

# POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA ASSOCIADA AO MATERIAL PARTICULADO NO ESTADO DE SÃO PAULO: ANÁLISE BASEADA EM DADOS DE SATÉLITE

ATMOSPHERIC POLLUTION ASSOCIATED WITH PARTICULATE MATTER  
IN THE STATE OF SÃO PAULO: AN ANALYSIS FROM SATELLITE DATA

**Julia Manfredini de Araujo** 

Discente no Programa de Pós-Graduação em Análise Ambiental Integrada na Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP) – Diadema (SP), Brasil.

**Nilton Manuel Évora do Rosário** 

Docente no Programa de Pós-Graduação em Análise Ambiental Integrada na UNIFESP – Diadema (SP), Brasil.

**Endereço para correspondência:**

Julia Manfredini de Araujo – Rua São Nicolau, 210 – Centro – CEP 09913-030 – Diadema (SP), Brasil – E-mail: julia.manfredini11@gmail.com

**Recebido em:** 07/10/2019

**Aceito em:** 27/02/2020

## RESUMO

A poluição atmosférica gerada pelas atividades antrópicas afeta tanto o equilíbrio climático quanto a qualidade do ar. O Material Particulado (MP) é reconhecidamente o poluente atmosférico com maior impacto na saúde humana. No estado de São Paulo, as principais fontes de MP são as emissões veiculares, nas áreas urbanas, e a queima de biomassa, nas áreas rurais. Com o objetivo de mitigar a poluição nas áreas rurais, em 2007 foi assinado o protocolo agroambiental entre o estado de São Paulo e o setor sucroalcooleiro, o qual trata da redução e da eliminação gradual do uso da queima como prática de colheita de cana até 2017. A análise da tendência nos níveis dos poluentes atmosféricos no estado é fundamental para a avaliação dos resultados do protocolo. Entretanto, apesar de apresentar a maior rede de monitoramento de qualidade do ar no Brasil, São Paulo não tem monitoramento da poluição atmosférica na maioria dos seus municípios. Nesse contexto, visando avaliar o impacto do protocolo agroambiental, o presente estudo analisou a distribuição espacial e temporal da profundidade óptica do aerossol (AOD) no estado entre os anos de 2007 (quando o protocolo foi assinado) e 2017. AOD é um indicador óptico da abundância do MP na atmosfera, derivado das medidas de radiância espectral do sensor MODIS a bordo do satélite Terra. Os resultados revelaram que, quando a influência do transporte de fumaça das regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil é removida, os dados de satélite identificam adequadamente as regiões mais poluídas no estado: as áreas metropolitanas de São Paulo, de Campinas e da Baixada Santista e as porções central e norte, que são dominadas pelas plantações de cana-de-açúcar. Em relação à tendência de poluição, nas áreas a oeste e noroeste do estado, onde ocorreu expansão do cultivo de cana nos últimos anos, apesar das limitações impostas para queima pelo protocolo agroambiental, observou-se tendência significativa de aumento da poluição. Já nas áreas de tradicional cultivo de cana, nas porções centro e norte do estado, embora se tenha percebido tendência de redução da poluição associada ao MP, ela não foi significativa.

**Palavras-chave:** qualidade do ar; queimadas; indústria sucroalcooleira; protocolo agroambiental; bacias hidrográficas.

## ABSTRACT

Air pollution generated by anthropic activities affects both climate and air quality. Particulate matter (PM) is recognized as one of the air pollutants with the greatest impact on human health. In the state of São Paulo, the main anthropogenic sources of PM that affect air quality are vehicular emissions, in urban region, and biomass burning, in rural areas. In order to mitigate pollution in rural areas, in 2007 the Agro-Environmental Protocol was signed between the State of São Paulo and the sugar and alcohol sector, which deals with the reduction and gradual elimination of the use of burning as a sugarcane harvesting practice until 2017. The analysis of the trend in the levels

of pollutants in the state is fundamental for the evaluation of the results of the protocol. However, despite having the largest air quality monitoring network in Brazil, São Paulo still has most of its municipalities without any monitoring. In this context, aiming to evaluate the impact of the Agro-Environmental Protocol, the present study analyzed the spatial and temporal distribution of the aerosol optical depth (AOD) in the state, an optical indicator of the abundance of MP in the atmosphere, derived from the spectral radiance measurements of the MODIS sensor on board the Terra satellite between the years 2007, when the protocol was signed, and 2017. The results revealed that when the influence of smoke transport from the North and Center-West regions of Brazil is removed, the satellite data adequately identifies the most polluted regions in the state, that are, the metropolitan areas of São Paulo, Campinas and Baixada Santista and the central and northern portions of the state, dominated by sugarcane plantations. In relation to the pollution trend, in the west and northwest areas of the state, where there has been an expansion of sugarcane cultivation in recent years, despite the limitations imposed for burning by the Agro-Environmental Protocol, there was a significant tendency for an increase in pollution. In the areas of traditional sugarcane cultivation, in the central and northern portions of the state, although there was a tendency to reduce pollution associated with PM, this was not significant.

**Keywords:** air quality; biomass burning; sugarcane industry; agro-environmental protocol; hydrographic basin.

## INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica contribui para a degradação da qualidade do ar, gerando significativos impactos à saúde pública (WHO, 2016). Segundo a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD, 2012), os poluentes atmosféricos devem tornar-se a principal causa ambiental de mortalidade no mundo em 2050. No estado de São Paulo, o número de mortes associadas à poluição do ar em 2015 foi 11.200 (ISS, 2015), o que representa 31 vidas por dia e ultrapassa o número de mortes por acidente de carro, câncer de mama e AIDS no estado, nesse período. Entre as principais fontes de poluição atmosférica no estado, destaca-se a emissão veicular, sobretudo nos principais centros urbanos. No contexto das emissões veiculares, importantes avanços foram obtidos por meio de políticas públicas de controle de emissões, como o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), que tem contribuído para a diminuição das concentrações de poluentes atmosféricos nas áreas urbanas (ABE; MIRAGLIA, 2018; ESCUCIATTO; DZIEDZIC; VASCONCELOS, 2016). Entretanto, as áreas rurais de São Paulo podem sofrer eventos sazonais de poluição atmosférica caracterizados por níveis de poluição tão críticos quanto os observados em áreas urbanas altamente poluídas. Tais eventos ocorrem, no geral, associados à queima de biomassa, que é adotada como prática tradicional na colheita de cana-de-açúcar

(MATAVELI *et al.*, 2014). Entre os principais poluentes emitidos pelas queimadas destaca-se o material particulado (MP), que tem sido amplamente associado a impactos na saúde. Diversos são os estudos que mostram relação entre elevação nos níveis de concentração de MP e a incidência de complicações respiratórias, doenças cardiovasculares e mortalidade (SALDIVA *et al.*, 1995; IGNOTTI *et al.*, 2007; POPE; EZZATI; DOCKERY, 2009; CARMO *et al.*, 2010; ABDOLAHNEJAD *et al.*, 2017; KHANIABADI *et al.*, 2017; BURNETT *et al.*, 2018; XIE *et al.*, 2018). A influência do MP nas internações por doenças respiratórias e cardiovasculares tem sido também registrada nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar do estado de São Paulo, sendo associada à queima da palha de cana (CANÇADO *et al.*, 2006; RIBEIRO, 2008; GONÇALVES; CASTRO; HACON, 2012).

Em 2007 foi assinado o protocolo agroambiental entre o setor sucroalcooleiro paulista e a Secretaria de Estado do Meio Ambiente, que determinou a antecipação dos prazos legais para o fim da colheita da cana por meio do uso de fogo para todas as unidades industriais signatárias, para 2014 nas áreas mecanizáveis, e para 2017 nas áreas não mecanizáveis (SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE, 2014). Entre outros objetivos, o protocolo visou à redução no nível dos poluentes do ar no estado de São Paulo, incluindo o MP, particular-

mente nas áreas afetadas por queimadas. O setor sucroalcooleiro, ao assinar o Protocolo, buscou também fortalecer a imagem do etanol como combustível limpo e sustentável, o que é estrategicamente favorável para o setor (DUARTE *et al.*, 2013).

Uma efetiva e ampla avaliação dos resultados do protocolo depende da aferição das tendências nos níveis dos poluentes observados no estado. Entretanto, no Brasil, a cobertura espacial do monitoramento *in situ* da poluição atmosférica, que é baseado em redes de estações em superfície, é significativamente reduzida. Menos de 5% dos municípios apresentam monitoramento, dos quais 78% se situam na Região Sudeste do país (ISS, 2014). O estado de São Paulo, embora detentor da maior e mais regular rede de monitoramento *in situ* do país, operada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), não tem monitoramento da poluição atmosférica na maioria dos seus municípios.

