais exposto e sujeito ao manejo agrícola, aumentando sua suscetibilidade à erosão eólica.

A elaboração da matriz comparativa permitiu sintetizar as principais características dos modelos avaliados, reunindo informações sobre o tipo de modelagem, parâmetros de entrada, escalas de aplicação, saídas geradas e objetivos específicos. Dessa forma, essa sistematização pode auxiliar futuras pesquisas relacionadas ao estudo da erosão eólica e à avaliação das emissões de material particulado.

Por fim, o presente estudo contribuiu para o entendimento dos processos de emissão de poeira por erosão eólica e para a quantificação desse fenômeno em condições agrícolas. Os resultados obtidos reforçam a relevância dessa temática no contexto da qualidade do ar e dos potenciais impactos associados à exposição ao material particulado.

6.1 Recomendações para trabalhos futuros

Ressalta-se que as análises desenvolvidas neste estudo foram realizadas para uma área de aproximadamente 1 ha. Entretanto, considerando que o município de Rio Claro possui 22.005 ha cultivados com cana-de-açúcar, evidencia-se a importância da expansão desse tipo de avaliação para escalas espaciais maiores, de modo a compreender de forma mais abrangente o potencial de emissão de partículas associado à erosão eólica em regiões de expressiva atividade agrícola.

Destaca-se que estudos sobre erosão eólica em áreas agrícolas brasileiras ainda são limitados, apesar da importância da atividade agrícola no país. Assim, torna-se fundamental ampliar as pesquisas relacionadas à emissão de partículas provenientes de solos agrícolas e aos potenciais impactos ambientais e à saúde pública decorrentes da exposição ao material particulado atmosférico.

Recomenda-se a aplicação da metodologia utilizada neste estudo para toda a área de produção de cana-de-açúcar do município de Rio Claro, considerando sua extensa área cultivada. Adicionalmente, sugere-se a avaliação da aplicabilidade dos modelos em outros tipos de solo suscetíveis à erosão eólica, como áreas submetidas à exploração minerária.

Também se fazem necessárias pesquisas focadas na avaliação experimental da velocidade de fricção limiar para os solos da região e na avaliação das sensibilidades e incertezas dos modelos com respeito aos dados meteorológicos e aos parâmetros da modelagem.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. C. **Risco de erosão eólica**. Catástrofes Mistas, v. 9, p. 155, 2019.
- ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2001.
- ALLWINE, K.J., RUTZ, F.C., SHAW, W.J., RISHEL, J.P., FRITZ, B.G., CHAPMAN, E.G., HOOPES, B.L., SEIPLE, T.E. **DUSTRAN 1.0 User's Guide: A GIS-Based Atmospheric Dust Dispersion Modeling System**. Technical Report PNNL 16055. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington. 2006.
- BAGNOLD, R. **The Physics of Blown Sand and Desert Dunes**. Methuen, New York, 1941.
- BASTOS. C. A. B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. Y. Y. **A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico-pesquisas e tendências**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, Rio Grande/RS, v. 1, p. 17-26, 1999.
- CENTRO DE ANÁLISE E PLANEJAMENTO AMBIENTAL (CEAPLA). **Atlas ambiental da Bacia do Rio Corumbataí**. 2010.
- CENTRO DE ANÁLISE E PLANEJAMENTO AMBIENTAL (CEAPLA). **Sobre a estação meteorológica**. Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP, Rio Claro. Disponível em: <https://igce.rc.unesp.br/#!/unidade-auxiliar/ceapla/dados-meteorologicos4738/sobre-a-estacao-meteorologica/>. Acesso em: 3 mar. 2026.
- CHEN, F., DUDHIA, J. **Coupling an advanced land surface hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system**. Part I: model implementation and sensitivity. Monthly Weather Review 129, 569–585. 2001.
- CHENG, H.; LIU, C.; LI, J.; ZOU, X.; LIU, B.; KANG, L.; FANG, Y. **Wind erosion mass variability with sand bed in a wind tunnel**. Soil and Tillage Research, v. 165, p. 181–189, 2017
- CHEPIL, W. S. **Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement of soil by wind**. Soil Science, v. 60, n. 4, p. 305–320, 1945.

