

ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS PARA VERIFICAR RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E A CONCENTRAÇÃO DE MP10

D.C. NOGAROTTO¹, M.R.G. LIMA², S.A. POZZA³

Universidade Estadual de Campinas¹²³

simone.pozza@ft.unicamp.br¹

Submetido em 21/05/2019 - Aceito em 14/02/2020

DOI: 10.15628/holos.2020.8649

RESUMO

Avaliar o comportamento das variáveis meteorológicas no contexto de poluição do ar é imprescindível, pois sabe-se que as primeiras estão diretamente relacionadas com o comportamento dos poluentes atmosféricos. Este trabalho teve por objetivo verificar a influência de algumas variáveis meteorológicas (temperatura, velocidade do vento e umidade relativa) na variação de concentração do Material Particulado inalável (MP10). O estudo foi realizado com dados, coletados durante os

anos de 2010 a 2014, dos municípios de Americana, Jundiaí, Paulínia e Piracicaba, localizadas no Estado de São Paulo. A relação entre as variáveis meteorológicas e o MP10 foi estudada pela Análise de Componentes Principais (ACP). Obteve-se que, com 3 Componentes Principais, foi explicado mais de 90% da variabilidade dos dados. Além disso, encontrou-se que o MP10 e umidade relativa têm mais forte correlação (42%).

PALAVRAS-CHAVE: Dados meteorológicos, Material Particulado, ACP.

PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS TO CHECK THE RELATION AMONG METEOROLOGICAL VARIABLES AND PM10 CONCENTRATION

ABSTRACT

It's known that meteorological variables are directly related to the behavior of atmospheric pollutants. This work aimed at studying the influence of some meteorological variables (temperature, wind speed and relative humidity) in the variation of inhalable Particulate Matter concentration (PM10). The study used data collected from 2010 to 2014, in cities Americana, Jundiaí,

Paulínia and Piracicaba, located in São Paulo State. The relation among meteorological variables and PM10 was studied by Principal Component Analysis (PCA). It was obtained that three Principals Components explained more than 90% of data variability. Besides, it was found that PM10 and relative humidity had a stronger correlation (around 42%).

KEYWORDS: Meteorological data, Particulate Matter, PCA.

1 INTRODUÇÃO

Problemas ambientais tornam-se cada vez maiores no Brasil e no mundo em virtude, principalmente, da interferência humana no meio ambiente. Neste contexto, a poluição atmosférica acaba ganhando destaque, pois de acordo com dados da Organização Mundial da Saúde (OMS), a poluição do ar foi responsável pela morte de 3,6 milhões de pessoas no mundo em 2012 (VORMITTAG et al., 2014) e de 4,2 milhões de pessoas em 2016 (WHO, 2018). Estima-se que até 2050, se não forem tomadas medidas para controle da poluição do ar, complicações cardiorrespiratórias serão a principal causa de morte (com exceção de doenças crônicas não evitáveis). Isso, devido à má qualidade do ar, principalmente devido ao Material Particulado (MP) e ao ozônio (O₃). Em 2012, a *Organization for Economic Co-operation and Development* (OECD) estimou que essa causa de morte poderá superar mortes decorrentes da malária, poluição *indoor* (poluição em ambientes fechados), consumo de água insalubre e ausência de saneamento básico (OECD, 2012).

Dados do ano de 2015 apontaram que a exposição ao MP_{2,5} levou a mortalidade de 260.274 a cada 1.000.000 de habitantes no Brasil. Nos EUA, foram 275.183, enquanto na Europa o número foi de 505.464 a cada 1.000.000 de habitantes (OECD, 2018).

A poluição do ar nos grandes centros urbanos é um dos grandes problemas ambientais da atualidade, acarretando graves problemas à saúde da população, especialmente em crianças, idosos e nos portadores de doenças do aparelho respiratório, como asma e a insuficiência respiratória (RODOPOULOU et al., 2015; FREITAS et al., 2016). Um dos principais poluentes atmosféricos é o MP (Material Particulado). O foco deste estudo está no MP₁₀, que é o MP com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 µm (SEINFELD, 2006). Há também outros MP, como MP_{2,5} e MP₁, que são partículas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 2,5 µm e 1 µm, respectivamente (SEINFELD, 2006; BRITO et al., 2018).

O Brasil apresenta problemas ambientais regionais, entre eles se destacam a concentração de fontes industriais, alto tráfego veicular, queimadas e áreas densamente povoadas (SOUZA et al., 2015; GONÇALVES et al., 2017; SOUZA et al., 2017). A região Sudeste, especialmente o Estado de São Paulo, apresenta os maiores índices do país nesses quesitos (IBGE, 2018a). Partindo deste ponto, foram escolhidas as cidades de Paulínia, Americana, Piracicaba e Jundiaí para analisar a qualidade de ar destas regiões, além do comportamento e da dispersão do MP₁₀ em relação às variáveis meteorológicas.

Paulínia concentra importantes indústrias dos setores químicos e petroquímicos. Além disso, esta é influenciada pela grande região urbanizada de Campinas (CLEMENTE, 2000; D'AMELIO et al., 2017). Piracicaba caracteriza-se por atividades agrícolas (principalmente no cultivo da cana-de-açúcar) e atividades industriais relacionadas à agricultura (SOUZA et al., 2015). De acordo com o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), a frota do município de Americana, em 2016, era de quase 147.000 veículos (IBGE, 2018b). No mesmo ano, Piracicaba e Jundiaí contavam com uma frota com 100.000 veículos a mais do que Americana. (IBGE, 2018b).

Todas as cidades envolvidas neste estudo têm considerável potencial poluidor, o que justifica escolhê-las para a realização de uma análise abordando a concentração de MP₁₀.

Além disso, avaliar como o comportamento meteorológico influencia na dispersão deste poluente, nesses municípios, é de grande importância ambiental, de saúde pública e de cunho informativo. De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2016), as cidades de Jundiaí, Paulínia, Piracicaba e Americana se enquadram na Unidade Vocacional Industrial, devido, em partes, ao alto grau de industrialização, de serviços e desenvolvimento agrícola, além de um extenso complexo rodoviário. Além disso, no relatório divulgado pela CETESB (2016), as cidades de Piracicaba, Paulínia e Jundiaí, chegaram a classificar a qualidade do ar como “Ruim”, sendo que, as duas últimas cidades alcançaram a qualidade “Muito Ruim”.