Nesse contexto, alternativas de monitoramento com maior cobertura espacial tornam-se necessárias. O monitoramento da poluição atmosférica por meio de sensores a bordo de satélites, em função de sua ampla cobertura espacial, tem-se apresentado como uma ferramenta com potencial para complementar as informações das redes de superfície (KAUFMAN; TANRÉ; BOUCHER, 2002; LAHOZ *et al.*, 2012; DUNCAN *et al.*, 2014).

No caso do MP, a profundidade óptica do aerossol (AOD, do termo em inglês *aerosol optical depth*) é o principal produto derivado de medidas de satélites capaz de fornecer uma estimativa da abundância desse poluente na atmosfera. No contexto dos satélites, a AOD é uma

medida da quantidade de MP que deriva da energia solar refletida por essas partículas presentes na coluna atmosférica de volta para o espaço. Kaufman, Tanré e Boucher (2002) mostraram que é possível discriminar a poluição em áreas urbanas, industriais e em regiões de queimadas por meio da AOD. Entretanto, dadas as particularidades da meteorologia e da natureza das fontes poluidoras regionais, Martin (2008) e Hoff e Christopher (2009) destacam a necessidade de estudos específicos para a região de interesse para adequada caracterização da relação entre AOD e poluição atmosférica próximo da superfície. Com o aumento da resolução espacial dos sensores que monitoram a AOD para escalas condizentes com dimensões urbanas (< 10 km), aumentou-se o potencial de aplicação dessa medida, estimada por meio de satélites, para avaliar a qualidade do ar próximo da superfície (DONKELAAR *et al.*, 2015; YOU *et al.*, 2016; KIM *et al.*, 2019; SONG *et al.*, 2019). Embora a AOD seja um indicador do total de MP presente na coluna atmosférica, em virtude das principais fontes emissoras de poluentes estarem na superfície, a sua variabilidade é sensível à variação da concentração de MP na superfície (KAUFMAN; TANRÉ; BOUCHER, 2002; D'ALESSIO, 2016; SEGURA *et al.*, 2017; ZHENG *et al.*, 2017). Nesse sentido, o objetivo do presente estudo consiste na análise da variabilidade espacial e temporal da poluição atmosférica associada ao MP no Estado de São Paulo, com base na AOD estimada por meio de medidas de radiação solar espectral feitas a bordo de satélite, visando avaliar o impacto do protocolo agroambiental assinado entre o setor o sucroalcooleiro paulista e a Secretaria de Estado do Meio Ambiente.

## MÉTODOS

O período escolhido para analisar a variabilidade temporal da poluição atmosférica no estado de São Paulo foi o entre os anos de 2007 e 2017. Esses dois anos foram escolhidos por representarem duas referências temporais importantes no contexto do protocolo agroambiental. Em 2007, o protocolo foi assinado, determinando a antecipação dos prazos legais para o fim da colheita da cana por meio do uso de fogo para todas as unidades industriais signatárias, para 2014 nas áreas mecanizáveis, e para 2017 nas áreas não mecanizáveis (SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE, 2014).

Em relação à AOD, a escolha foi feita por essa medida ser o principal indicador de poluição atmosférica associada ao MP quando se trata do monitoramento por sensores a bordo de satélites. Por essa razão, essa mensuração é amplamente utilizada nos estudos com foco no comportamento da poluição regional e global (KAUFMAN; TANRÉ; BOUCHER, 2002; LEVY *et al.*, 2013). Entre os primeiros e principais sensores dedicados ao monitoramento da AOD destaca-se o *MODerate resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo dos satélites polares Terra e Aqua (KING *et al.*, 1992, JUSTICE *et al.*, 1998). Durante o dia, o Terra passa sobre o estado de São Paulo entre o meio

e o fim da manhã (entre 10h30 e 12h, horário local), enquanto o Aqua usualmente passa entre o início e o meio da tarde (entre 13 e 15h30). Os dados de AOD do MODIS selecionados para aplicação no presente trabalho, para o período de 2007 a 2017, correspondem ao produto para o comprimento de onda de 550 nm (AOD550 nm), o qual é baseado no algoritmo *Dark Target* da *Collection 6.0* (LEVY *et al.*, 2013; REMER *et al.*, 2013) com resolução de 3 km, e são processados e arquivados pelo MODIS *Adaptive Processing System* e disponibilizados *online* (NASA, 2017). O produto *Dark Target* tem essa denominação por efetuar estimativa da AOD apenas em cenários de superfícies com albedo relativamente baixo, excluindo, portanto, cenários denominados de superfícies brilhantes, como nuvens, áreas desérticas, neve, gelo, entre outras (REMER *et al.*, 2013).

A escolha do satélite Terra como referência para o presente estudo deve-se a duas razões. Primeiramente, ao fato das queimadas geralmente ocorrerem no período noturno, entre 20 e 6h, conforme exigido pela legislação ambiental do estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2002). Sendo assim, no horário de passagem do satélite Terra, espera-se maior concentração do MP no ambiente, uma vez que na parte da manhã o processo de dispersão não é tão eficiente quanto no período da tarde. Por outro lado, as concentrações de MP medidas pela CETESB, tanto nas áreas metropolitanas como nas estações instaladas em áreas próximas dos canais, são maiores durante as passagens do satélite Terra quando comparadas com as medições feitas no horário de passagem do Aqua.

Para análise da distribuição espacial e temporal da AOD no estado de São Paulo, os mapas originais de AOD (com resolução variante entre  $3 \times 3$  km para o pixels próximos ao Nadir e  $5 \times 5$  km nos extremos da área de varredura) correspondente aos horários da passagem dos satélites, denominados de grânulos, foram convertidos para novos mapas em uma grade de referência regular com resolução homogênea de  $5 \times 5$  km, para isso foi utilizada a técnica de interpolação do vizinho mais próximo (DRUCK *et al.*, 2004). Além disso, sendo o objetivo do estudo a análise de padrões espaciais e a variabilidade interanual da poluição no estado, para identificar as tendências e as possíveis relações com o comportamento das fontes poluidoras a médio e a longo prazo, as análises dos dados de AOD foram feitas

as com base em métricas estatísticas anuais, nomeadamente a média e a mediana anual dos campos de AOD dentro dos limites geográficos do estado de São Paulo. A mediana foi adotada visando reduzir a contribuição dos eventos extremos de AOD, normalmente associados a transporte de fumaça de áreas remotas ao estado, para ressaltar o perfil geográfico e temporal da poluição causada pelas emissões do próprio estado.

Para atender ao objetivo do estudo, foi crucial a exclusão da interferência das plumas de poluição transportadas das áreas de queimadas da Região Centro-Oeste do Brasil e do sul da Amazônia sobre o campo da AOD no estado de São Paulo (FREITAS *et al.*, 2005). Para isso, foi feito levantamento visual, dia a dia, durante a estação de queimadas (agosto a novembro), dos eventos de transporte de fumaça sobre o estado entre os anos de 2007 e 2017, com base em mapas de AOD derivados do MODIS de toda a América do Sul. No levantamento, todos os dias em que a pluma de fumaça cruzou a fronteira do estado de São Paulo, considerou-se que houve transporte de queimadas dentro dos domínios do estado.

Além da média e da mediana anual da AOD no estado para todos os cenários, com e sem transporte, também foram calculados campos de média anual da AOD excluindo os grânulos das passagens correspondentes aos dias com transporte de plumas de poluição provinidas do Centro-Oeste e do sul da Amazônia.

Também foram utilizados no estudo dados de totais anuais, georreferenciados, de focos de queimadas ocorridos no estado de São Paulo entre os anos de 2007 e 2017, os quais foram obtidos do Programa Queimadas, em que há monitoramento por satélite, do Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE, 2018). Os dados de focos são derivados também das medidas do sensor MODIS, porém utilizando o sensor a bordo do Aqua, que é considerado o satélite de referência para o programa. Os produtos de focos de queimada do INPE fornecem a incidência de queimadas para todo o estado, tanto daquelas ocorridas no contexto de áreas de colheita de cana-de-açúcar como das queimadas de outra natureza.

Visando avaliar a relação entre a expansão das áreas canavieiras no estado de São Paulo e a poluição atmosférica expressa pela AOD, foram analisados os mapas históricos (2007–2013) do projeto CANASAT (INPE, 2019), que fornecem as áreas de cultivo da cana-de-açúcar.