CHOI, Y.-J.; FERNANDO, H. J. S. **Implementation of a windblown dust parameterization into MODELS-3/CMAQ: application to episodic PM events in the US/Mexico border.** *Atmospheric Environment*, v. 42, n. 25, p. 6039-6046, 2008.

CLAIBORN, C.S., FINN, D., LARSON, T.V., KOENIG, J.Q. **Windblown dust contributions to high PM_{2.5} concentrations.** *Journal of the Air and Waste Management Association* 50, 1440–1455. 2000.

CLOW, D. W.; WILLIAMS, M. W.; SCHUSTER, P. F. **Increasing aeolian dust deposition to snowpacks in the Rocky Mountains inferred from/snowpack, wet deposition, and aerosol chemistry.** *Atmospheric Environment*, v. 146, p. 183–194, 2016. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.06.076. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231016305179>. Acesso em: 09 jan. 2026.

DE VISSCHER, A. **Air dispersion modeling: foundations and applications.** John Wiley & Sons, 2013.

DUBREUIL, V.; FANTE, K. P.; PLANCHON, O.; SANT'ANNA NETO, J. L. **Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015.** *Confins – Revue franco-brésilienne de géographie*, n. 37, 2018. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/15738>. Acesso em: 3 mar. 2026.

FENG, G.; SHARRATT, B. **Validation of WEPS for soil and PM₁₀ loss from agricultural fields within the Columbia Plateau of the United States.** *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 32, n. 5, p. 743–753, 2007.

GILLETTE, D. A.; WALKER, T. R. **Characteristics of airborne particles produced by wind erosion of sandy soil, High Plains of West Texas.** *Soil Science*, p. 97–110, 1977.

GILLETTE, D. A.; ADAMS, J.; ENDO, A.; SMITH, D.; KIHLE, R. **Threshold velocities for input of soil particles into the air by desert soils.** *Journal of Geophysical Research*, v. 85, n. C10, 1980.

GILLETTE, D. A.; PASSI, R. **Modeling dust emission caused by wind erosion.** *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 93, n. D11, p. 14233–14242, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1029/JD093iD11p14233>.

GRINI, A., ZENDER, C.S. **Roles of saltation, sandblasting, and wind speed variability on mineral dust aerosol size distribution during the Puerto Rican Dust Experiment (PRIDE).** Journal of Geophysical Research 109, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1029/2003JD004233>.

HAGEN, L. **A wind erosion prediction system to meet user needs.** Journal of Soil and Water Conservation, v. 46, p. 106-111, 1991.

HAGEN, L. J. **Evaluation of the Wind Erosion Prediction System (WEPS) erosion submodel on cropland fields.** Environmental Modelling & Software, v. 19, n. 2, p. 171–176, 2004.

HAGEN, L. **Wind Erosion Prediction System (WEPS) technical description: erosion submodel.** In: WEPP/WEPS Symposium. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1995.

HAGEN, L.; WAGNER, L.; SKIDMORE, E. **Analytical solutions and sensitivity analyses for sediment transport in WEPS.** Transactions of the ASAE, v. 42, p. 1715–1721, 1999.

IPCC. **Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate.** In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

JARRAH, M.; MAYEL, Sonia; TATARKO, John; FUNK, Roger; KUKA, Katrin. **A review of wind erosion models: Data requirements, processes, and validity.** Catena, v. 187, p. 104388, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104388>.

KWON, H.J., CHO, S.H., CHUN, Y., LAGARDE, F., PERSHAGEN, G. **Effects of the Asian dust events on daily mortality in Seoul, Korea.** Environmental Research Section A 90, 1–5. 2002.

LIU, C.M., YOUNG, C.Y., LEE, Y.C. **Influence of Asian dust storms on air quality in Taiwan.** Science of the Total Environment 368, 884–897. 2006.

LYLES, L. **Basic wind erosion processes.** Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 22, p. 91–101, 1988.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. **A review of erosion and sediment transport models.** Environmental Modelling & Software, v. 18, p. 761–799, 2003.