Existem leis que buscam regulamentar a emissão de poluentes atmosféricos como o MP10. A Resolução nº 491 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) regulamenta padrões federais (BRASIL, 2018), enquanto o Decreto Estadual nº 59.113/2013 regulamenta os padrões para o Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2013). Estas leis estabelecem os padrões de qualidade do ar, tendo por base as diretrizes estabelecidas pela Organização mundial da Saúde (OMS). A nível mundial, para o MP10, a concentração média aritmética anual é $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e concentração média de 24 h é $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

Diversos estudos (STATHEROPOULOS et al., 1998; NICODEMOS et al., 2009; DOMINICK et al., 2012; BARROS, 2014; LUNA et al., 2014; KWON et al., 2015) já foram realizados ao redor do mundo, demonstrando que existe forte correlação entre a concentração de MP10 e variáveis meteorológicas. Alguns destes estudos utilizaram Análise de Componentes Principais (ACP) para mostrar essa relação.

Na cidade de Atenas, na Grécia, foram comparados os níveis de concentração de poluentes como CO (monóxido de carbono), NO (monóxido de nitrogênio), NO₂ (dióxido de nitrogênio), O₃ (ozônio) e SO₂ (dióxido de enxofre), durante o verão e o inverno, utilizando ACP. Neste estudo foram levadas em consideração também as variáveis meteorológicas de umidade relativa, temperatura, duração do tempo de sol e velocidade e direção do vento (STATHEROPOULOS et al., 1998).

Dominick et al. (2012) apresentaram uma avaliação da qualidade do ar na Malásia usando Análise Estatística Multivariada. Primeiramente foram agrupadas as 8 estações de monitoramento em 3 clusters diferentes, e após isso, via ACP, identificou as mais relevantes fontes de emissão de poluentes. Por fim, a Análise de Regressão Múltipla demonstrou o percentual de contribuição de cada poluente na variabilidade do Índice de Poluentes do Ar (*Air Pollutant Index* - API). Notou-se também, nesse estudo, que variáveis meteorológicas como temperatura do ambiente, velocidade do vento e umidade influenciaram na concentração de MP10.

Em Seul, Coreia do Sul, a concentração do MP (MP10, MP2,5 e MP1) foi amostrada em seis estações de metrô, para estudar sua influência dentro e fora dos trens. Com uso da ACP, Kwon et al. (2015) verificaram que a concentração do MP era influenciada pela ventilação, sendo que estações com maiores taxas de ventilação sofreram menores influências de frações menores do MP.

Durante os verões (Julho e Agosto) de 2010 a 2012, em Chicago, EUA, dados meteorológicos, aerossóis e gases traço foram obtidos por Binaku e Schmeling (2017). Os autores usaram ACP para explicar 70% da variabilidade relacionada entre as variáveis meteorológicas e de poluição do ar. A principal relação encontrada foi entre a concentração de ozônio e nitrato, com respeito a temperatura e umidade.

Entre 2011 e 2012, Luna et al. (2014) usaram ACP para relacionar variáveis meteorológicas (velocidade do vento, radiação solar global, temperatura e umidade relativa) e poluentes atmosféricos (NO_2 , NO_x (óxidos de nitrogênio), NO , CO e O_3) em 3 estações de monitoramento na cidade do Rio de Janeiro, no Estado do Rio de Janeiro, Brasil. Os autores encontraram que NO , NO_x e radiação solar têm forte impacto na concentração do O_3 .

Em um estudo realizado em Uberlândia, Minas Gerais (MG), Brasil, Nicodemos et al. (2009) demonstraram que as variáveis meteorológicas são fortemente correlacionadas entre si. Além disso, que a concentração de MP_{10} apresentou maior correlação com a umidade relativa e esteve menos correlacionada com a precipitação. Variáveis meteorológicas como temperatura e velocidade do vento não tiveram correlação linear com a concentração do MP_{10} . A partir da análise das variáveis meteorológicas, os autores verificaram que o inverno é um período do ano mais seco, com condições atmosféricas desfavoráveis à dispersão de poluentes, fazendo com que as maiores concentrações de MP_{10} ocorram nesta época.

Barros (2014) demonstrou em seus estudos, realizados em Santa Catarina (SC), Brasil, que a concentração de MP_{10} apresentou correlações significativas com as variáveis pressão, umidade, ventos zonal e meridional, e precipitação. Concluiu-se que quanto maior a precipitação, menor a concentração de MP_{10} , pois a chuva promove a remoção úmida, lavando o material particulado da atmosfera.

Na cidade de Campo Grande, Mato Grosso do Sul (MS), Brasil, durante 2014, Souza et al. (2017) usaram ACP relacionando variáveis meteorológicas (temperatura, umidade relativa, precipitação, velocidade do vento, radiação solar e índice de claridade) e dois poluentes atmosféricos (ozônio e monóxido de carbono). Temperatura, velocidade do vento e radiação solar foram as principais contribuições para a concentração de ozônio (38,2%).

Por se tratar de um método multivariado bastante utilizado em análises de variáveis ambientais, a ACP foi escolhida como ferramenta estatística neste trabalho. Dentro deste contexto, o principal objetivo deste estudo foi utilizar a ACP para identificar a relação entre as três variáveis meteorológicas (temperatura, velocidade do vento e umidade relativa) e o MP_{10} , nas cidades de Americana, Paulínia, Jundiaí e Piracicaba, todas localizadas no Estado de São Paulo, Brasil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados foram extraídos da plataforma online Qualidade do Ar (QUALAR, 2016), disponível no site da CETESB. Eles foram obtidos das medições horárias feitas pelas estações automáticas das cidades de Paulínia, Jundiaí, Piracicaba e Americana, nos anos de 2010 a 2014, e são referentes às medições de: temperatura (TEMP), umidade relativa do ar (UR), material particulado inalável (MP_{10}) e velocidade do vento (VV). Em seguida, foi aplicada a ACP, que possibilitou a interpretação das variáveis de uma melhor forma, reduzindo o número de dados e preservando a maior parte da variabilidade contida nos dados originais (JOHNSON e WICHERN, 1982).

