

MODELAGEM SIMPLIFICADA DE DISPERSÃO DE POLUENTES: UMA ANÁLISE TEÓRICA E REFLEXIVA

SIMPLIFIED POLLUTANT DISPERSION MODELING: A THEORETICAL AND
REFLECTIVE ANALYSIS

Engenharias, Ciências da Saúde • 17/06/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/781655736](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/781655736)

Daiana Silva Reis Santos¹

Ana Paula Ferreira Mendes²

Joyce Cristina De Cássio³

Magno Junior de Jesus⁴

Bruno Furtado Garcia⁵

Leyser Rodrigues Oliveira⁶

RESUMO

Objetivo: Analisar criticamente, com base na literatura científica, os princípios da modelagem simplificada de dispersão de poluentes atmosféricos, discutindo suas potencialidades, limitações e implicações na avaliação de riscos ambientais, gestão da qualidade do ar e proteção da saúde pública. Método: Trata-se de um ensaio teórico-reflexivo, desenvolvido a partir de revisão bibliográfica qualitativa e exploratória da literatura nacional e internacional relacionada à poluição atmosférica e à modelagem de dispersão de poluentes. As buscas foram realizadas em bases de dados como Scientific Electronic Library Online (SciELO), PubMed, ScienceDirect e Google Scholar, incluindo artigos científicos, documentos técnicos e obras clássicas da área ambiental e atmosférica. A análise dos estudos ocorreu de forma descritiva e crítica, organizando-se em eixos temáticos relacionados aos fundamentos da modelagem atmosférica, aplicações regulatórias, limitações operacionais e implicações para a análise de riscos ambientais. Resultados: Os achados evidenciam que os modelos simplificados de dispersão atmosférica permanecem amplamente utilizados em estudos preliminares, processos de licenciamento ambiental e avaliações rápidas de impacto devido à praticidade operacional, menor exigência de dados meteorológicos e reduzido custo computacional. Observou-se que ferramentas como modelos gaussianos, SCREEN3 e AERMOD apresentam importante aplicabilidade na estimativa de concentrações atmosféricas e identificação de áreas potencialmente impactadas. Entretanto, verificaram-se limitações relacionadas às simplificações adotadas, especialmente em cenários urbanos complexos, regiões de relevo acidentado e ambientes sujeitos à elevada variabilidade atmosférica, podendo comprometer a precisão das estimativas e influenciar processos de tomada de decisão ambiental. Conclusão: A modelagem simplificada de dispersão

atmosférica configura-se como importante ferramenta de apoio à avaliação ambiental e à gestão da qualidade do ar, especialmente em contextos de baixa disponibilidade de dados e limitações estruturais. Contudo, sua utilização deve ocorrer de forma crítica e contextualizada, considerando as incertezas inerentes às simplificações metodológicas adotadas. Destaca-se a necessidade de integração entre modelagem atmosférica, monitoramento ambiental e políticas públicas voltadas à proteção da saúde coletiva e à redução dos impactos da poluição atmosférica sobre os ecossistemas e a população.

Palavras-chave: Poluição atmosférica; Modelagem de dispersão; Qualidade do ar; Saúde pública; Modelos simplificados.

ABSTRACT

Objective: To critically analyze, based on the scientific literature, the principles of simplified atmospheric pollutant dispersion modeling, discussing its potentialities, limitations, and implications for environmental risk assessment, air quality management, and public health protection. Method: This is a theoretical-reflective essay developed through a qualitative and exploratory bibliographic review of national and international literature related to air pollution and pollutant dispersion modeling. Searches were conducted in databases such as Scientific Electronic Library Online (SciELO), PubMed, ScienceDirect, and Google Scholar, including scientific articles, technical documents, and classical works in the environmental and atmospheric fields. The analysis of the studies was carried out descriptively and critically, organized into thematic axes related to the fundamentals of atmospheric modeling, regulatory applications, operational limitations, and implications for environmental risk analysis. Results: The findings demonstrate that simplified atmospheric dispersion models remain widely used in

preliminary studies, environmental licensing processes, and rapid impact assessments due to their operational practicality, lower requirement for meteorological input data, and reduced computational cost. Tools such as Gaussian models, SCREEN3, and AERMOD showed important applicability in estimating atmospheric concentrations and identifying potentially impacted areas. However, limitations associated with the adopted simplifications were identified, especially in complex urban environments, regions with rugged topography, and areas subject to high atmospheric variability, which may compromise the accuracy of estimates and influence environmental decision-making processes. Conclusion: Simplified atmospheric dispersion modeling constitutes an important supporting tool for environmental assessment and air quality management, particularly in contexts characterized by limited data availability and structural constraints. However, its application must occur in a critical and contextualized manner, considering the uncertainties inherent to the adopted methodological simplifications. The integration between atmospheric modeling, environmental monitoring, and public policies aimed at protecting collective health and reducing the impacts of atmospheric pollution on ecosystems and human populations is essential.

Keywords: Air pollution; Dispersion modeling; Air quality; Public health; Simplified models.

1. INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica constitui um dos principais desafios ambientais e sanitários da contemporaneidade, estando diretamente associada ao crescimento urbano desordenado, à intensificação das atividades industriais, ao aumento da frota

veicular e à ampliação de práticas antrópicas potencialmente poluidoras. A emissão contínua de contaminantes provenientes de fontes industriais, processos de combustão, queimadas e atividades urbanas contribui significativamente para a degradação da qualidade do ar, promovendo impactos ambientais, alterações climáticas e importantes riscos à saúde humana. Nesse contexto, a exposição prolongada aos poluentes atmosféricos tem sido relacionada ao aumento da incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares, agravamento de condições crônicas, elevação das taxas de mortalidade e comprometimento da qualidade de vida da população, além de provocar danos aos ecossistemas e desequilíbrios ambientais em escala local, regional e global (ANDRADE et al., 2022; SILVA et al., 2021).