Como referência para as análises regionais dentro dos domínios do estado, tanto da AOD como do número de focos de queimadas, optou-se pelo uso das delimitações das unidades de gerenciamento de recursos hídricos (UGRHI), divisão estabelecida de acordo com a Lei Estadual nº 16.337, de 14 de dezembro de 2016 (SÃO PAULO, 2016). Entre as vantagens do uso das UGRHI como unidades de referência, vale destacar a organização por vocação. São Paulo apresenta 22 UGRHI com vocações distribuídas entre industrial, em industrialização, conservação e agropecuária. Assumiu-se essa classificação como referência para a discussão da quantidade de poluição atmosférica nos domínios regionais do estado (Figura 1).

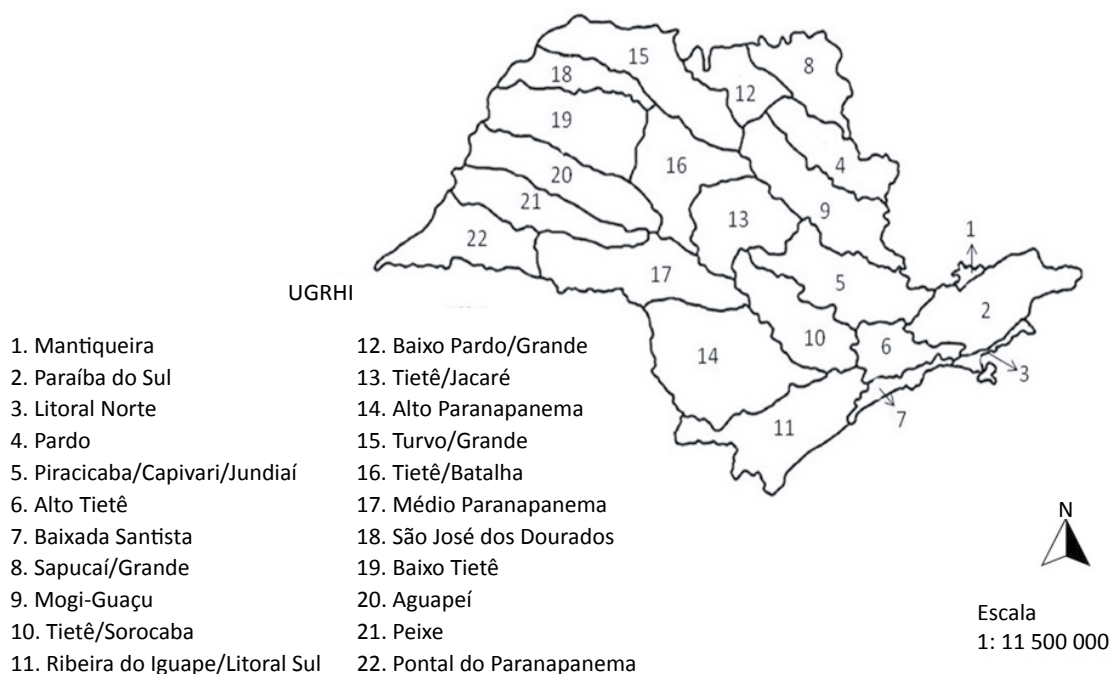
Para as análises de significância estatística das tendências temporais da AOD dentro das UGRHI,

foi adotado o Teste de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975). O propósito do teste é avaliar se existem ou não tendências crescentes ou decrescentes monotônicas em uma série temporal de determinada variável. O método baseia-se em rejeitar ou não a hipótese nula ( $H_0$ ), na qual não existe tendência na série de dados, diante da hipótese alternativa de que existe tendência ( $H_1$ ) adotando-se determinado nível de significância ( $\alpha$ ), o qual é interpretado como a probabilidade de cometer-se erro ao rejeitar a  $H_0$  quando esta for verdadeira (SALVIANO; GROppo; PELLEGRINO, 2016). No presente estudo, as análises da tendência interanual da AOD em todas as UGRHI foram realizadas considerando-se os níveis de significância de 5 e 10%.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira análise realizada foi a da variabilidade temporal da AOD para o estado de São Paulo na perspectiva interanual, isto é, ano a ano, entre 2007, o ano da assinatura do protocolo agroambiental, e 2017, o ano em que se projetou eliminar a prática de quei-

mada na colheita da cana. Essa análise preliminar teve como propósito avaliar a evolução na última década do quadro de poluição na coluna atmosférica do estado associado ao MP, considerando todas as fontes poluidoras, até mesmo as remotas. A Figura 2 apresenta a



Fonte: São Paulo (2016).

**Figura 1 – Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) do estado de São Paulo.**

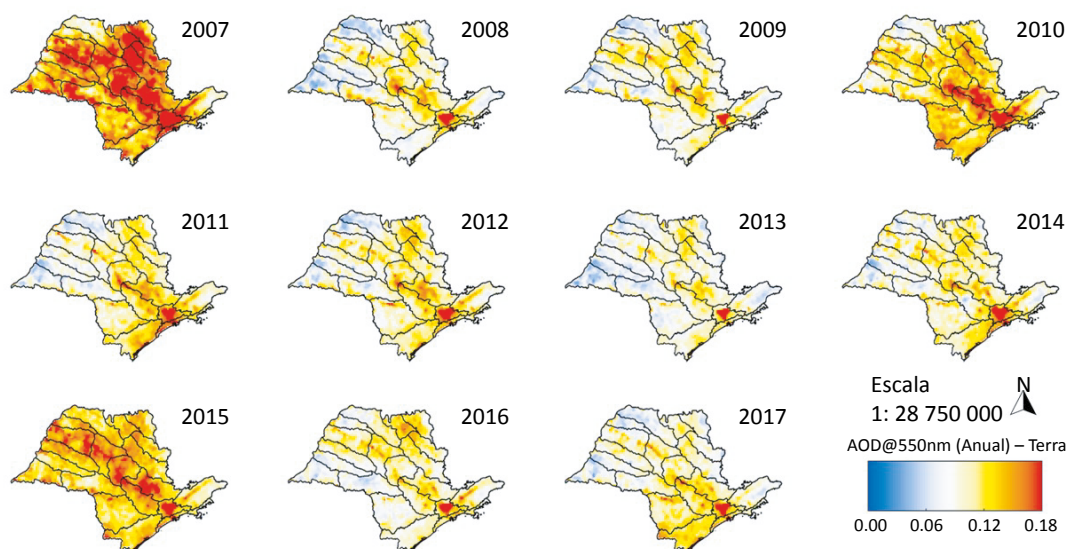


variabilidade interanual da média anual da AOD para o período de estudo em todo o estado de São Paulo. Visando auxiliar na avaliação regional dos níveis de poluição dentro do estado, foram considerados os limites geográficos das UGRHI.

As médias anuais destacam que os anos de 2007, 2010, 2014 e 2015 foram os que apresentaram maiores níveis de concentração de MP na coluna atmosférica do estado. De acordo com os resultados obtidos, os valores de AOD foram superiores a 0,15 na maior parte do estado no ano de 2007, sendo o ano mais poluído entre os estudados na presente análise quando considerada a métrica AOD. Por outro lado, o ano em que se observaram os menores níveis de poluição foi o de 2013. Ao analisarmos a frequência de eventos de transporte de fumaça das regiões Centro-oeste e Norte do Brasil em direção ao estado de São Paulo durante o período de estudo fica evidente a sua relação com os índices de AOD no estado. Os anos mais poluídos, 2007, 2010, 2014 e 2015, foram os que apresentaram as maiores frequências de eventos de transporte de fumaça proveniente do Centro-Oeste e do Norte sobre o estado (Figura 3), sendo, respectivamente, 56, 41, 51 e 59 dias. Esse resultado está em

sintonia com trabalhos anteriores (LANDULFO *et al.*, 2003; FREITAS *et al.*, 2005; ROSÁRIO *et al.*, 2013) que já mostraram que altos valores de AOD cobrindo vastas extensões do estado estão associados a eventos de transporte do MP produzido pelas queimadas no Centro-Oeste do Brasil e no sul da Amazônia.