O método ACP se baseia na redução de variáveis, pelas combinações lineares das variáveis originais, preservando parte da variabilidade do conjunto de dados. O objetivo da redução é facilitar a interpretação de dados com menos variáveis e identificar as variáveis de maior influência (DOMINICK et al., 2012; BINAKU e SCHMELING, 2017; SOUZA et al., 2017). As variáveis que serão

geradas são denominadas de CP (componente principal) e possuem independência estatística, ou seja, são não correlacionadas. Cada CP é estimada com o propósito de reter, em ordem de estimação, a variação total contida nos dados iniciais. Isto é, as primeiras componentes principais contêm a maior parte da variabilidade total dos dados (SOUZA, 2000; REGAZZI, 2001; MANLY, 2008). A ACP pode ser dada pela Equação 1.

$$Z_i = a_{1i}X_1 + a_{2i}X_2 + \dots + a_{ni}X_n \quad (1)$$

onde: Z_i é a_i -ésima componente principal, a_{ji} são os coeficientes da componente principal, X_j é o valor da j -ésima variável e n é o número de variáveis (MANLY, 2008; DOMINICK et al., 2012).

É importante ressaltar que para a realização da ACP foram utilizados apenas os dias em que as quatro variáveis foram medidas, ou seja, os dias em que havia dados faltantes, referentes à medição de alguma das variáveis, foram descartados.

As CPs foram rotacionadas pela rotação varimax, que produz um melhor relacionamento entre as CPs e as variáveis originais. A rotação varimax garante que cada variável é maximamente correlacionada com apenas uma componente e tem uma associação perto de zero com as outras componentes. As cargas fatoriais após a rotação são importantes para saber o quanto a variável contribui em particular para a CP e em que medida uma variável é semelhante às outras. Quanto maior o fator de carga da variável, maior é a contribuição dela para a CP em particular (JOHNSON e WICHERN, 1982; DOMINICK et al., 2012).

Por fim, calculou-se o coeficiente de correlação entre os dados meteorológicos e do MP10 para identificar o grau de relação linear entre essas variáveis (MORETTIN e BUSSAB, 2002). A representação dos dados recolhidos e analisados foi feita utilizando a plataforma computacional R 3.5.1 (RIBEIRO JUNIOR, 2011; R CORE TEAM, 2018) e o Excel.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente foram calculadas as correlações de Pearson entre as variáveis de estudo, e num segundo momento, foi aplicada a ACP. Na correlação de Pearson, as correlações são calculadas considerando apenas duas variáveis de cada vez. Por outro lado, uma das vantagens da ACP é que se considera a estrutura de todas as variáveis simultaneamente, ou seja, considera-se a estrutura multivariada dos dados.

A Tabela 1 apresenta resultados de correlação a partir do cálculo de correlação de Pearson, sendo possível analisar que a variável com maior índice de correlação em todas as cidades com o MP10 é a umidade relativa do ar. Esta correlação é negativa, o que significa que quanto maior a umidade relativa do ar, menor será a concentração do MP10 e vice-versa.

A segunda variável mais correlacionada com o MP10 é a velocidade do vento e em terceiro lugar, a temperatura. A correlação negativa do MP10 e a velocidade do vento ocorre, pois, as massas de ar auxiliam na dispersão dos poluentes, de forma que, caso a velocidade do vento seja alta, a concentração será menor, e vice-versa. Em relação à temperatura, a correlação com o MP10 é fraca, não ultrapassando o valor de 0,13.

Tabela 1: Índice de correlação entre as variáveis nas cidades de estudo.

Cidades	Variáveis	TEMP	VV	UR
Americana	VV	0,08		
	UR	-0,30	-0,03	
	MP10	0,03	-0,36	-0,53
Piracicaba	VV	0,05		
	UR	-0,10	-0,12	
	MP10	-0,09	-0,19	-0,55
Jundiaí	VV	-0,32		
	UR	-0,36	0,08	
	MP10	0,13	-0,22	-0,52
Paulínia	VV	-0,10		
	UR	-0,30	-0,09	
	MP10	-0,10	-0,32	-0,48

Fonte: Elaborada pelos autores, a partir de dados do Qualar (2016)

Tabela 2: Média anual da concentração do MP10 e das variáveis meteorológicas por cidade

Cidades	Ano	MP10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	UR (%)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)
Paulínia	2010	34,59	70,48	20,52
	2011	35,28	71,20	21,64
	2012	32,05	71,51	23,96
	2013	29,53	90,51	23,57
	2014	32,71	58,98	25,38
Jundiaí	2010	30,73	75,37	20,85
	2011	31,13	76,20	20,53
	2012	29,57	75,63	21,01
	2013	26,09	70,92	21,18
	2014	30,23	67,19	21,78
Americana	2010	42,42	67,81	22,36
	2011	37,02	69,12	22,49
	2012	34,16	68,11	23,02
	2013	32,80	68,49	22,61
	2014	36,47	58,81	23,49
Piracicaba	2010	38,26	74,80	21,90
	2011	36,56	74,92	22,08
	2012	36,95	79,03	23,91
	2013	37,70	81,79	21,90
	2014	37,91	66,80	22,46

Fonte: Elaborada pelos autores a partir de dados do Qualar (2016)

A Tabela 2 apresenta os valores médios anuais nas quatro cidades para as variáveis MP10, Umidade Relativa (UR) e Temperatura (Temp). Nas Figuras 1 a 4 pode-se observar que no período de julho a setembro, em todas as cidades, a concentração de MP10 foi maior em relação aos outros meses. Além disso, o padrão anual nacional foi ultrapassado, em todas as cidades neste período. É possível observar também que durante os meses de inverno (maio, junho e julho) há um aumento

na concentração de MP10 devido à baixa umidade relativa do ar, o que dificulta a dispersão dos poluentes (PINTO et al., 2018). No mês de setembro, as concentrações ainda ficaram num nível bem alto, porém nos meses seguintes já houve uma diminuição em todas as cidades. Nota-se também que nos meses de junho a agosto, que compreende o inverno (período de menores temperaturas) as concentrações de MP10 são maiores em relação aos demais meses.