Após serem emitidos na atmosfera, os poluentes passam por processos complexos de transporte, transformação química, deposição e dispersão, influenciados por variáveis meteorológicas, topográficas e físico-químicas. Elementos como velocidade e direção do vento, estabilidade atmosférica, temperatura, umidade relativa do ar e características do relevo interferem diretamente na dinâmica de deslocamento e concentração dos contaminantes atmosféricos. Em regiões metropolitanas, por exemplo, episódios de inversão térmica podem favorecer o acúmulo de material particulado próximo à superfície, intensificando os riscos à saúde pública e ampliando a exposição populacional aos poluentes. Da mesma forma, áreas urbanas com relevo acidentado apresentam padrões complexos de circulação atmosférica, dificultando a dispersão dos contaminantes e aumentando a heterogeneidade espacial das concentrações atmosféricas (SEINFELD; PANDIS, 2016).

Nesse cenário, compreender o comportamento da dispersão atmosférica torna-se fundamental não apenas para a avaliação da qualidade do ar, mas também para a identificação de áreas potencialmente impactadas, estimativa da exposição humana e ambiental e desenvolvimento de estratégias de controle, monitoramento e mitigação dos impactos decorrentes da poluição atmosférica. Sob a perspectiva da análise de riscos ambientais, a modelagem de dispersão assume papel estratégico ao possibilitar a previsão de cenários de contaminação atmosférica e subsidiar processos de tomada de decisão relacionados à gestão ambiental, ao planejamento urbano e à proteção da saúde coletiva.

A modelagem matemática da dispersão atmosférica consolidou-se, portanto, como importante ferramenta técnico-científica de avaliação ambiental, permitindo representar o comportamento dos poluentes na atmosfera por meio de equações capazes de estimar concentrações e prever padrões de dispersão em diferentes cenários ambientais. Esses modelos apresentam ampla aplicabilidade em estudos ambientais, monitoramento da qualidade do ar, análises de risco, processos de licenciamento ambiental, planejamento territorial e formulação de políticas públicas voltadas à saúde ambiental e à gestão da qualidade atmosférica (ZANNETTI, 1990). Em processos regulatórios, modelos gaussianos simplificados são frequentemente utilizados para estimar concentrações de poluentes no entorno de fontes emissoras, como indústrias, aterros sanitários e chaminés industriais, subsidiando estudos de impacto ambiental e avaliações preliminares de risco.

Entre as diferentes abordagens disponíveis, os modelos regulatórios destacam-se pela praticidade operacional, menor necessidade de dados meteorológicos e reduzido custo computacional,

características que favorecem sua utilização em análises preliminares e em contextos marcados por limitações estruturais e baixa disponibilidade de dados ambientais. Ferramentas como SCREEN3 e AERMOD permanecem amplamente empregadas em estudos de dispersão atmosférica devido à rapidez operacional e à capacidade de fornecer estimativas iniciais da concentração de poluentes em diferentes condições ambientais (MOREIRA et al., 2020). Em muitos municípios brasileiros, especialmente aqueles com estrutura limitada de monitoramento atmosférico, esses modelos constituem uma das principais ferramentas utilizadas em processos de licenciamento e avaliação ambiental.

Entretanto, apesar das vantagens relacionadas à facilidade de aplicação e agilidade analítica, os modelos simplificados apresentam limitações importantes quanto à precisão e à capacidade de representar fenômenos atmosféricos complexos. Premissas como terreno plano, condições meteorológicas constantes e ausência de transformações químicas podem resultar em subestimação ou superestimação das concentrações atmosféricas, especialmente em ambientes urbanos densamente ocupados ou em regiões com elevada variabilidade meteorológica. Além disso, embora os avanços tecnológicos tenham ampliado a disponibilidade de modelos atmosféricos mais sofisticados, observa-se que muitos estudos ambientais ainda utilizam modelos simplificados sem aprofundamento crítico acerca das incertezas associadas aos resultados obtidos e de suas implicações na estimativa da exposição humana e ambiental aos poluentes atmosféricos.

Nesse sentido, a discussão crítica acerca das potencialidades, limitações e implicações práticas dos modelos simplificados permanece relevante tanto no campo científico quanto profissional,

especialmente diante da crescente necessidade de ferramentas capazes de subsidiar avaliações de risco ambiental, processos de tomada de decisão e estratégias de gestão da qualidade do ar. Diante desse contexto, emerge o seguinte questionamento: em que medida os modelos simplificados de dispersão atmosférica são adequados para subsidiar avaliações de risco ambiental e processos de gestão da qualidade do ar em cenários caracterizados por baixa disponibilidade de dados e limitações estruturais?

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo analisar criticamente os princípios da modelagem simplificada de dispersão de poluentes atmosféricos, discutindo suas potencialidades, limitações e implicações práticas na avaliação de riscos ambientais, gestão da qualidade do ar e processos de tomada de decisão ambiental.

2. OBJETIVO

Analisar criticamente os princípios da modelagem simplificada de dispersão de poluentes atmosféricos, discutindo suas potencialidades, limitações e implicações práticas na avaliação de riscos ambientais, gestão da qualidade do ar e processos de tomada de decisão ambiental.

3. METODOLOGIA

Trata-se de um ensaio teórico-reflexivo, desenvolvido a partir das discussões realizadas na disciplina de Risco Ambiental, vinculada ao Programa de Pós-Graduação em Saúde e Meio Ambiente. O estudo foi construído ao longo do desenvolvimento da disciplina, tendo como foco a análise crítica dos princípios relacionados à modelagem simplificada de dispersão de poluentes atmosféricos, considerando

suas aplicabilidades, potencialidades e limitações no contexto dos estudos ambientais.

A construção teórica fundamentou-se em pesquisa bibliográfica de natureza qualitativa, realizada de forma não sistemática, com caráter exploratório e reflexivo. A seleção dos estudos ocorreu de acordo com a relevância científica, pertinência temática e contribuição teórica para a discussão proposta, priorizando publicações recentes, sem desconsiderar obras clássicas consideradas fundamentais para a compreensão dos conceitos relacionados à dispersão atmosférica e à modelagem ambiental.

A busca bibliográfica abrangeu publicações nos idiomas português, inglês e espanhol, utilizando descritores relacionados ao tema em estudo. Os Descritores em Ciências da Saúde (DeCS) e termos livres utilizados incluíram: “poluição atmosférica”, “dispersão de poluentes”, “modelagem atmosférica”, “modelos simplificados”, “qualidade do ar”, “dispersão atmosférica”, “*air pollution*”, “*air dispersion modeling*”, “*air quality*” e “*environmental modeling*”.