Ainda analisando os mapas interanuais da Figura 2, a UGRHI do Alto Tietê destaca-se das demais pela constante presença de altos níveis de MP na atmosfera no decorrer de todo o período. Isso deve-se à presença da maior fonte regional de poluição atmosférica do estado, isto é, a região metropolitana de São Paulo (RMSP), em virtude da frota de mais de sete milhões de veículos circulando diariamente e de importantes polos industriais (CETESB, 2018). Entretanto percebe-se que nos anos com forte influência dos eventos de transporte, sobretudo em 2007, 2010, 2014 e 2015, perde-se a noção dos limites espaciais da pluma de poluição associada às emissões da RMSP. Isto é, a contabilização da influência dos eventos de transporte de fumaça no cálculo da AOD média anual impede a caracterização adequada da distribuição geográfica de poluição atmosférica associada exclusivamente às fontes locais. Por exemplo, além da plu-



**Figura 2 – Mapas das médias anuais da profundidade óptica dos aerossóis (AOD) no comprimento de onda de 550 nm (AOD@550nm), entre os anos de 2007 e 2017, calculadas por meio de medições do sensor MODIS a bordo do satélite Terra no estado de São Paulo. A barra de cores representa a variação da abundância de aerossóis na atmosfera, cores frias (azul) e quentes (vermelho) indicam, respectivamente, baixos e altos níveis de material particulado na atmosfera.**

ma de poluição da RMSP, a pluma associada às UGRHI produtoras de cana-de-açúcar no interior, onde se pratica (ou praticava) a queima de biomassa, como é o caso de Mogi-Guaçu (9), Capivari/Jundiá/Piracicaba (5), Pardo (4) e Tietê/Jacaré (13), também fica descharacterizada, como podemos observar quando comparamos anos com alta (por exemplo, 2007, 2010) e

baixa (por exemplo, 2009, 2011) frequência de eventos de transporte.

O resultado da primeira estratégia para evidenciar a heterogeneidade espacial que caracteriza a poluição atmosférica no estado de São Paulo associada às fontes locais se encontra na Figura 4. Apresentam-se os mapas das mé-

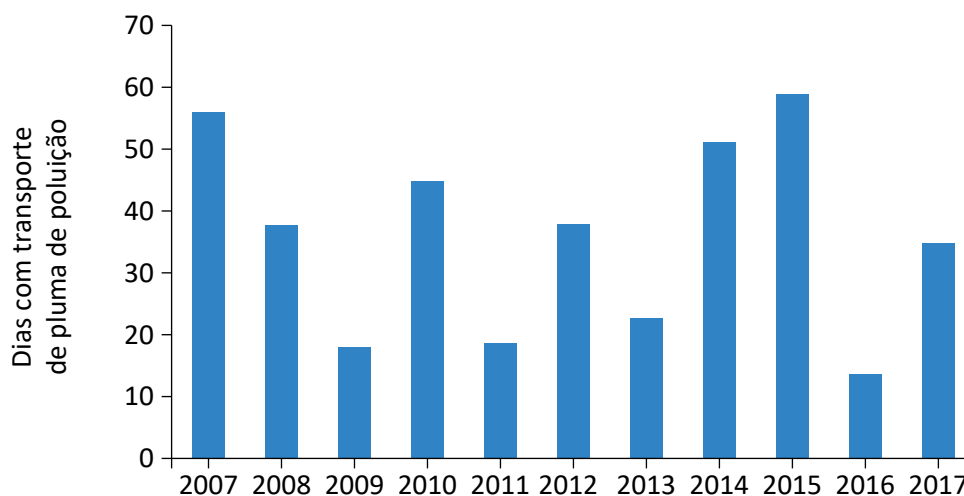


Figura 3 – Número de dias em que houve transporte de pluma de poluição proveniente das queimadas da Região Centro-oeste e do sul da Amazônia (entre agosto e novembro) em direção ao estado de São Paulo.

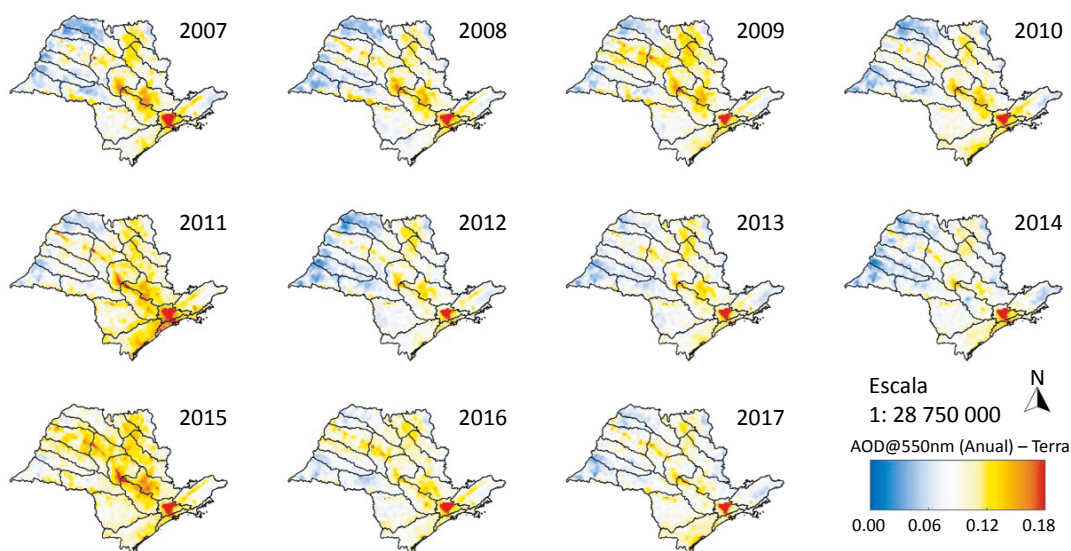


Figura 4 – Mapas de média anual da AOD550nm obtidos por meio de medições do sensor MODIS a bordo do satélite Terra no estado de São Paulo, excluindo os dias em que houve transporte de fumaça da Região Centro-Oeste e do sul da Amazônia, durante a estação de queimada (entre agosto e novembro). A barra de cores representa a variação da abundância de aerossóis na atmosfera, cores frias (azul) e quentes (vermelho) indicam, respectivamente, baixos e altos níveis de material particulado na atmosfera.

dias anuais de AOD calculadas excluindo-se os dados da passagem do satélite Terra nos dias em que houve eventos de transporte de MP provenientes das áreas de queimadas dos estados do Centro-Oeste e da bacia Amazônica. O cenário obtido difere significativamente daquele em que se considera as médias anuais com influência dos dias nos quais houve transporte da fumaça. É possível observar nos novos mapas de AOD (Figura 4) resultado mais consistente com a reconhecida distribuição das fontes emissoras de poluição na superfície do estado (principais áreas metropolitanas e áreas de plantação de cana onde se pratica queimada). Nota-se o estado de São Paulo menos poluído quando se compara essa análise às anteriores (com influência do transporte de fumaça), ficando clara a definição da pluma de poluição da RMSP para todos os anos. O ano de 2007, por exemplo, antes da exclusão dos dias de transporte de fumaça, destacou-se como um dos anos com maiores valores médios de AOD, ou seja, um dos anos mais poluídos entre os anos analisados (Figura 2). Já na nova análise (Figura 4), em que se excluíram os dias de transporte, o ano perdeu essa característica, deixando de ser um dos anos com maiores níveis de AOD no período. Esse resultado sugere que a maior parte da poluição presente na atmosfera do estado em 2007 não estava localizada nas proximidades da superfície, mas sim em níveis mais altos da atmosfera, provavelmente entre 3 e 10 km de altitude, onde o transporte de partículas da fumaça das queimadas da região da Amazônia costuma ocorrer, de acordo com Freitas *et al.* (2005). Os anos de maior destaque em relação ao nível de poluição no estado (maior AOD) passam a ser 2011 e 2015. Vale recordar que 2015 faz parte do período caracterizado pela crise hídrica no estado, quando houve déficit generalizado de chuva (MARENGO *et al.*, 2015) na Região Sudeste, o que, além de favorecer condições para mais incidência de eventos de queimadas, pode ter favorecido o acúmulo de poluentes na atmosfera, uma vez que a precipitação é um importante mecanismo no processo de remoção física dos poluentes da atmosfera. Wang *et al.* (2017) discutem o efeito adverso dos eventos de seca na qualidade do ar e mostram, apoiados em uma revisão histórica, que os eventos extremos de seca ocorridos nos Estados Unidos nos 24 anos analisados estiveram associados à degradação da qualidade do ar, especialmente ao aumento do MP e do ozônio.

Com os novos mapas de médias anuais de AOD, identificados na Figura 4, reforçam-se as diferenças entre as áreas mais poluídas, a leste do estado, e as menos poluí-

das, na porção mais a oeste, e a RMSP, a área mais poluída do estado. Destacam-se também as áreas de plantação de cana-de-açúcar, onde a prática da queima ainda é recorrente (UGRHI 4, 5, 9 e 13). Entretanto vale ressaltar os valores relativamente altos de AOD na UGRHI do Vale do Ribeira e Litoral Sul, os quais ultrapassam 0,1 em metade dos anos analisados, pois se trata de uma UGRHI dentro do segmento de área de preservação natural e não é conhecida a existência de fontes poluidoras relevantes.