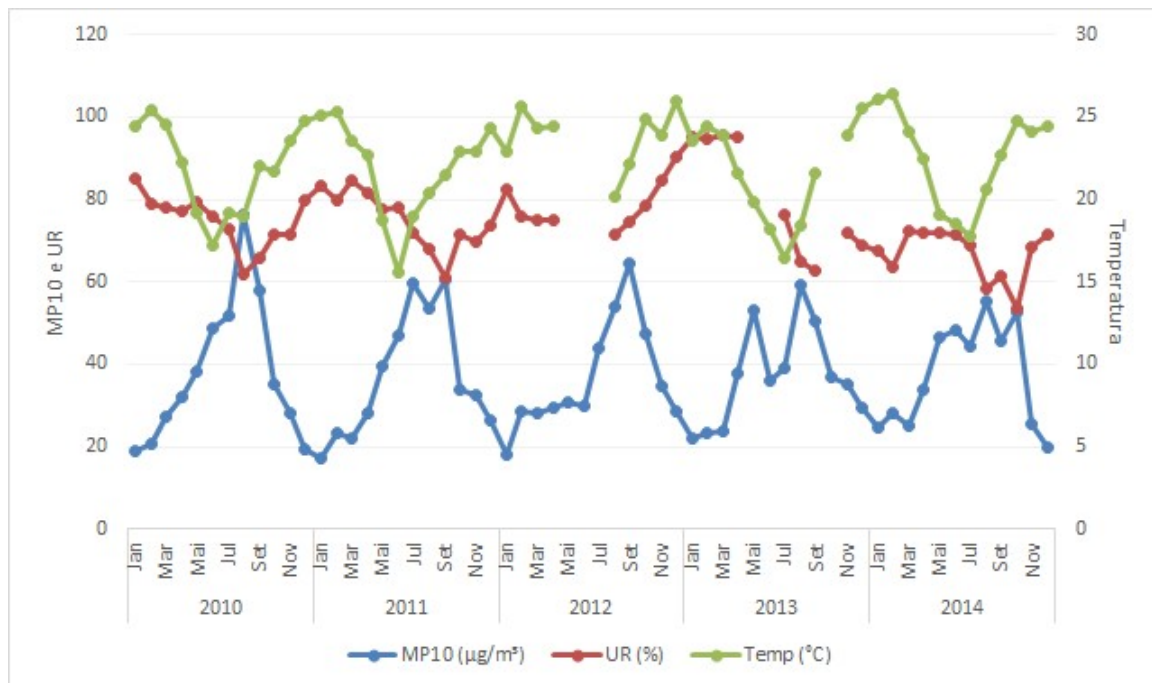


Figura 1: Relação entre as variáveis meteorológicas e a concentração de MP10 na cidade de Piracicaba no período de 2010-2014.

Fonte: Elaborada pelos autores, a partir de dados do Qualar (2016)

Agosto de 2010 apresentou os maiores índices de concentração de MP10. De acordo com o relatório da CETESB isto ocorreu devido a uma forte influência do fenômeno La Niña, observado naquele ano (CETESB, 2010; NOAA, 2019). A atuação do La Niña, provocou longa seca entre julho e setembro de 2010, sendo que a anomalia de temperaturas médias para os meses de julho a setembro apresentou aumento na temperatura, alcançando até 1,5°C acima do normal climatológica no estado de São Paulo (SP) (INMET, 2019). Além disso, ocasionou baixos índices de umidade relativa e altos níveis de concentração de MP10 (CETESB, 2010). Como a umidade relativa e a concentração de MP10 têm uma boa correlação (Tabela 1), quando a umidade relativa fica baixa os índices de concentração de MP10 aumentam, como observado no mês de agosto de 2010 (Figuras 1 a 4). Este fenômeno fez com que o inverno de 2010 fosse um dos mais desfavoráveis para a dispersão de poluentes primários nos últimos anos, o que justifica uma concentração de MP10 maior nos meses de inverno deste ano (CETESB, 2010). O ano de 2011 também foi influenciado pelo fenômeno La Niña, porém seus efeitos foram amenizados devido a melhores condições de ventilação propiciadas pela atuação de três massas de ar polar e de forte intensidade (CETESB, 2011).

Os menores valores anuais de concentração de MP10 ocorreram nos anos de 2012 e 2013 (Tabela 2). O estado de São Paulo teve índices pluviométricos acima da média nos meses de Junho

e Julho nos dois anos (CETESB, 2012; CETESB, 2013), o que auxiliou na redução dos níveis de MP10. O total de chuva nos meses de Junho e Julho, em Jundiá, foi de 103,4 mm (2010), 71,4 mm (2011), 284 mm (2012), 158,3 mm (2013) e 46,6 mm (2014) (CIAGRO, 2019). Em Piracicaba, nesses mesmo dois meses, o total de chuvas foi de 104,8 mm (2010), 55,4 mm (2011), 215,5 mm (2012), 175,3 mm (2013) e 20,3 mm (2014) (CIAGRO, 2019). Note que os anos de 2012 e 2013 tiveram um total de chuvas maior que os demais anos do estudo.