As buscas foram realizadas nas bases de dados e bibliotecas virtuais *Medical Literature Analysis and Retrieval System Online* (MEDLINE), via *PubMed*, *ScienceDirect*, *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), *Cumulative Index to Nursing and Allied Health Literature* (CINAHL) e *Google Scholar*. Foram incluídos artigos científicos, documentos técnicos e publicações com relevância teórica para o desenvolvimento da temática proposta. Por outro lado, foram excluídos estudos publicados em anais de eventos, cartas ao editor, revisões sem aderência temática e materiais que não apresentassem relação direta com os objetivos do estudo.

Após a definição dos materiais elegíveis, procedeu-se à leitura exploratória, analítica e interpretativa dos estudos selecionados, buscando identificar conteúdos compatíveis com os pressupostos teóricos relacionados à modelagem da dispersão atmosférica. A análise dos dados ocorreu de forma descritiva e reflexiva, permitindo a organização das discussões em eixos temáticos voltados à compreensão dos fundamentos, aplicações e limitações dos modelos simplificados de dispersão de poluentes.

As referências utilizadas contemplaram literaturas nacionais e internacionais, considerando que os fenômenos relacionados à poluição atmosférica e à dispersão de poluentes possuem relevância global e interdisciplinar. Dessa forma, a organização teórica do estudo possibilitou a construção de categorias reflexivas destinadas à discussão crítica da temática proposta, contribuindo para a compreensão da modelagem simplificada como ferramenta de avaliação ambiental.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos estudos selecionados permitiu identificar diferentes eixos temáticos relacionados à modelagem simplificada de dispersão atmosférica, envolvendo aspectos conceituais da poluição do ar, fundamentos físico-matemáticos da dispersão atmosférica, aplicações regulatórias dos modelos de dispersão, limitações operacionais, avaliação de riscos ambientais e implicações para a gestão da qualidade do ar e proteção da saúde pública.

Os estudos analisados evidenciam que, apesar do avanço de modelos atmosféricos complexos e de alta resolução computacional, os modelos simplificados permanecem amplamente utilizados em

avaliações preliminares, processos de licenciamento ambiental e análises de risco devido à praticidade operacional, menor exigência de dados meteorológicos e rapidez na obtenção de resultados. Entretanto, a literatura também aponta importantes limitações relacionadas às simplificações adotadas por esses modelos, especialmente em cenários urbanos complexos, regiões com relevo acidentado e ambientes sujeitos à elevada variabilidade atmosférica.

Além disso, observou-se crescente preocupação científica acerca das incertezas associadas às estimativas produzidas por modelos simplificados, sobretudo quando utilizados como subsídio para processos de tomada de decisão ambiental e avaliação da exposição populacional aos poluentes atmosféricos. Nesse sentido, os estudos reforçam a necessidade de interpretação crítica dos resultados obtidos, considerando as potencialidades e restrições metodológicas dessas ferramentas no contexto da gestão ambiental e da análise de riscos relacionados à qualidade do ar.

4.1. Poluição Atmosférica e Conceitos Básicos

A poluição atmosférica constitui um dos principais desafios ambientais e sanitários da contemporaneidade, estando diretamente relacionada ao crescimento urbano, à intensificação das atividades industriais, ao aumento da frota veicular e à ampliação das ações antrópicas potencialmente poluidoras. Esse fenômeno caracteriza-se pela presença de substâncias químicas, partículas ou agentes biológicos no ar em concentrações capazes de provocar danos ao meio ambiente, alterações ecossistêmicas e agravos à saúde humana. Entre as principais fontes emissoras destacam-se os veículos automotores, processos industriais,

queimadas, atividades mineradoras e sistemas de geração de energia (SEINFELD; PANDIS, 2016; ANDRADE et al., 2022).

Os poluentes atmosféricos podem ser classificados em primários e secundários. Os poluentes primários são emitidos diretamente pelas fontes emissoras, como monóxido de carbono, dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e material particulado. Já os poluentes secundários resultam de reações químicas que ocorrem na atmosfera a partir de compostos previamente emitidos, sendo o ozônio troposférico um dos principais exemplos (ZANNETTI, 1990).

Além dos impactos ambientais, a degradação da qualidade do ar possui importante relação com o aumento de doenças respiratórias e cardiovasculares, especialmente entre populações mais vulneráveis, como crianças, idosos e indivíduos com doenças crônicas. Estudos recentes indicam que a exposição prolongada aos poluentes atmosféricos contribui significativamente para o agravamento de problemas de saúde coletiva, aumento das internações hospitalares e redução da qualidade de vida da população (ANDRADE et al., 2022; SILVA et al., 2021).

Após serem emitidos, os contaminantes atmosféricos passam por processos de transporte, transformação química, deposição e dispersão. A dispersão corresponde ao espalhamento dessas substâncias em decorrência da ação do vento, da turbulência atmosférica e de diferentes condições meteorológicas, influenciando diretamente a concentração dos poluentes e a extensão de seus impactos ambientais (HOLMES; MORAWSKA, 2006).

Em grandes centros urbanos, episódios de inversão térmica favorecem o acúmulo de poluentes próximos à superfície, elevando

significativamente os níveis de exposição populacional e os riscos à saúde pública. Além disso, cidades caracterizadas por intensa verticalização urbana e relevo acidentado apresentam padrões atmosféricos mais complexos, dificultando a dispersão dos contaminantes e ampliando a heterogeneidade espacial das concentrações atmosféricas.

A dinâmica da dispersão depende de múltiplos fatores, como velocidade e direção do vento, estabilidade atmosférica, temperatura, umidade relativa do ar e características topográficas. Nesse contexto, compreender o comportamento dos poluentes na atmosfera torna-se fundamental para a avaliação da qualidade do ar, estimativa da exposição humana e desenvolvimento de estratégias de monitoramento e controle ambiental. Dessa forma, os modelos matemáticos de dispersão assumem papel relevante nos estudos ambientais, permitindo representar o comportamento dos poluentes e estimar áreas potencialmente impactadas pelas emissões atmosféricas.

4.2. Modelos Simplificados de Dispersão de Poluentes Atmosféricos

Os modelos simplificados de dispersão atmosférica consistem em representações matemáticas que descrevem, de forma aproximada, o comportamento dos poluentes na atmosfera por meio de um conjunto reduzido de variáveis e hipóteses idealizadas. Essas ferramentas são amplamente empregadas em estudos ambientais preliminares, avaliações rápidas de impacto e contextos caracterizados por limitação de dados meteorológicos ou necessidade de respostas operacionais mais ágeis (MOREIRA et al., 2020; ZANNETTI, 1990).