Como alternativa à média anual com a exclusão dos dados das passagens do satélite Terra nos dias em que houve transporte, foram calculados os mapas anuais da mediana da AOD para o estado, incluindo todos os dados (com e sem transporte externo de fumaça). Essa alternativa é interessante, uma vez que a mediana, diferentemente da média, não carrega influência expressiva dos valores extremos de AOD associados aos dias com ocorrência de transporte de fumaça do Centro-Oeste e do sul da Amazônia. A Figura 5 mostra os resultados da variabilidade interanual da mediana da AOD para o estado de São Paulo no decorrer do período de 2007 a 2017.

Os resultados são parecidos com os dos mapas baseados na média anual quando são excluídos os eventos de transporte de fumaça. Portanto, do ponto de vista da AOD, tanto a média anual, em que se excluem os casos de transporte, como a mediana se mostraram indicadores com maior potencial para a avaliação a longo prazo das tendências dos níveis de poluição atmosférica associada às emissões locais quando comparadas com a média anual em que se incluem todos os dados. Se considerarmos a praticidade das duas métricas, mediana e média em que se excluem eventos de transporte de fumaça de áreas remotas, como melhor opção pode ser considerada a mediana, uma vez que não requer prévia seleção dia a dia dos casos com transporte para posterior exclusão desses dias.

Nesse contexto, os resultados baseados nas medianas anuais da AOD foram utilizados na análise que se segue sobre as tendências regionais de poluição atmosférica dentro do estado, tomando como referência os limites fronteiriços das UGRHI e a respectiva vocação. As UGRHI estão categorizadas em quatro vocações, conservação, industrial, em industrialização e agropecuária.

A Figura 6 mostra a variabilidade interanual da poluição atmosférica, segundo a mediana da AOD, para cada UGRHI, entre 2007 e 2017.



Na análise da poluição do estado na perspectiva das UGRHI, destaca-se que nas unidades de vocação conservação não é possível observar tendências na evolução da poluição, porém esporadicamente essas unidades apresentam índices de poluição que se assemelham aos de unidades mais poluídas, como a do Alto Tietê. Como exemplo, pode-se citar o ano de 2011, em que quase todas as UGRHI na categoria conservação apresentaram AOD acima de 0,1. Apesar da diversidade de tendências nas unidades de vocação agropecuária, percebe-se tendência de aumento na AOD no caso das UGRHI Turvo/Grande e São José dos Dourados, localizadas na porção noroeste do estado. Já nas UGRHI em industrialização, as unidades Mogi-Guaçu e Tietê/Jacaré apresentam ligeira tendência de redução na poluição. Esses resultados são explorados mais adiante.

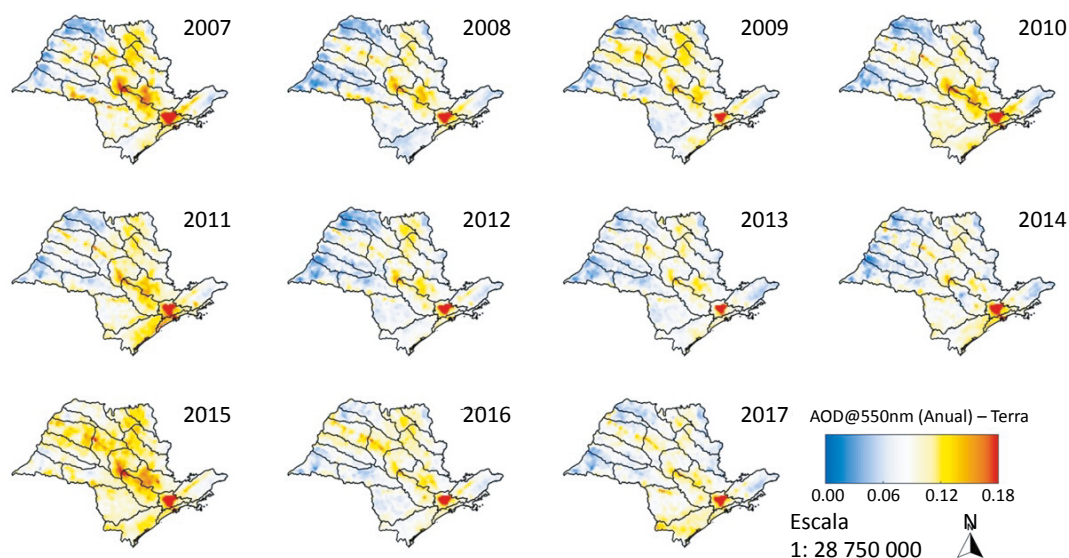
No caso das UGRHI com vocação industrial nenhuma apresenta tendência de aumento da poluição, o que se percebe é a ligeira tendência de decréscimo ou de manutenção. Por exemplo, as unidades Tietê/Sorocaba e Piracicaba/Capivari/Jundiá apresentam leve tendência de redução na poluição.

Com base na Figura 7 é possível observar que o estado de São Paulo teve diversidade significativa nas tendências de AOD em suas regiões entre 2007 e 2017. Entre as regiões nas quais se observa aumento da AOD, está a região do

Vale do Ribeira. Essa região, localizada na porção sudeste do estado, é associada à vocação de conservação. Considerando essa vocação, que sugere restrição no que diz respeito à presença de fontes poluidoras industriais, a explicação desse resultado torna-se um desafio, entretanto sabe-se que o setor agrícola da região do Vale do Ribeira é importante, especialmente no caso da produção de banana. Sendo a queimada uma prática fortemente ligada à atividade agrícola, levanta-se a hipótese de o aumento da AOD estar associado à tendência de aumento de focos de queimadas na região observada nos últimos anos. A análise para o nível de significância de 5% apresentou resultado estatisticamente significativo apenas para a UGRHI de São José dos Dourados.

A porção noroeste do estado também se destaca em relação ao aumento da poluição na última década. Entre as UGRHI em que se observa aumento de AOD nessa região do estado, encontram-se Turvo Grande e São José dos Dourados, destacadas na Figura 7.

A análise da significância estatística das tendências de poluição observadas em cada UGRHI baseada no Teste de Mann-Kendall para o nível de significância de 10% mostrou que no caso das UGRHI Turvo/Grande e São José dos Dourados, localizadas na porção oeste do estado, não é possível rejeitar a hipótese nula, isto é, de que não existe tendência (Figura 7). Portanto, é esta-



**Figura 5 – Mapa das medianas anuais da AOD550 nm no estado de São Paulo calculadas por meio de medições diárias do sensor MODIS a bordo do satélite Terra. A barra de cores representa a variação da abundância de aerossóis na atmosfera, cores frias (azul) e quentes (vermelho) indicam, respectivamente, baixos e altos níveis de material particulado na atmosfera.**