MONTEIRO, C. A. F. **A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo.** Instituto de Geografia - USP, São Paulo. 130 P, 1973.

NICKOVIC, S.; KALLOS, G.; PAPADOPOULOS, A.; KAKALIAGOU, O. **A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere.** Journal of Geophysical Research, v. 106, n. D16, p. 18113–18129, 2001. DOI: 10.1029/2000JD900794.

NOGUEIRA, T. **Propriedades e suscetibilidade à erosão do solo no entorno de área úmida (Rio Claro, SP).** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 2021.

NSW Government – Environment and Heritage. **Wind erosion: what is wind erosion? What are the causes and effects, and how can it be prevented?** New South Wales: NSW Government, atualizado em 30 jan. 2020. Disponível em: <https://www.environment.nsw.gov.au/topics/land-and-soil/soil-degradation/wind-erosion>. Acesso em: 20 jan. 2026.

OLIVEIRA, J.B. de. **Solos do Estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico.** Campinas, Instituto agrônomo, 1999, 112 p. (Boletim científico, 45).

OMS – Organização Mundial da Saúde. **Diretrizes globais de qualidade do ar da OMS: partículas inaláveis (MP2,5 e MP10), ozônio, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e monóxido de carbono.** Resumo executivo. Washington, D.C.: Organização Pan-Americana da Saúde; 2021. Licença: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. DOI: <https://doi.org/10.37774/9789275724613>.

PANACHUKI, E.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A. C. T.; CARVALHO, D. F. de URCHER, M. A. **Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V.10, n 2, p. 261-268, 2006.

PILACHEVSKY, T.; PINTO, S. A. F. **Avaliação da distribuição da cultura de cana-de-açúcar no município de Rio Claro (SP) por meio de geotecnologias.** 2011.

- PROSPERO, J.M., LAMB, P.J. **African droughts and dust transport to the Caribbean: climate change implication.** Science 302, 1024–1027. 2003.
- RICE, M.A., MCEWAN, I.K., MULLINS, C.E. **A conceptual model of wind erosion of soil surfaces by saltating particles.** Earth Surface Processes and Landforms 24, 383–392. 1999.
- SHAO, Y. (ed.). **Physics and modelling of wind erosion.** Dordrecht: Springer Netherlands, 2008.
- SHAW, W. J.; ALLWINE, K. J.; FRITZ, B. G.; RUTZ, F. C.; RISHEL, J. P.; CHAPMAN, E. G. **An evaluation of the wind erosion module in DUSTAN.** Atmospheric Environment, v. 42, n. 8, p. 1907–1921, 2008.
- SILVA, M. L.N; CURI, N.; LIMA, L. M.; FERREIRA, M. M. **Avaliação de métodos indiretos e determinação da erodibilidade de latossolos brasileiros.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 35, n. 6, p. 1207-1220, 2000.
- SILVA, M. S. L. **Estudos da erosão.** Petrolina: Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária (MAARA); EMBRAPA; CPATSA; CTTA, 1995.
- SOUSA, S. I. V.; PIRES, J. C. M.; MARTINS, E. M.; FORTES, J. D. N.; ALVIM-FERRAZ, M. C. M.; MARTINS, F. G. **Short-term effects of air pollution on respiratory morbidity at Rio de Janeiro – Part I: air pollution assessment.** Environmental International, v. 44, p. 18–25, 2012.
- SPADOTTO, C. A. **Classificação de impacto ambiental.** Comitê de Meio Ambiente, Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, 2002. Disponível em: <http://www.cnpma.embrapa.br/herbicidas/>.
- STALLINGS, J. H. **Mechanics of wind erosion.** Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1951. (Technical Paper, 98).
- SUTER-BURRI, K.; GROMKE, C.; LEONARD, K. C.; GRAF, F. **Spatial patterns of aeolian sediment deposition in vegetation canopies: Observations from wind tunnel experiments using colored sand.** Aeolian Research, v. 8, p. 65–73, 2013. DOI: 10.1016/j.aeolia.2012.11.002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875963712000729>. Acesso em: 09 jan. 2026.