Sua principal relevância está na capacidade de fornecer estimativas iniciais da qualidade do ar, auxiliando processos de triagem ambiental, planejamento urbano, avaliação de impactos ambientais e análise preliminar de riscos atmosféricos. Além disso, são frequentemente utilizados como instrumentos de apoio à tomada de decisão em regiões com baixa densidade de estações de monitoramento, realidade observada em diversos municípios brasileiros (SILVA et al., 2021).

Entre os modelos mais utilizados destaca-se o modelo de pluma gaussiana, amplamente aplicado na simulação de fontes pontuais contínuas, como emissões industriais provenientes de chaminés, permitindo estimar a distribuição espacial das concentrações atmosféricas a partir de variáveis meteorológicas e características da fonte emissora (SEINFELD; PANDIS, 2016).

Ferramentas como o SCREEN3 permanecem amplamente utilizadas em estudos preliminares de licenciamento ambiental para estimar concentrações máximas de poluentes provenientes de fontes industriais pontuais. Já modelos como o AERMOD, recomendado pela U.S. Environmental Protection Agency (EPA) para aplicações regulatórias, apresentam maior refinamento na representação da camada limite atmosférica e continuam sendo empregados em avaliações da qualidade do ar, análises de impacto ambiental e estimativas de exposição atmosférica.

Apesar da praticidade operacional, os modelos simplificados apresentam limitações importantes relacionadas à representação de fenômenos atmosféricos complexos, como recirculação de ventos, influência de edificações, transformações químicas secundárias e variabilidade meteorológica de curta escala. Dessa forma, sua

utilização requer interpretação crítica dos resultados, especialmente em estudos voltados à avaliação de riscos ambientais e sanitários.

4.3. Premissas Adotadas nos Modelos Simplificados de Dispersão Atmosférica

A aplicação dos modelos simplificados baseia-se em um conjunto de premissas destinadas a reduzir a complexidade dos processos atmosféricos e tornar a modelagem matematicamente mais acessível. Embora essas hipóteses favoreçam a operacionalização dos modelos, também introduzem limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados (MOREIRA et al., 2020).

Uma das principais premissas refere-se à adoção do regime estacionário, no qual as condições meteorológicas e as taxas de emissão são consideradas constantes ao longo do tempo. Apesar de facilitar os cálculos, essa abordagem não contempla a variabilidade natural da atmosfera, caracterizada por alterações contínuas nas condições de vento, temperatura e estabilidade atmosférica.

Outra hipótese frequentemente utilizada consiste na homogeneidade do meio atmosférico, assumindo-se uniformidade de propriedades como temperatura, densidade do ar e intensidade da turbulência. Entretanto, a atmosfera apresenta comportamento altamente heterogêneo, sobretudo em áreas urbanizadas e regiões metropolitanas, nas quais fatores como verticalização urbana, circulação veicular intensa e diferenças topográficas interferem diretamente na dinâmica atmosférica (ANDRADE et al., 2022).

Além disso, muitos modelos consideram condições simplificadas de relevo, assumindo terreno plano e ausência de obstáculos físicos, como edificações e cobertura vegetal. Essa condição pode limitar

significativamente a representação da dinâmica real do escoamento do ar, especialmente em cidades com relevo acidentado, como Belo Horizonte, onde a topografia interfere diretamente na circulação atmosférica e na formação de zonas de estagnação de poluentes (SILVA et al., 2021).

Da mesma forma, a constância da velocidade e direção do vento constitui outra simplificação recorrente, embora a variabilidade atmosférica represente um dos principais desafios da modelagem de dispersão. Pequenas alterações nas condições meteorológicas podem modificar significativamente os padrões de transporte e diluição dos contaminantes.

Os modelos gaussianos também assumem que a dispersão dos poluentes segue distribuição estatística normal nas direções lateral e vertical. Apesar de fornecer uma representação matemática eficiente, essa abordagem corresponde a uma aproximação da realidade, sobretudo em cenários atmosféricos instáveis ou sujeitos à intensa turbulência.

Por fim, muitos modelos simplificados tratam os poluentes como substâncias conservativas, desconsiderando processos como reações químicas, deposição seca e úmida e transformações físicas. Embora essa simplificação reduza a complexidade operacional dos modelos, ela pode limitar sua aplicabilidade em estudos que demandem maior detalhamento das interações físico-químicas atmosféricas, especialmente em análises relacionadas à formação de ozônio troposférico e partículas secundárias (HOLMES; MORAWSKA, 2006).

4.4. Modelos Matemáticos de Dispersão: Visão Geral

A compreensão da dispersão de poluentes na atmosfera exige instrumentos analíticos capazes de representar fenômenos complexos de maneira sistematizada. Nesse contexto, os modelos matemáticos de dispersão assumem papel central ao possibilitar a representação do transporte, transformação e diluição de contaminantes atmosféricos por meio de equações matemáticas. Essas ferramentas permitem estimar a distribuição espacial e temporal das concentrações de poluentes, constituindo importante suporte tanto para pesquisas científicas quanto para ações de gestão ambiental (LACAVA, 2003).

A base conceitual da modelagem atmosférica está associada aos processos físicos que regem o comportamento dos poluentes no ar, especialmente a advecção e a difusão. A advecção corresponde ao transporte das partículas pelo movimento do vento, enquanto a difusão está relacionada ao espalhamento decorrente da turbulência atmosférica. A interação entre esses mecanismos permite representar, ainda que de forma aproximada, a dinâmica de dispersão e estimar concentrações em regiões sem monitoramento direto (SEINFELD; PANDIS, 2016).

De maneira geral, os modelos de dispersão podem ser classificados em modelos físicos e modelos numéricos. Os modelos físicos baseiam-se em experimentos controlados, frequentemente realizados em túneis de vento, nos quais são simuladas condições atmosféricas e interações entre o fluxo de ar, relevo e obstáculos urbanos. Essa abordagem possibilita a visualização direta da dispersão dos poluentes, sendo especialmente utilizada em estudos urbanos e de engenharia. Entretanto, seu uso é limitado pelo elevado custo operacional e pela dificuldade de reproduzir

integralmente a complexidade das condições atmosféricas reais (MARTINS, 2015).