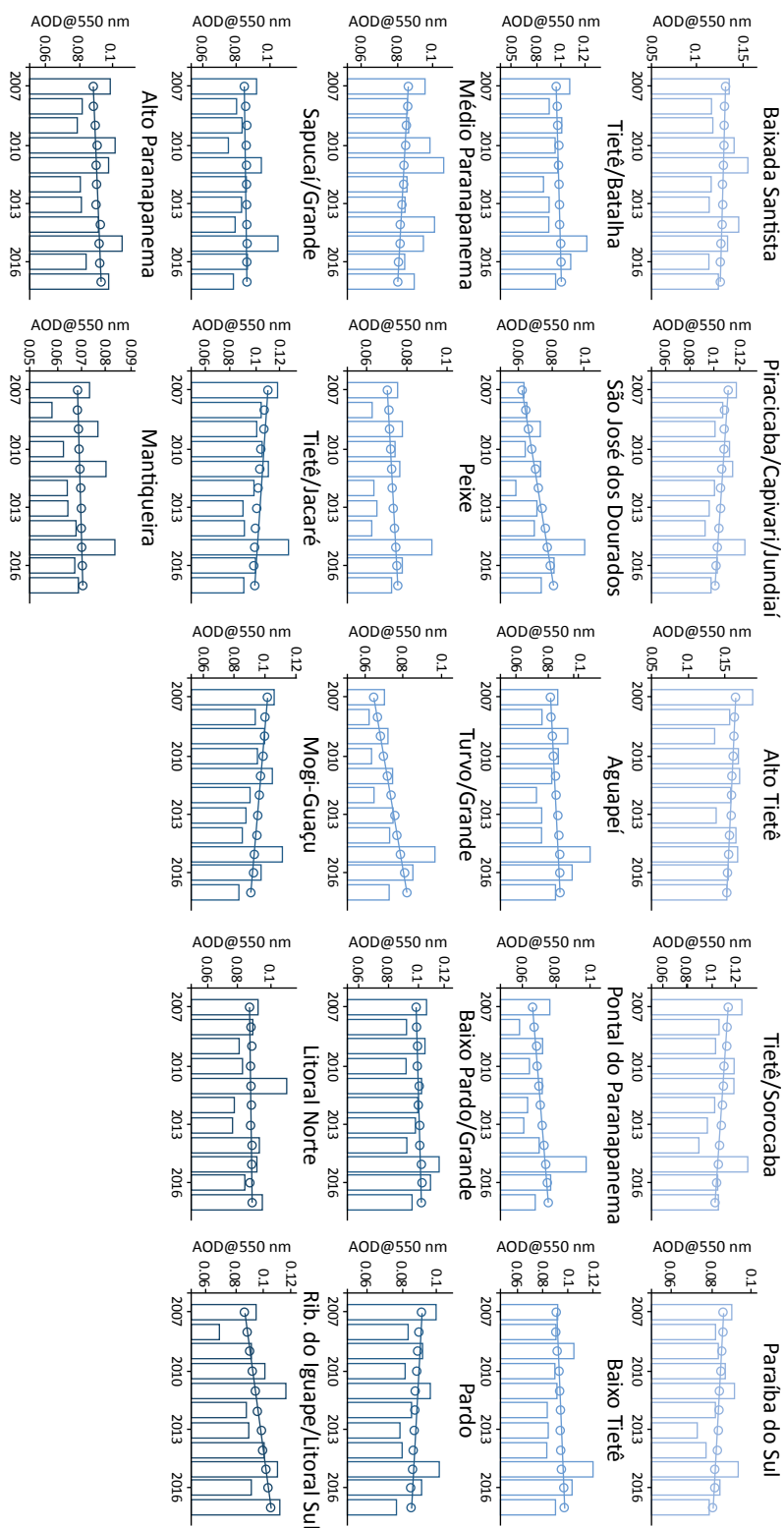


Figura 6 – Evolução interanual da mediana de AOD 550 nm de 2007 a 2017 nas UGRHI do estado de São Paulo.

tisticamente válido afirmar que a poluição atmosférica nas duas bacias tem aumentado nos últimos anos.

Por outro lado, observa-se que áreas tradicionalmente associadas ao cultivo de cana-de-açúcar, sobretudo no centro e no nordeste do estado, apresentaram estabilização e até mesmo redução na poluição.

Considerando que no interior do estado, e fora das grandes áreas metropolitanas, as regiões de cultivo de cana historicamente respondem como a principal fon-

te de poluição por MP (MATAVELI *et al.*, 2014), foi feita avaliação da intensidade da expansão do setor sucroalcooleiro no estado. Por meio da comparação entre os mapas de áreas de cultivo de cana no estado entre os anos de 2007 e 2013 (último dado gerado pelo do projeto CANASAT), é possível constatar que a porção noroeste do estado, onde se situam as UGRHI Turvo/Grande e São José dos Dourados, é a região em que houve maior expansão da área de cultivo de cana (Figura 8). Esse resultado é consistente com o levantamento

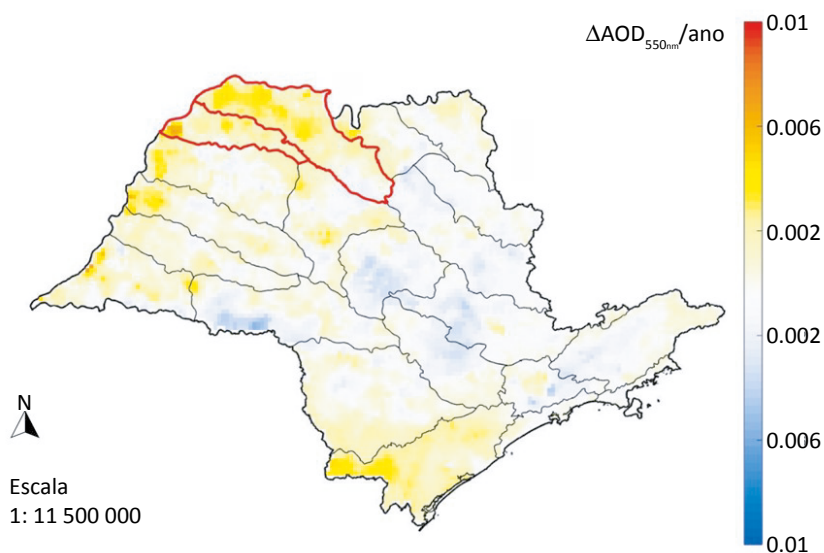


Figura 7 – Taxa de variação da AOD550 nm por ano entre 2007 e 2017 nas UGRHI do estado de São Paulo. UGRHI destacadas (cor vermelha) apresentaram tendência estatisticamente válida por meio do Teste de Mann-Kendall para nível de significância 10%.

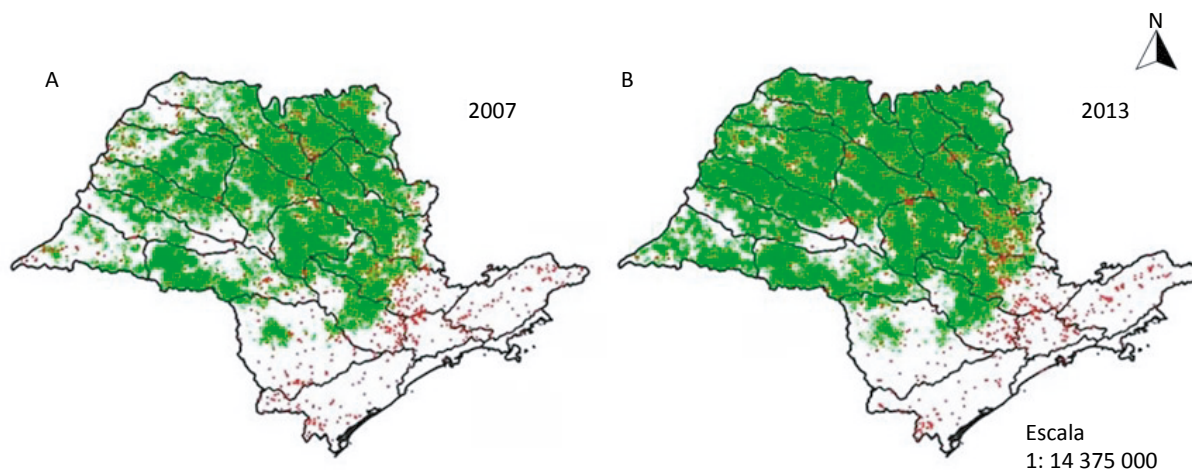


Figura 8 – Área de colheita de cana-de-açúcar (cor verde) do estado de São Paulo e focos de queimada (pontos em vermelho), para os anos (A) 2007 e (B) 2013.

realizado por Poletto (2012) sobre a evolução do setor sucroalcooleiro na UGRHI de Turvo Grande. Com base nos instrumentos de licenciamento ambiental, a autora mostra que, entre 2008 e 2011, a UGRHI Turvo/Grande liderou em relação à quantidade de licenciamentos para o setor sucroalcooleiro no estado de São Paulo, entre os 75 licenciamentos aprovados por meio da avaliação de impacto ambiental (AIA), 14 processos foram aprovados para a essa UGRHI.

Esse conjunto de informações pode justificar a tendência de aumento da poluição nas unidades UGRHIs no noroeste de São Paulo, já que durante período signifi-

cativo, nos anos de interesse, houve aumento da principal fonte poluidora do interior do estado, as queimadas atreladas à colheita de cana-de-açúcar.

Por outro lado, vale mencionar que, embora classificadas com diferentes vocações, as UGRHIs Tietê/Sorocaba, Piracicaba/Capivari/Jundiaí, Mogi-Guaçu e Tietê/Jacaré compõem uma macrorregião onde a cultura da cana foi estabelecida há muito tempo, porém a substituição da queima pelo maquinário tem avançado, o que pode auxiliar na explicação da tendência, ainda que não significativa, de diminuição da poluição atmosférica nessas UGRHIs.