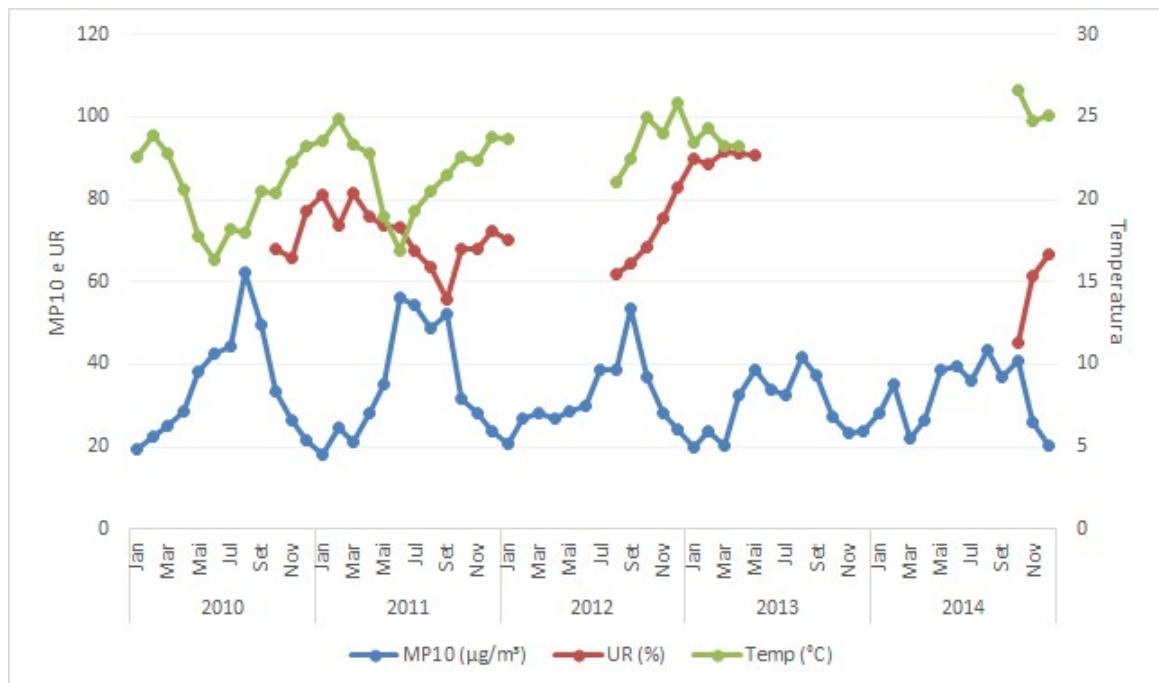


Figura 2: Relação entre as variáveis meteorológicas e a concentração de MP10 na cidade de Paulínia no período de 2010-2014.

Fonte: Elaborada pelos autores a partir de dados do Qualar (2016)

Na Figura 4, destaca-se o pico na concentração do MP10 no mês de outubro de 2014, devido à ocorrência de ultrapassagens nos padrões diários no município de Jundiá. Em dois dias do mês de outubro (13 e 14) de 2014, a média diária de MP10 ultrapassou o valor de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ocasionando uma elevação na média. A média da concentração do MP10 no mês de outubro foi igual a $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$, porém, ao desconsiderar os dois dias de pico a média mensal seria de aproximadamente $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, havendo uma redução de 14% na concentração mensal. Entre os dias 8 e 19 de outubro, o estado de São Paulo ficou sob o domínio do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, provocando estabilidade atmosférica em todo o estado e não ocorrência de precipitação (CETESB, 2014). Conseqüentemente, esta situação meteorológica favoreceu a ocorrência desses altos níveis de concentração no MP10.

Conforme o relatório da CETESB (2014), a maior velocidade do vento contribuiu para que as condições de dispersão de poluentes no inverno fossem melhores. A velocidade do vento, dado como exemplo, é a segunda variável com maior correlação com o MP10 (Tabela 1) o que significa que quando os índices de velocidade do vento são altos eles auxiliam na dispersão dos poluentes, influenciando numa concentração de MP10 menor (YNOUE et al., 2017), mesmo com baixa

precipitação pluviométrica. O inverno de 2014 foi um dos mais secos dos últimos anos, ocasionando um aumento significativo de queimadas (CETESB, 2014).

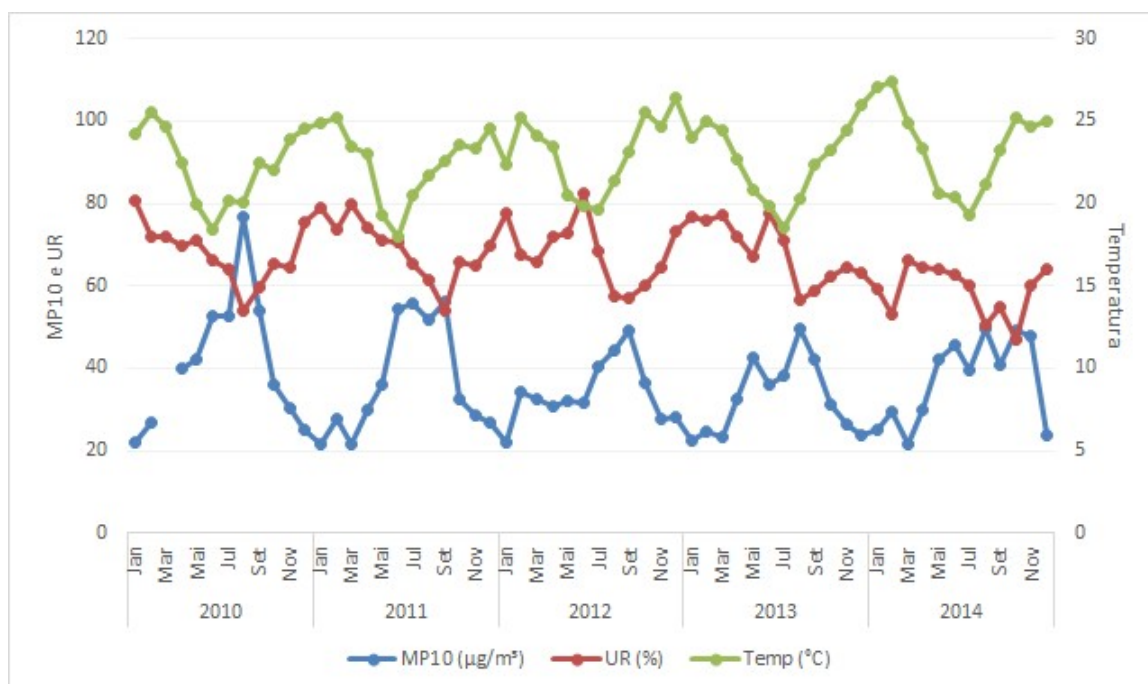


Figura 3: Relação entre as variáveis meteorológicas e a concentração de MP10 na cidade de Americana no período de 2010-2014.