Os modelos numéricos, por sua vez, constituem as ferramentas mais utilizadas atualmente. Fundamentados na resolução computacional de equações matemáticas, esses modelos simulam o comportamento dos poluentes a partir de variáveis meteorológicas e características das fontes emissoras. Dentro dessa categoria, destacam-se os modelos determinísticos, baseados em leis físicas, e os modelos estatísticos, construídos a partir de relações empíricas derivadas de dados observacionais (HOLMES; MORAWSKA, 2006).

Além das abordagens tradicionais, observa-se crescimento no uso de técnicas computacionais avançadas, como aprendizado de máquina e modelagem baseada em inteligência artificial, utilizadas para aprimorar a precisão das estimativas atmosféricas e ampliar a capacidade preditiva dos modelos.

Independentemente da abordagem adotada, os modelos de dispersão compartilham um objetivo fundamental: estimar concentrações de poluentes no espaço e no tempo. Essa capacidade preditiva permite identificar áreas potencialmente impactadas, avaliar riscos à saúde humana e subsidiar estratégias de controle ambiental, planejamento urbano e gestão da qualidade do ar.

4.4.1. Classificação dos Modelos de Dispersão

Os modelos de dispersão atmosférica podem ser classificados, de maneira geral, em modelos físicos e modelos numéricos ou estatísticos, cada qual fundamentado em diferentes estratégias de representação da dinâmica atmosférica.

Os modelos físicos baseiam-se em experimentos laboratoriais realizados em túneis de vento, câmaras atmosféricas ou tanques de água, nos quais são simuladas condições controladas para observar o comportamento das plumas de poluentes diante de diferentes padrões de vento, rugosidade do solo e obstáculos urbanos (PETERSON; SCHREIBER, 2015).

Essa abordagem permite visualização direta da dispersão e maior controle das variáveis experimentais, sendo especialmente útil em estudos urbanos e de engenharia. Entretanto, sua aplicação apresenta limitações relacionadas ao elevado custo operacional e à dificuldade de reproduzir integralmente a variabilidade atmosférica observada em condições reais.

Os modelos numéricos e estatísticos, por sua vez, constituem as ferramentas mais utilizadas atualmente em razão do avanço computacional. Os modelos numéricos fundamentam-se na resolução de equações matemáticas capazes de simular o transporte e a dispersão dos poluentes, podendo ser organizados em abordagens Eulerianas, baseadas em referenciais fixos no espaço, e Lagrangianas, que acompanham o deslocamento das parcelas de ar.

Já os modelos estatísticos utilizam relações empíricas derivadas de séries históricas e dados observacionais para estimar concentrações futuras de poluentes. Mais recentemente, observa-se a incorporação de técnicas computacionais avançadas, como métodos de aprendizado de máquina, utilizadas para aprimorar a precisão das estimativas atmosféricas e ampliar a capacidade preditiva dos modelos (HOLMES; MORRIS, 2017).

4.4.2. Tipos Mais Comuns de Modelos Simplificados de Dispersão de Poluentes Atmosféricos

Os modelos simplificados podem ser classificados conforme a forma como representam os processos de transporte e difusão de poluentes na atmosfera, apresentando diferentes níveis de detalhamento e aplicabilidade.

4.4.3. Modelo de Pluma Gaussiana (Gaussian Plume Model)

O modelo de pluma gaussiana é amplamente utilizado na análise da dispersão atmosférica, sendo considerado uma ferramenta clássica em estudos ambientais. Esse modelo assume que a dispersão dos poluentes segue distribuição normal nas direções lateral e vertical, permitindo estimar a concentração atmosférica a partir de parâmetros como taxa de emissão, velocidade do vento e características da turbulência atmosférica (HOLMES; MORAWSKA, 2006).

Sua aplicação é comum na avaliação de emissões industriais provenientes de fontes pontuais contínuas, como chaminés, sendo amplamente empregado em processos de licenciamento ambiental, avaliações preliminares de impacto atmosférico e estimativas de exposição populacional.

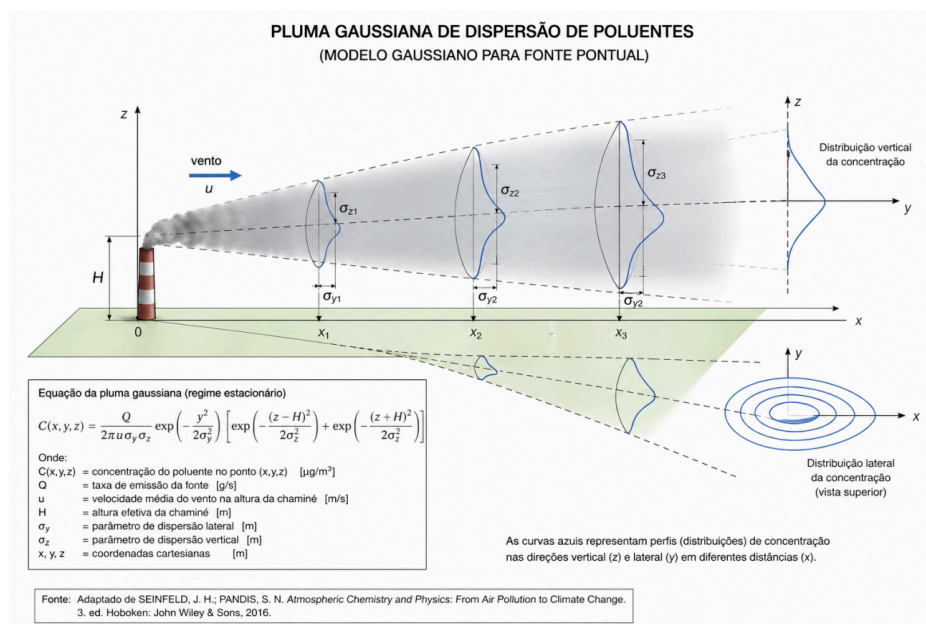


Figura 1 – Representação esquemática da dispersão atmosférica em modelo de pluma gaussiana.

Fonte: Adaptado de Seinfeld e Pandis (2016).