TATARKO, J.; WAGNER, L. E.; FOX, F. **The wind erosion prediction system and its use in conservation planning.** In: WENDROTH, O. (Ed.). Bridging Among Disciplines by Synthesizing Soil and Plant Processes. Madison, WI: ASA, CSSA and SSSA, 2019. v. 8. (Advances in Agricultural Systems Modeling).

TORRES, L. M.; PINHEIRO, C. D. P. S.; AZEVEDO, S. D.; RODRIGUES, P. R. S.; SANDIM, D. P. R. **Poluição atmosférica em cidades brasileiras: uma breve revisão dos impactos na saúde pública e meio ambiente.** *Naturae*, v. 2, n. 1, p. 23–33, 2020. DOI: 10.6008/CBPC2674-6441.2020.001.0003.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). Natural Resources Conservation Service (NRCS). **Wind Erosion Prediction System.** Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/resources/tech-tools/wind-erosion-prediction-system>.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). AP-42: capítulo 13.2.5 – **Industrial wind erosion.** Washington, D.C., 2006. Disponível em: <https://www.epa.gov/>.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia.** Versão digital 2. Recife. 2006. Disponível em: [CAPÍTULO I](#). Acesso em: 3 mar. 2026.

VERDUM, R., VIEIRA, C. L., CANEPPELE, J. C. G. **Métodos e técnicas para o controle da erosão e conservação do solo.** Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2016. 50 f. il.

VISSER, S. M.; STROOSNIJDER, L.; CHARDON, W. J. **Nutrient losses by wind and water: measurements and modelling.** *Catena*, Amsterdam, v. 63, n. 1, p. 1–22, 2005. DOI: 10.1016/j.catena.2005.07.003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.07.003>.

WAGNER, L. E.; FOX, F. A. **The management submodel of the wind erosion prediction system.** *Applied Engineering in Agriculture*, v. 29, n. 3, p. 361-372, 2013.

WIERINGA, J. **Representative roughness parameters for homogeneous terrain.** *Boundary-Layer Meteorology*, v. 63, p. 323–363, 1993.

ANEXO A. Matriz comparativa.

Modelo	Primeira referência	Tipo de modelo	Escala temporal	Escala espacial
US EPA (2006)	Chepil (1952) e Gillette (1988)	Empírico	Eventos de curta duração a estimativas anuais	Áreas agrícolas, pilhas de armazenamento de agregados a céu aberto e áreas expostas de instalação industrial
Shaw et. al (2008)	Gillette e Passi (1988)	Semiempírico	Eventos erosivos e avaliações temporais de curto prazo	Áreas agrícolas e superfícies expostas
Choi & Fernando (2008)	Liu e Westphal (2001)	Semiempírico	Eventos erosivos em base horária	Áreas com solos suscetíveis à erosão eólica, especialmente regiões áridas e semiáridas com baixa cobertura vegetal
Modelo	Parâmetros de entrada	Saída do modelo	Objetivos específicos	
US EPA (2006)	Maior rajada de vento medida; altura da rugosidade; velocidade de fricção limite para início da erosão	Estimativa do fator de emissão e potencial de emissão de material particulado por erosão eólica	Estimar emissões atmosféricas de material particulado provenientes da erosão em áreas expostas (pátios e pilhas)	
Shaw et. al (2008)	Altura da rugosidade; velocidade do vento medida; velocidade de fricção limite para início da erosão; características da superfície exposta; valores determinado das variáveis dependendo do solo de estudo	Estimativa do fluxo da taxa de emissão de sedimentos transportados pelo vento	Avaliar o fluxo da taxa de emissão do vento e estimar o transporte de partículas em superfícies suscetíveis à erosão eólica	
Choi & Fernando (2008)	Altura da rugosidade; velocidade do vento medida; velocidade de fricção limite para início da erosão	Estimativa do fluxo da taxa de emissão de PM10 durante períodos de ventos	Aprimorar previsões de emissão de material particulado	