Fonte: Elaborada pelos autores a partir de dados do Qualar (2016)

As menores médias de umidade relativa foram obtidas no ano de 2014, em todas as cidades (Tabela 2). Também houve um aumento de 133% dos focos de queimadas no ano 2014 em relação a 2013, em todo o estado de São Paulo (INPE, 2019). Assim, em decorrência de diversos dias secos e do aumento no número de queimadas, de maneira geral, a concentração de material particulado em 2014 foi maior do que no ano de 2013. Este comportamento pôde ser observado em todas as cidades estudadas. Por exemplo, conforme observado em Americana (Figura 5), fica claro que a concentração de MP10 foi maior no ano de 2014 como pode ser observado nos meses de janeiro, fevereiro, junho, outubro e novembro. Nos demais meses, as concentrações foram muito parecidas nos dois anos.

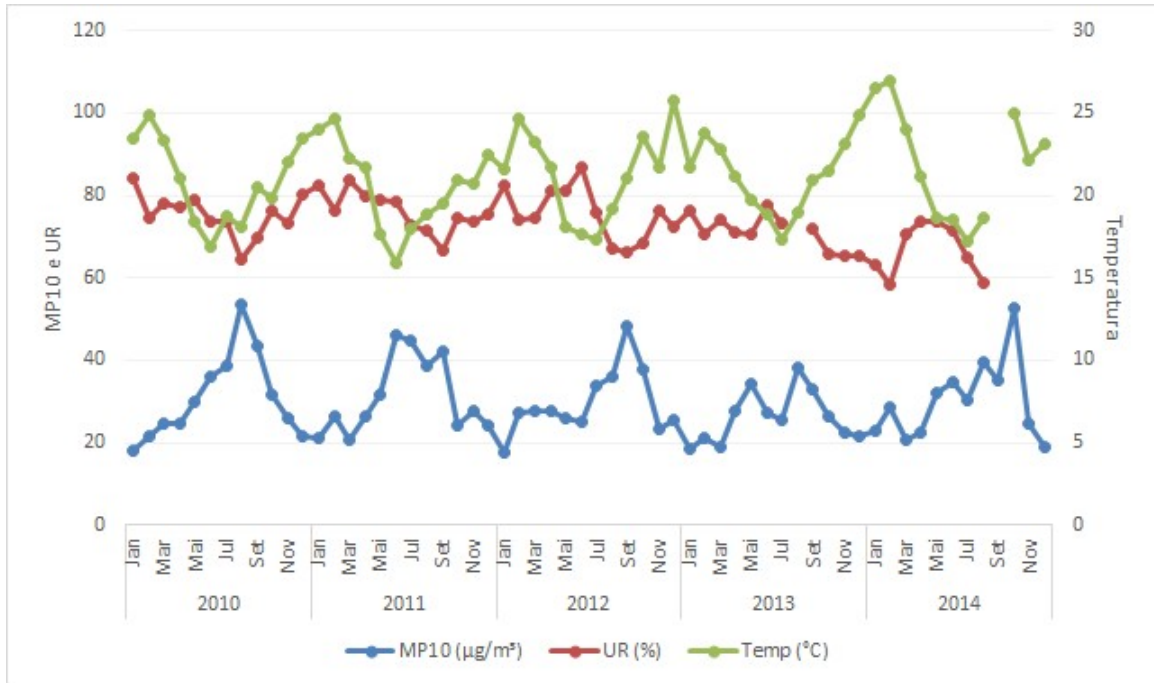


Figura 4: Relação entre as variáveis meteorológicas e a concentração de MP10 na cidade de Jundiá no período de 2010-2014.

Fonte: Elaborada pelos autores, a partir de dados do Qualar (2016)

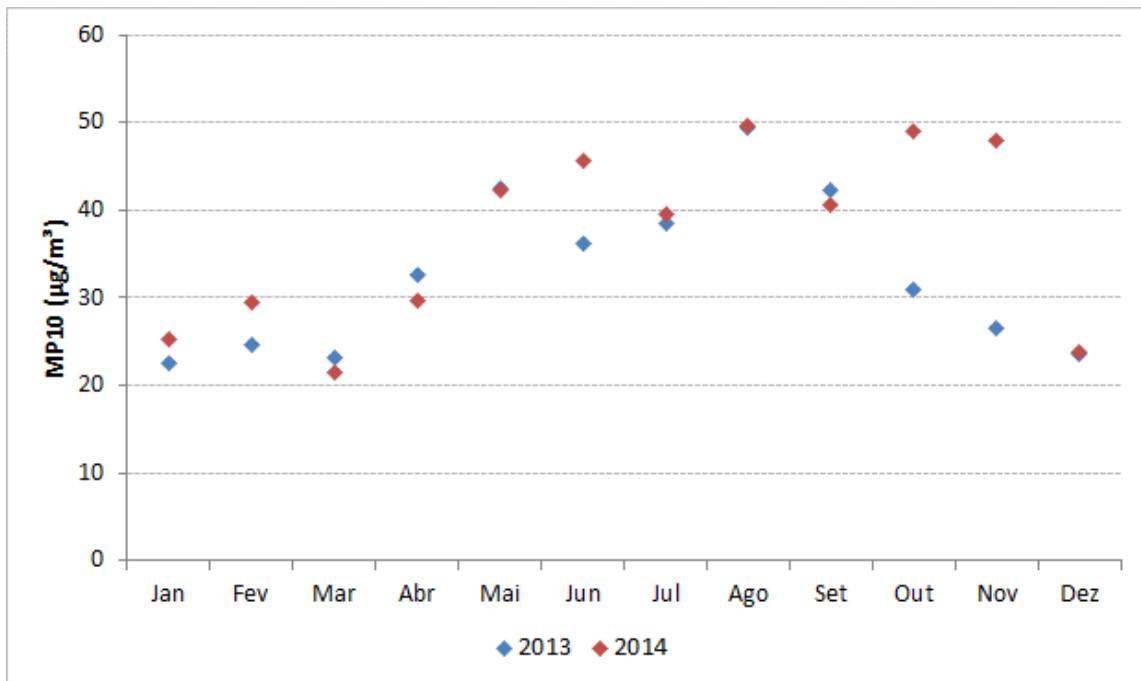


Figura 5: Concentração mensal de MP10 na cidade de Americana nos anos de 2013-2014.