4.4.4. Modelo de Puff Gaussiano (Gaussian Puff Model)

O modelo de puff gaussiano (Gaussian Puff Model) representa uma evolução dos modelos gaussianos tradicionais, sendo utilizado principalmente para simular emissões descontínuas ou variáveis ao longo do tempo. Diferentemente do modelo de pluma gaussiana, que considera emissão contínua e condições atmosféricas estacionárias, o modelo puff representa a emissão como “pacotes” ou “nuvens” discretas de poluentes que se deslocam e se dispersam conforme as condições meteorológicas variam no tempo e no espaço. Essa abordagem permite maior flexibilidade na representação de cenários atmosféricos dinâmicos, sendo frequentemente aplicada em estudos envolvendo liberações acidentais de contaminantes, vazamentos industriais e eventos de curta duração. Entretanto, apesar de apresentar maior capacidade de adaptação às mudanças atmosféricas, o modelo puff também demanda maior volume de dados meteorológicos e maior capacidade computacional quando comparado aos modelos gaussianos simplificados tradicionais (TURNER, 1994).

A formulação matemática dos modelos de dispersão baseia-se, principalmente, na equação de advecção-difusão, responsável por descrever o transporte e o espalhamento de contaminantes na atmosfera sob influência do vento e da turbulência atmosférica (HANSEN; OLIVEIRA, 2019). Essa abordagem permite representar matematicamente o comportamento dos poluentes após sua emissão, considerando mecanismos físicos associados ao deslocamento, diluição e transformação das substâncias no ar.

$$(\partial C/\partial t) + u \cdot \nabla C = \nabla \cdot (K\nabla C) + S$$

Nessa equação, C representa a concentração do poluente, u corresponde ao vetor velocidade do vento, K refere-se ao coeficiente de difusividade turbulenta e S representa os termos de fonte ou remoção de contaminantes. De maneira geral, a advecção está relacionada ao transporte dos poluentes pelo vento médio, enquanto a difusão turbulenta promove o espalhamento da pluma em diferentes direções. A incorporação de processos adicionais, como deposição seca, deposição úmida e transformações químicas, determina o nível de complexidade adotado em cada modelo (ZANNETTI, 1990).

4.5. Comparativo: Modelos Complexos Versus Modelos Simplificados

A escolha entre modelos complexos e simplificados depende dos objetivos do estudo, da disponibilidade de dados meteorológicos e da capacidade computacional disponível. Modelos complexos, como os baseados em Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) e modelos tridimensionais como o WRF-Chem, incorporam processos

físico-químicos detalhados e permitem simulações de alta resolução espacial e temporal (FERREIRA; CARVALHO, 2020).

Entretanto, esses modelos exigem grande volume de dados meteorológicos, elevada capacidade computacional e maior tempo de processamento, fatores que podem limitar sua aplicação em contextos operacionais e regiões com infraestrutura limitada.

Em contrapartida, os modelos simplificados, como AERMOD e SCREEN3, utilizam premissas idealizadas da atmosfera, oferecendo rapidez de execução, menor exigência de dados e menor custo computacional. Por essa razão, permanecem amplamente utilizados em estudos preliminares, licenciamento ambiental e avaliações de curto prazo (TURNER, 1994).

A escolha entre modelos simplificados e modelos complexos envolve, portanto, um importante trade-off entre custo computacional, disponibilidade de dados meteorológicos, tempo de processamento e precisão analítica. Em avaliações preliminares de risco ambiental, a rapidez operacional dos modelos simplificados pode representar vantagem estratégica. Entretanto, em estudos epidemiológicos, planejamento urbano e análises atmosféricas de elevada complexidade, modelos mais robustos tornam-se necessários devido à maior capacidade de representação das interações físico-químicas da atmosfera.

Dessa forma, a escolha do modelo não deve considerar exclusivamente o nível de precisão desejado, mas também sua aplicabilidade prática, disponibilidade de informações e objetivos específicos da análise ambiental.

4.6. Objetivos dos Modelos de Dispersão

A modelagem de dispersão atmosférica não se limita à estimativa numérica das concentrações de poluentes, constituindo importante ferramenta estratégica para a gestão ambiental, proteção da saúde pública e avaliação de riscos ambientais.

Seu principal objetivo consiste em estimar a distribuição espacial e temporal dos contaminantes atmosféricos, permitindo identificar áreas de maior impacto, antecipar episódios críticos de poluição e subsidiar ações de monitoramento e controle ambiental. Além disso, esses modelos são utilizados em processos de licenciamento ambiental, planejamento urbano, avaliação de riscos, estudos epidemiológicos e simulação de acidentes ambientais (STULL, 2017).

A capacidade de prever cenários de exposição atmosférica torna os modelos de dispersão relevantes para a formulação de políticas públicas relacionadas à qualidade do ar e à proteção da saúde coletiva. Dessa forma, essas ferramentas funcionam como uma ponte entre a ciência atmosférica e a gestão ambiental, transformando dados técnicos em informações aplicáveis à tomada de decisão.

4.7. Análise Crítica: Vantagens e Limitações

4.7.1. Pontos Positivos

Os modelos simplificados de dispersão atmosférica apresentam importantes vantagens operacionais, especialmente em estudos ambientais preliminares e em contextos caracterizados por limitação de dados meteorológicos. Uma de suas principais características consiste na reduzida necessidade de dados de entrada, utilizando parâmetros básicos, como velocidade e direção

do vento, estabilidade atmosférica e taxa de emissão da fonte poluidora (MOREIRA; TIRABASSI, 2004).

Essa característica amplia sua aplicabilidade em regiões onde o monitoramento ambiental ainda é insuficiente, realidade frequente em municípios de pequeno e médio porte (CETESB, 2019).

Além disso, esses modelos apresentam facilidade de cálculo e operação, podendo ser implementados em planilhas eletrônicas e softwares de menor complexidade, sem elevada demanda tecnológica. A simplicidade matemática favorece tanto a realização de análises rápidas quanto a interpretação mais acessível dos resultados por gestores ambientais e profissionais envolvidos em processos de monitoramento e licenciamento ambiental (BRITTER; HANNA, 2003).