## CONCLUSÃO

A utilização das médias anuais da AOD obtidas utilizando-se o sensor Terra mostrou variação espacial e temporal significativa na quantidade de MP na atmosfera no período de 2007 a 2017. A presença de anos com poluição extrema mostrou-se fortemente atreladas ao transporte de partículas oriundas das queimadas da Amazônia em direção à São Paulo, uma vez que o satélite captura o sinal de MP em toda a coluna atmosférica. Dessa forma, foi possível observar que os dados médios nem sempre são os ideais quando o interesse é avaliar a variação da poluição atmosférica presente no nível da superfície terrestre e não nas camadas superiores da atmosfera, já que o transporte sazonal de fumaça, geralmente com MP abundante, ocorre em níveis acima da superfície. Mediante a redução do efeito do transporte de áreas remotas, com a aplicação da mediana, a estrutura espacial da poluição atmosférica associada ao MP emitido no estado emergiu, destacando as áreas poluídas das regiões metropolitanas de São Paulo, de Campinas e da Baixada Santista, assim como as regiões no interior onde se localizam grande parte da cultura de cana-de-açúcar no estado. Portanto, com base nesses resultados, foi possível observar e analisar a variabilidade espacial e temporal dos campos de poluição mais

compatíveis com as fontes emissoras em São Paulo. Para todos os anos, domina o gradiente Leste-Oeste, em que a porção oeste do estado é menos poluída que a leste. Entre as áreas destacadas em relação à variabilidade espacial da poluição no estado, além das já reconhecidas como poluídas — regiões metropolitanas e canaviais —, vale ressaltar que algumas áreas do estado que são tidas como de conservação natural também apresentaram resultados mais altos do que o esperado, como foi o caso do Vale do Ribeira. Não se observaram tendências significativas de redução da poluição no estado. Pelo contrário, no caso da UGRHI de Turvo Grande, foi observada tendência estatisticamente significativa de aumento da poluição. Essa bacia, localizada na porção noroeste do estado, faz parte da área onde, no período avaliado, houve a mais significativa expansão das plantações de cana-de-açúcar e também de focos de queimada. Entretanto, vale destacar que, apesar dos focos de queimada serem usualmente associados à cana, se verificou grande quantidade de focos fora das áreas canavieiras do estado. Um exemplo é a região da UGRHI de Ribeira do Iguapé/Litoral Sul, área de vocação de conservação, em que foi observada quantidade importante de focos de queimadas e também de poluição.

## REFERÊNCIAS

ABDOLAHNEJAD, A.; JAFARI, N.; MOHAMMADI, A.; MIRI, M.; HAJIZADEH, Y.; NIKOONAHAD, A. Cardiovascular, respiratory, and total mortality ascribed to PM10 and PM2.5 exposure in Isfahan, Iran. *Journal of Educational Health Promotion*, v. 6, p. 109, 2017. [https://dx.doi.org/10.4103%2Fjehp.jehp\\_166\\_16](https://dx.doi.org/10.4103%2Fjehp.jehp_166_16)



ABE, K.C.; MIRAGLIA, S.G.E.K. Avaliação de impacto à saúde do programa de controle de poluição do ar por veículos automotores no município de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 47, p. 61-73, 2018. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820180310>

BURNETT, R.; CHEN, H.; SZYSZKOWICZ, M.; FANN, N.; HUBBELL, B.; POPE C.A., 3RD.; APTE, J.S.; BRAUER, M.; COHEN, A.; WEICHTHAL, S.; COGGINS, J.; DI, Q.; BRUNEKREEF, B.; FROSTAD, J.; LIM, S.S.; KAN, H.; WALKER, K.D.; THURSTON, G.D.; HAYES, R.B.; LIM, C.C.; TURNER, M.C.; JERRETT, M.; KREWSKI, D.; GAPSTUR, S.M.; DIVER, W.R.; OSTRO, B.; GOLDBERG, D.; CROUSE, D.L.; MARTIN, R.V.; PETERS, P.; PINAULT, L.; TJEPKEMA, M.; VAN DONKELAAR, A.; VILLENEUVE, P.J.; MILLER, A.B.; YIN, P.; ZHOU, M.; WANG, L.; JANSSEN, N.A.H.; MARRA, M.; ATKINSON, R.W.; TSANG, H.; QUOC THACH, T.; CANNON, J.B.; ALLEN, R.T.; HART, J.E.; LADEN, F.; CESARONI, G.; FORASTIERE, F.; WEINMAYR, G.; JAENSCH, A.; NAGEL, G.; CONCIN, H.; SPADARO, J.V. Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 115, n. 38, p. 9592-9597, 2018. <https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115>

CANÇADO, J.E.D.; SALDIVA, P.H.N.; PEREIRA, L.A.A.; LARA, L.B.L.S.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L.A.; ARBEX, M.A.; ZANOBETTI, A.; BRAGA, A.L.F. The impact of sugar cane-burning emissions on the respiratory system of children and the elderly. *Environmental Health Perspectives*, v. 114, n. 5, p. 725-729, 2006. <https://doi.org/10.1289/ehp.8485>

CARMO, C.N.; HACON, S.; LONGO, K.M.; FREITAS, S.; IGNOTTI, E.; LEON, A.P.; ARTAXO, P. Associação entre material particulado de queimadas e doenças respiratórias na região sul da Amazônia brasileira. *Revista Panamericana de Salud Pública*, v. 27, n. 1, p. 10-16, 2010.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Relatório da Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2017. São Paulo: CETESB, 2018. Disponível em: <<http://ar.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-relatorios/>>. Acesso em: nov. 2018.

D'ALESSIO, G. *Estudo da poluição atmosférica na região metropolitana de São Paulo a partir de medidas de sensoriamento remoto da atmosfera uma análise comparativa com medições in situ*. Iniciação Científica. (Graduando em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de São Paulo, Diadema, 2016.

DONKELAAR, A. van; MARTIN, R.V.; BRAUER, M.; BOYS, B.L. Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter. *Environmental Health Perspectives*, v. 123, n. 2, p. 135-143, 2015. <https://doi.org/10.1289/ehp.1408646>

DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V. *Análise Espacial de Dados Geográficos*. Brasília: Embrapa, 2004.

DUARTE, C.G.; GOMES, F.; SORIANO, E.; MALHEIROS, T.F. Ensaio sobre a evolução da proteção ambiental no setor sucroenergético. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 29, p. 1-16, 2013.

DUNCAN, B.N.; PRADOS, A.I.; LAMSAL, L.N.; LIU, Y.; STREETS, D.G.; GUPTA, P.; HILSENATH, E.; KAHN, R.A.; NIELSEN, J.E.; BEYERSDORF, A.J.; BURTON, S.P.; FIORE, A.M.; FISHMAN, J.; HENZE, D.K.; HOSTETLER, C.A.; KROTKOV, N.A.; LEE, P.; LIN, M.; PAWSON, S.; PFISTER, G.; PICKERING, K.E.; PIERCE, R.B.; YOSHIDA, Y.; ZIEMBA, L.D. Satellite data of atmospheric pollution for U. S. air quality applications: Examples of applications, summary of data end-user resources, answers to FAQs, and common mistakes to avoid. *Atmospheric Environment*, v. 94, p. 647-662, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.061>

ESCUCIATTO, E.; DZIEDZIC, M.; VASCONCELOS, E.C. A influência da renovação da frota de veículos na qualidade do ar na região central de Curitiba. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 42, p. 2-11, 2016. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820160198>