Fonte: Elaborada pelos autores a partir de dados do Qualar (2016)

Após essa primeira análise, foi utilizada a ACP para verificar quais as principais relações existentes entre as variáveis meteorológicas e o MP10. Na Tabela 3, fica explícito que três componentes principais contemplam cerca de 90% de toda a variabilidade dos dados em todas

as cidades. Com isso, a quarta componente, pode ser excluída da análise, devido à baixa proporção, e assim pôde-se trabalhar com um número reduzido de componentes, e ainda assim explicando a maior parte da variabilidade total dos dados.

Tabela 3: Proporção acumulada das componentes principais em cada cidade.

Cidades	CP1	CP2	CP3
Paulínia	0,40	0,68	0,92
Jundiaí	0,45	0,71	0,91
Piracicaba	0,39	0,67	0,91
Americana	0,42	0,73	0,92

Fonte: Elaborada pelos autores

A Tabela 4 apresenta os resultados das cargas fatoriais para as 3 primeiras CP. Os valores obtidos acima de 0,75 são considerados fortes, os valores entre 0,75-0,50 são moderados e os valores entre 0,49-0,30 são fracos (DOMINICK et al., 2012). O símbolo “-” na Tabela 4 indica os valores próximos a zero, ou seja, não apresentam significância.

Com base nos resultados observados, pode-se afirmar que o comportamento dos dados obtidos a partir da ACP é muito semelhante em todas as cidades.

Tabela 4: Cargas fatoriais das Componentes Principais

Cidades	Parâmetros	CP1	CP2	CP3
Paulínia	MP10	0,72	0,25	-0,23
	VV	-	-0,93	-
	UR	-0,69	0,26	-0,24
	TEMP	-	-	0,94
Jundiaí	MP10	0,76	-0,20	0,25
	VV	-	0,94	-
	UR	-0,65	0,26	0,34
	TEMP	-	-	-0,90
Americana	MP10	0,69	0,25	-0,15
	VV	-	-0,94	-
	UR	-0,72	0,24	-0,15
	TEMP	-	-	0,98
Piracicaba	MP10	0,70	0,21	0,13
	VV	-	-0,95	-
	UR	-0,71	0,21	0,13
	TEMP	-	-	-0,98

Fonte: Elaborada pelos autores

- : valores próximos a zero

Com apenas três componentes principais, foi possível observar (Tabela 4) que, para todas as cidades, na CP1 a umidade relativa do ar é inversamente proporcional à concentração de MP10. Isso significa que quando o índice de umidade relativa do ar está baixo, a concentração do MP10 fica maior, porque a dispersão dos poluentes é dificultada com a baixa umidade relativa. As cargas fatoriais obtidas são consideradas moderadas. É importante ficar claro que a CP1, é a componente que tem maior representatividade, ou seja, maior variabilidade dos dados em relação às outras. As variáveis que aparecem nessa CP são MP10 e umidade relativa do ar, isso significa que elas têm correlação maior entre si.

Na CP2, a variável que tem maior representatividade é a velocidade do vento. Suas cargas fatoriais em todas as cidades são consideradas como fortes. O fato da velocidade do vento ser representada pela componente principal 2 significa que esta variável é a segunda que mais se correlaciona com o MP10. Deste modo, o vento atua auxiliando na dispersão dos poluentes, ou seja, a concentração é menor caso a velocidade seja alta e a concentração de MP10 é maior caso a velocidade do vento seja menor (YNOUE et al., 2017).

A CP3 é representada pela temperatura, que possui carga fatorial forte para todas as cidades. A temperatura nesse caso influencia no comportamento da concentração do MP10. Conforme a temperatura aumenta, a umidade relativa do ar fica mais baixa, aumentando a concentração do MP.

Embora a umidade relativa do ar e a concentração do MP10 apareçam em todas as componentes, é importante ressaltar que os valores das cargas fatoriais estão inferiores do que é classificado como 'baixo', porém isso não significa que não há correlação, mas sim que essa relação é fraca, dado o método estatístico utilizado para calcular essa correlação.

É interessante observar que, mesmo com métodos diferentes (correlação de Pearson e ACP) para calcular a correlação entre as variáveis meteorológicas e a concentração do MP10, os resultados obtidos nos levam a uma mesma conclusão. A desvantagem da correlação de Pearson é que as correlações são calculadas separadamente, considerando duas variáveis de cada vez (é um método bivariado). Já na ACP, sendo um método multivariado, todas as variáveis são consideradas no cálculo, além da garantia que nas primeiras CPs ficaram retidas as principais correlações existentes.

Durante a elaboração do trabalho foram encontradas algumas dificuldades. Uma delas é em relação à base de dados do QUALAR, que apresenta ausência de medição de algumas variáveis, isso implicou em muitos dados faltantes, gerando perdas de informações. O pior caso dessa situação é a cidade de Paulínia, onde há 42,94% de dados faltantes em relação à temperatura e 54,71% em relação à umidade relativa do ar, como observado na Figura 2. A Tabela 5 mostra o percentual de dados faltantes para todas as cidades.

Outra dificuldade foi relacionada à disponibilidade dos dados. Por exemplo, não foram encontrados dados pluviométricos das cidades estudadas na base do QUALAR (QUALAR, 2016). Na base do CIIAGRO (Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas) (CIIAGRO, 2019), os dados de total de chuvas para as cidades de Americana e Paulínia não estão disponíveis no período de 2010 a 2014. Tal variável poderia enriquecer mais o trabalho, já que, segundo a maior parte dos estudos pesquisados, a concentração de poluentes está diretamente vinculada com a pluviosidade.