Outro aspecto relevante refere-se ao baixo custo computacional e à agilidade na obtenção de resultados. Diferentemente de modelos atmosféricos mais complexos, os modelos simplificados permitem simulações rápidas, tornando-se úteis em situações que exigem respostas imediatas, como acidentes ambientais, estudos de triagem e avaliações preliminares de impacto ambiental. Segundo a U.S. EPA (2017), ferramentas como o SCREEN3 permanecem amplamente utilizadas devido à rapidez operacional e à capacidade de fornecer estimativas iniciais de dispersão atmosférica.

4.7.2. Limitações e Desvantagens

Apesar das vantagens operacionais, os modelos simplificados apresentam limitações importantes relacionadas à precisão e à representação da dinâmica atmosférica. A simplificação das variáveis físicas reduz a capacidade do modelo de reproduzir

fenômenos complexos, especialmente em áreas com relevo irregular, intensa urbanização ou condições meteorológicas instáveis (MOREIRA; TIRABASSI, 2004).

Além disso, fenômenos como inversões térmicas, recirculação de ventos, influência de edificações e reações químicas secundárias dificilmente são representados com fidelidade pelos modelos gaussianos mais simples. Conforme destacam Seinfeld e Pandis (2016), processos atmosféricos relacionados à formação de ozônio troposférico e partículas secundárias envolvem elevada complexidade físico-química, ultrapassando as limitações operacionais desses modelos.

Outro fator relevante consiste na elevada sensibilidade às condições iniciais e aos parâmetros meteorológicos utilizados. Pequenas alterações na classificação da estabilidade atmosférica podem produzir diferenças significativas nas concentrações estimadas, exigindo rigor técnico na seleção e interpretação dos dados empregados na modelagem (ZANNETTI, 1990).

A utilização inadequada de premissas simplificadas pode resultar na subestimação das concentrações atmosféricas e, conseqüentemente, na minimização dos riscos ambientais e populacionais associados à exposição aos poluentes. Dessa forma, a interpretação dos resultados deve considerar as incertezas inerentes ao processo de modelagem, especialmente em cenários urbanos complexos e em regiões com elevada variabilidade meteorológica.

4.7.3. Situações de Aplicação Recomendada

Diante de suas características operacionais, os modelos simplificados são particularmente indicados em estudos

preliminares de dispersão atmosférica, análises de triagem ambiental, regiões com baixa disponibilidade de dados meteorológicos e situações que demandam respostas rápidas, como emergências ambientais.

Também apresentam importante aplicabilidade em atividades de ensino e capacitação técnica, devido à maior transparência de sua estrutura matemática e à facilidade de interpretação dos resultados (U.S. EPA, 2017).

4.8. Perspectiva Crítica Sobre os Modelos Simplificados

A principal limitação dos modelos simplificados reside justamente em sua principal vantagem: a simplificação da realidade atmosférica. Ao reduzir a complexidade dos processos físicos e químicos envolvidos na dispersão dos poluentes, ocorre inevitável perda de informações relevantes sobre a dinâmica real da atmosfera.

Nesse contexto, o uso desses modelos deve ser compreendido como ferramenta de apoio à análise ambiental, e não como representação exata do comportamento atmosférico.

Embora modelos mais complexos ofereçam maior precisão analítica, sua aplicação nem sempre é viável em cenários caracterizados por limitações estruturais, financeiras e de monitoramento atmosférico. Dessa forma, os modelos simplificados mantêm relevância por possibilitarem análises rápidas, acessíveis e operacionalmente úteis para processos de tomada de decisão ambiental (CETESB, 2019).

Entretanto, sua utilização exige rigor técnico, transparência metodológica e interpretação crítica dos resultados. O uso inadequado dessas ferramentas pode comprometer avaliações de

impacto ambiental, subestimar cenários de exposição atmosférica e gerar implicações diretas sobre a saúde pública.

Assim, mais do que instrumentos matemáticos, os modelos de dispersão devem ser compreendidos como ferramentas estratégicas de suporte à gestão ambiental e à proteção da saúde coletiva. Sua efetividade depende não apenas de sua estrutura matemática, mas também da capacidade crítica dos profissionais em interpretar suas limitações, incertezas e aplicabilidades no contexto da avaliação de riscos ambientais e da gestão da qualidade do ar.

5. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem simplificada de dispersão de poluentes atmosféricos configura-se como importante ferramenta técnico-científica para a compreensão dos processos de transporte, diluição e distribuição de contaminantes na atmosfera, especialmente em contextos caracterizados por limitações estruturais, baixa disponibilidade de dados meteorológicos e restrições operacionais. Ao possibilitar estimativas rápidas das concentrações atmosféricas e da extensão espacial dos impactos ambientais, esses modelos desempenham papel relevante em estudos preliminares, processos de licenciamento ambiental, avaliações de risco e estratégias de monitoramento da qualidade do ar.

Entretanto, os resultados desta reflexão evidenciam que a utilização dessas ferramentas deve ocorrer de maneira crítica e contextualizada, considerando as limitações inerentes às simplificações adotadas pelos modelos. Premissas como regime estacionário, homogeneidade atmosférica, terreno plano e ausência de transformações químicas reduzem a complexidade matemática

da modelagem, porém também podem comprometer a precisão das estimativas em cenários atmosféricos complexos, sobretudo em áreas urbanas densamente ocupadas, regiões de relevo acidentado e ambientes sujeitos à elevada variabilidade meteorológica.

Sob a perspectiva da análise de riscos ambientais e da saúde pública, a modelagem atmosférica assume papel estratégico ao subsidiar a identificação de áreas potencialmente expostas à poluição do ar e contribuir para a estimativa da exposição populacional aos contaminantes atmosféricos. Nesse contexto, o uso inadequado ou acrítico dos resultados obtidos pode favorecer a subestimação de impactos ambientais e sanitários, comprometendo processos de tomada de decisão relacionados ao controle de emissões, planejamento territorial e proteção da saúde coletiva.

Além disso, observou-se que a escolha entre modelos simplificados e modelos complexos envolve importante equilíbrio entre precisão analítica, disponibilidade de dados, custo computacional e aplicabilidade operacional. Embora modelos atmosféricos mais sofisticados apresentem maior capacidade de representação das interações físico-químicas da atmosfera, sua utilização nem sempre é viável em contextos institucionais marcados por limitações técnicas e financeiras. Dessa forma, os modelos simplificados permanecem relevantes, desde que utilizados dentro de suas possibilidades metodológicas e acompanhados de interpretação técnica adequada.