- FREITAS, S.R.; LONGO, K.M.; DIAS, M.A.F.S.; DIAS, P.L.S. Emissões de queimadas em ecossistemas da América do Sul. *Estudos Avançados*, v. 19, n. 53, p. 167-185, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142005000100011>
- GONÇALVES, K.D.S.; CASTRO, H.A.; HACON, S.D.S. As queimadas na região amazônica e o adoecimento respiratório. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 17, n. 6, p. 1523-1532, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1413-81232012000600016>
- HOFF, R.M.; CHRISTOPHER, S.A. Remote sensing of particulate pollution from space: have we reached the promised land? *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 59, n. 6, p. 645-675, 2009. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.59.6.645>
- IGNOTTI, E.; HACON, S.D.S.; SILVA, A.M.C.; JUNGER, W.L.; CASTRO, H. Efeitos das queimadas na Amazônia: método de seleção dos municípios segundo indicadores de saúde. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, v. 10, n. 4, p. 453-464, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1415-790X2007000400003>
- INSTITUTO DE SAÚDE E SUSTENTABILIDADE (ISS). *Monitoramento da Qualidade do Ar no Brasil*. São Paulo: ISS, 2014. 99 p.
- INSTITUTO DE SAÚDE E SUSTENTABILIDADE (ISS). *Qualidade do Ar no Estado de São Paulo Sob a Visão da Saúde*. São Paulo: ISS, 2015. 149 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). *CANASAT: Monitoramento de Cana-de-açúcar via imagens de satélite*. INPE, 2019. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/>>. Acesso em: jan. 2019.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). *Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios*. INPE, 2018. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas>>. Acesso em: set. 2017.
- JUSTICE, C.O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J.R.G.; DEFRIES, R.; ROY, D.P.; HALL, D.K.; SALOMONSON, V.V.; PRIVETTE, J.L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R.B.; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, S.W.; NEMANI, R.R.; WAN, Z.; HUETE, A.R.; VAN LEEUWEN, W.; WOLFE, R.E.; GIGLIO, L.; MULLER, J.; LEWIS, P.; BARNESLEY, M.J. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, v. 36, n. 4, p. 1228-1249, 1998. <https://doi.org/10.1109/36.701075>
- KAUFMAN, Y.J.; TANRÉ, D.; BOUCHER, O. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature Climate Change*, v. 419, n. 6903, p. 215-223, 2002. <https://doi.org/10.1038/nature01091>
- KENDALL, M.G. *Rank Correlation Methods*. Londres: Charles Griffin, 1975.
- KHANIABADI, Y.O.; GOUDARZI, G.; DARYANOOSH, S.M.; BORGINI, A.; TITTARELLI, A.; DE MARCO, A. Exposure to PM10, NO2, and O3 and impacts on human health. *Environmental Science Pollution Research*, v. 24, n. 3, p. 2781-2789, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8038-6>
- KIM, D.; KIM, J.; JEONG, J.; CHOI, M. Estimation of health benefits from air quality improvement using the MODIS AOD dataset in Seoul, Korea. *Environmental Research*, v. 173, p. 452-461, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.042>
- KING, M.D.; KAUFMAN, Y.J.; MENZEL, W.P.; TANRE, D. Remote Sensing of Cloud, Aerosol, and Water Vapor Properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 30, n. 1, p. 2-27, 1992. <https://doi.org/10.1109/36.124212>
- LAHOZ, W.A.; PEUCH, V.-H.; ORPHAL, J.; ATTÍE, J.-L.; CHANCE, K.; LIU, X.; EDWARDS, D.; ELBERN, H.; FLAUD, J.-M.; CLAEYMAN, M.; AMRAOUI, L. Monitoring air quality from space - The Case for the Geostationary Platform. *American Meteorological Society*, p. 221-233, 2012. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00045.1>
- LANDULFO, E.; PAPAYANNIS, A.; ARTAXO, P.; CASTANHO, A.D.A.; FREITAS, A.Z.; SOUZA, R.F.; VIEIRA JUNIOR, N.D.; JORGE, M.P.M.P.; SÁNCHEZ-CCOYLLO, O.R.; MOREIRA, D.S. Synergetic measurements of aerosols over São Paulo, Brazil using

LIDAR, sunphotometer and satellite data during the dry season. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 3, p. 1523-1539, 2003. <https://doi.org/10.5194/acp-3-1523-2003>

LEVY, R.C.; MATTOO, S.; MUNCHAK, L.A.; REMER, L.A.; SAYER, A.M.; PATADIA, F.; HSU, N.C. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 6, p. 2989-3034, 2013. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2989-2013>

MANN, H.B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, v. 13, n. 3, p. 245-259, 1945. <https://doi.org/10.2307/1907187>

MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A.; SELUCHI, M.E.; CUARTAS, A.; ALVES, L.M.; MENDIONDO, E.M.; OBREGÓN, G.; SAMPAIO, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. *Revista USP*, n. 106, p. 31-44, 2015. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44>

MATAVELI, G.A.V.; OLIVEIRA, B.S.; PEREIRA, G.; MORAES, E.C.; CARDOZO, F.S. Dinâmica dos focos de queimada em cana-de-açúcar no estado de São Paulo entre 2008 E 2011 Dynamics of Sugarcane Pre-harvest Burning Fires in São Paulo State between 2008 and 2011. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 66/2, p. 379-392, 2014.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). *MODIS Adaptive Processing System*. NASA, 2017. Disponível em: <<https://earthdata.nasa.gov/eosdis/sips/modaps-sips>>. Acesso em: jul. 2017.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). *OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction*. OECD, 2012.

POLETTI, M.C. *Avaliação de empreendimentos do setor sucroalcooleiro: avanços no procedimento de licenciamento*. São Paulo: Cetesb, 2012.

POPE, C.A.; EZZATI, M.; DOCKERY, D.W. Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States. *New England Journal of Medicine*, v. 360, p. 376-386, 2009. <https://doi.org/10.1056/NEJMsa0805646>

MARTIN, R.V. Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmospheric Environment*, v. 42, n. 34, p. 7823-7843, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.018>

REMER, L.A.; MATTOO, S.; LEVY, R.C.; MUNCHAK, L.A. MODIS 3 km aerosol product: Algorithm and global perspective. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 6, p. 1829-1844, 2013. <https://doi.org/10.5194/amt-6-1829-2013>

RIBEIRO, H. Queimadas de cana-de-açúcar no Brasil: efeitos à saúde respiratória. *Revista de Saúde Pública*, v. 42, n. 2, p. 1-7, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0034-89102008005000009>

ROSÁRIO, N.E.; LONGO, K.M.; FREITAS, S.R.; YAMASOE, M.A.; FONSECA, R.M. Modeling the South American regional smoke plume: aerosol optical depth variability and surface shortwave flux perturbation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 13, p. 2923-2938, 2013. <https://doi.org/10.5194/acp-13-2923-2013>

SALDIVA, P.H.; POPE, C.A. 3<sup>RD</sup>.; SCHWARTZ, J.; DOCKERY, D.W.; LICHTENFELS, A.J.; SALGE, J.M.; BARONE, I.; BOHM, G.M. Air Pollution and Mortality in Elderly People: A Time-Series Study in Sao Paulo, Brazil. *Environmental Health*, v. 50, n. 2, p. 159-163, 1995. <https://doi.org/10.1080/00039896.1995.9940893>

SALVIANO, M.F.; GROppo, J.D.; PELLEGRINO, G.Q. Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 1, p. 64-73, 2016. <https://doi.org/10.1590/0102-778620150003>

SÃO PAULO (ESTADO). *Lei Estadual nº 11.241, de 19 de setembro de 2002*. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha de cana-de-açúcar e dá providências correlatas. São Paulo, 2002.

SÃO PAULO (ESTADO). *Lei Estadual nº 16.337, de 14 de dezembro de 2016*. Dispõe sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH e dá providências correlatas. São Paulo, 2016.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE. *Etanol Verde: Relatório Consolidado 2007/2008–2013/2014*. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2014. Disponível em: <<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/etanolverde/>>. Acesso em: jun. 2018.

SEGURA, S.; ESTELLÉS, V.; UTRILLAS, M.P.; MARTÍNEZ-LOZANO, J.A. Long term analysis of the columnar and surface aerosol relationship at an urban European coastal site. *Atmospheric Environment*, v. 167, p. 309-322, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.012>

SONG, Z.; FU, D.; ZHANG, X.; HAN, X.; SONG, J.; ZHANG, J.; WANG, J.; XIA, X. MODIS AOD sampling rate and its effect on PM<sub>2.5</sub> estimation in North China. *Atmospheric Environment*, v. 209, p. 14-22, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.04.020>

WANG, Y.; XIE, Y.; DONG, W.; MING, Y.; WANG, J.; SHEN, L. Adverse effects of increasing drought on air quality via natural processes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 17, p. 12827-12843, 2017.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Ambient Air Pollution: a global assessment of exposure and burden of disease*. Genebra: WHO, 2016. 131 p.

XIE, Z.; QIN, Y.; ZHANG, L.; ZHANG, R. Death Effects Assessment of PM<sub>2.5</sub> Pollution in China. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 27, n. 4, p. 1813-1821, 2018. <https://dx.doi.org/10.15244/pjoes/77077>

YOU, W.; ZANG, Z.; ZHANG, L.; LI, Y.; WANG, W. Estimating national-scale ground-level PM<sub>2.5</sub> concentration in China using geographically weighted regression based on MODIS and MISR AOD. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 23, n. 9, p. 8327-8338, 2016. <https://dx.doi.org/10.1007/s11356-015-6027-9>

ZHENG, C.; ZHAO, C.; ZHU, Y.; WANG, Y.; SHI, X.; WU, X.; CHEN, T.; WU, F.; QIU, Y. Analysis of influential factors for the relationship between PM<sub>2.5</sub> and AOD in Beijing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 17, p. 13473-13489, 2017. <https://doi.org/10.5194/acp-17-13473-2017>