Destaca-se, ainda, a necessidade de fortalecimento das políticas de monitoramento ambiental, ampliação das redes de medição da qualidade do ar e incentivo à integração entre áreas como engenharia ambiental, meteorologia, saúde pública e gestão

territorial. A atuação interdisciplinar mostra-se fundamental para o aprimoramento das avaliações ambientais e para o desenvolvimento de estratégias mais efetivas de prevenção e mitigação dos impactos da poluição atmosférica.

Por fim, ressalta-se a importância da realização de novos estudos voltados à análise comparativa entre modelos simplificados e modelos complexos de dispersão atmosférica, bem como pesquisas que investiguem a aplicabilidade dessas ferramentas em diferentes cenários urbanos, industriais e ambientais. O avanço dessas investigações poderá contribuir para o desenvolvimento de abordagens mais integradas, precisas e compatíveis com os desafios contemporâneos relacionados à gestão da qualidade do ar, à proteção ambiental e à promoção da saúde coletiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Maria de Fátima; FORNARO, Arnaldo; FREITAS, Edmilson Dias de; YNOUE, Ricardo Yukio. *Air quality in Brazil: recent advances and future challenges*. Atmospheric Environment, Oxford, v. 265, p. 118734, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118734>.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar*. Brasília, DF: MMA, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/qualidade-do-ar/publicacoes>. Acesso em: 28 maio 2026.

BRITTER, Rex E.; HANNA, Steven R. *Flow and dispersion in urban areas*. Annual Review of Fluid Mechanics, Palo Alto, v. 35, p. 469–496, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161147>.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Modelos de dispersão atmosférica: conceitos e aplicações.* São Paulo: CETESB, 2019. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes/>. Acesso em: 10 mar. 2025.

FERREIRA, Luís Manuel; CARVALHO, João Carlos. *Computational Fluid Dynamics in Urban Pollution Studies.* Atmospheric Environment, Oxford, v. 220, p. 116782, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116782>.

HANSEN, Ricardo; OLIVEIRA, Diego. *Introdução à Mecânica dos Fluidos Atmosféricos.* São Paulo: Editora Acadêmica, 2019.

HOLMES, Nicholas S.; MORAWSKA, Lidia. *A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: an overview of different approaches.* Atmospheric Environment, Oxford, v. 40, n. 30, p. 5902–5928, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.003>.

HOLMES, Neil; MORRIS, Andrew. *Atmospheric Dispersion Modeling for Regulatory Applications.* London: Springer, 2017.

LACAIVA, Carlos Ivan Vaz; SOUZA, Maria Aparecida; GOMES, Ricardo Moreira. *Qualidade do ar e emissões atmosféricas.* Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2003. Disponível em: <https://ambiental.ufpr.br/portal/publicacoes/>. Acesso em: 28 maio 2026.

MARTINS, Elton Marques. *Modelagem de dispersão de poluentes atmosféricos.* Revista Internacional de Ciências, Rio de Janeiro, v. 5, n. 2, p. 45–58, 2015. Disponível em: <https://www.e->

publicacoes.uerj.br/index.php/ric/article/view/2345. Acesso em: 28 maio 2026.

MOREIRA, Demóstenes Marques; TIRABASSI, Tiziano. *Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera: um instrumento técnico para a gestão ambiental.* Ambiente & Sociedade, Campinas, v. 7, n. 1, p. 159–171, jan./jun. 2004.

MOREIRA, Demóstenes Marques; TIRABASSI, Tiziano; COSTA, Antônio Marcos; SOUZA, José Roberto. *Dispersion of air pollutants: a review of Brazilian contributions.* Revista Brasileira de Meteorologia, São José dos Campos, v. 35, n. esp., p. 673–698, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-7786354008>.

PETERSON, Ralph; SCHREIBER, Lee. *Wind Tunnel Modeling of Atmospheric Dispersion.* New York: Wiley, 2015.

SANTOS, Bruna Ferreira; TADANO, Yara Sayuri. *Revisão da literatura sobre dispersão de poluentes no Brasil.* Trabalho apresentado no SEI-SICITE, Ponta Grossa, 2023. Disponível em: <https://seisicite.com.br/anais/2023/>. Acesso em: 28 maio 2026.

SEINFELD, John H.; PANDIS, Spyros N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change.* 3. ed. Hoboken: Wiley, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118947401>.

SILVA, Carlos Manuel; OLIVEIRA, Luís Filipe; COSTA, Pedro Rui; MENDES, Ana Sofia. *Air pollution dispersion modeling in urban environments: recent applications and challenges.* Environmental Science and Pollution Research, Berlin, v. 28, p. 24884–24908, 2021.

STULL, Roland B. *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science*. Vancouver: UBC Press, 2017.

TURNER, David Bruce. *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 1994.

U.S. EPA – United States Environmental Protection Agency. *AERSCREEN user's guide*. Research Triangle Park: U.S. EPA, 2017. (EPA-454/B-17-003). Disponível em: <https://www.epa.gov/scram/models-and-guidance>. Acesso em: 15 mar. 2025.

ZANNETTI, Paolo. *Air Pollution Modeling: Theories, Computational Methods and Available Software*. Boston: Springer, 1990.

¹ Mestranda; Discente do Programa de Pós-graduação Mestrado Profissional Saúde e Meio Ambiente; Centro Universitário Três Corações, MG, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-8180-4572>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Mestranda; Discente do Programa de Pós-graduação Mestrado Profissional Saúde e Meio Ambiente; Centro Universitário UninCor; Três Corações, MG, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-2596-0944>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

³ Mestranda; Discente do Programa de Pós-graduação Mestrado Profissional Saúde e Meio Ambiente; Centro Universitário UninCor; Três Corações, MG, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-3713-2560>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁴ Mestrando; Discente do Programa de Pós-graduação Mestrado Profissional Saúde e Meio Ambiente; Centro Universitário UninCor; Três Corações, MG, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-1361-0451>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁵ Mestrando; Discente do Programa de Pós-graduação Mestrado Profissional Saúde e Meio Ambiente; Centro Universitário UninCor; Três Corações, MG, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-7990-6218>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁶ Doutor em Tecnologia e Produção Vegetal; Docente do Programa de Pós-graduação Mestrado Profissional Saúde e Meio Ambiente; Centro Universitário UninCor; Três Corações, MG, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2902-1038>; E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)