Tabela 5: Porcentagem (%) de dados faltantes nos municípios estudados.

	Americana	Paulínia	Piracicaba	Jundiaí
VV	0,55	2,03	4,87	0,22
MP10	5,64	1,48	2,90	1,81
UR	0,05	54,71	16,81	11,28
TEMP	5,48	42,94	14,13	4,49

Fonte: Elaborada pelos autores, a partir de dados do Qualar (2016)

4 CONCLUSÃO

Este estudo procurou utilizar a Análise de Componentes Principais (ACP) para avaliar quais as relações mais relevantes entre variáveis meteorológicas (temperatura, velocidade do vento e umidade relativa) e o poluente atmosférico (material particulado inalável -MP10), em quatro cidades (Americana, Paulínia, Jundiaí e Piracicaba) do interior do estado de São Paulo (SP), Brasil. Conclui-se que a umidade relativa do ar, dentre as variáveis meteorológicas estudadas, é o que mais influencia no comportamento da concentração do material particulado inalável (MP10), resultado obtido em todas as quatro cidades do estudo. A velocidade do vento foi a segunda variável de maior influência na concentração do MP10. Além disso, tanto a umidade relativa, quanto a velocidade do vento, apresentaram relação inversamente proporcional à concentração do MP10. Por fim, a ACP possibilitou uma interpretação dos dados muito clara com um número reduzido de componentes, representando cerca de 90% da variabilidade de informações, demonstrando em cada componente a variável com maior influência.

As análises feitas neste trabalho podem ser usadas para um melhor entendimento da relação existente entre variáveis meteorológicas e poluentes do ar, propiciando uma informação valiosa no monitoramento ambiental. Outras variáveis poderiam ser incluídas nessa análise, enriquecendo ainda mais o estudo. Por exemplo, dados de precipitação pluviométrica seriam muito relevantes e outros poluentes atmosféricos, como ozônio, óxidos de nitrogênio, entre outros.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a CAPES e o CNPq pela concessão de bolsas de doutorado e iniciação científica, respectivamente. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento Superior de pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento - 001.

6 REFERÊNCIAS

BARROS, L. V. L. Avaliação da relação entre parâmetros meteorológicos e concentrações de material particulado inalável (MP10) no campus da UFSC. 2014. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

- BINAKU, K., SCHMELING, M. (2017) Multivariate statistical analyses of air pollutants and meteorology in Chicago during summers 2010-2012. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10, 1227- 1236. DOI: 10.1007/s11869-017-0507-7
- BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução CONAMA 491. (2018). Publicada no DOU, de 21 de novembro de 2018. Seção 01- páginas 155-156. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=740>.
- BRITO, P. H. F., ARAÚJO, R. S., SILVA, G. M. M. (2018) Composição química do material particulado atmosférico: uma revisão de literatura. *HOLOS*, 3, 62-74. DOI: 10.15628/holos.2018.4648.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. Série de Relatórios: Qualidade do ar no estado de São Paulo. São Paulo, (2010). 237 p.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. Série de Relatórios: Qualidade do ar no estado de São Paulo. São Paulo, (2011). 124 p.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. Série de Relatórios: Qualidade do ar no estado de São Paulo. São Paulo, (2012). 125 p.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. Série de Relatórios: Qualidade do ar no estado de São Paulo. São Paulo, (2013). 113 p.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. Série de Relatórios: Qualidade do ar no estado de São Paulo. São Paulo, (2014). 136 p.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. Série de Relatórios: Qualidade do ar no estado de São Paulo. São Paulo, (2016). 237 p.
- CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS - CIIAGRO. Resenha Agrometeorológica – quadro chuva mensal por período. Disponível em: <http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Quadros/QChuvaPeriodo.asp>. Acesso em: 21 Mai. 2019.
- CLEMENTE, D. A. Estudo do Impacto Ambiental das Fontes Industriais de Poluição do Ar no Município de Paulínia - S.P. Empregando o Modelo ISCST3. 2000. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.
- D'AMELIO, M. T. S., CAMPO, L. C. L., ALVIM, D. S. (2017) Estudo da Variabilidade do Monóxido de Carbono Atmosférico na Região Metropolitana de Campinas–SP e Comparação com São Paulo– SP. *Ensaio USF*, 1 (1), 80-90.
- DOMINICK, D., JUAHIR, H., LATIF, M. T., ZAIN, S. M., ARIS, A. Z. (2012) Spatial assessment of air quality patterns in Malaysia using multivariate analysis. *Atmospheric Environment*, 60, 172-181. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.021>
- FREITAS, C. U., PONDE DE LEON, A., JUGER, W., GOUVEIA, N. (2016) Poluição do ar e impactos na saúde em Vitória, Espírito Santo. *Revista de Saúde Pública*, 50 (4). DOI: 10.1590/S1518-8787.2016050005909

- GONÇALVES, C., FIGUEIREDO, B. R., ALVES, C. A., CARDOSO, A. A., VICENTE, A. M. (2017) Size-segregated aerosol chemical composition from an agro-industrial region of São Paulo state, Brazil. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10, 483-496. DOI: 10.1007/s11869-016-0441-0.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Panorama das cidades. (2018a) Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/panorama>. Acesso em: 23 Fev. 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Frota de 2016. (2018b) Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?lang=&coduf=35&search=sao-paulo>. Acesso em: 01 Fev. 2018.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. Anomalia de Temperaturas Médias Trimestrais (2019) Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/anomaliaTempMediaTrimestral>. Acesso em: 06 Mar. 2019.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. Queimadas: Monitoramento de focos (2019) Disponível em: http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas/v_anterior/indexold.html. Acesso em: 06 Mar. 2019.
- JOHNSON, R. A., WICHERN, D. W. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall., 1982, 594 p.
- KWON, S-B., JEONG, W., PARK, D., KIM, K-T., CHO, K. H. (2015) A multivariate study for characterizing particulate matter (PM10, PM2.5 and PM1) in Seoul metropolitan subway stations, Korea. *Journal of Hazardous Materials*, 297, 295-303. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jebiom.2015.04.005>
- LUNA, A. S., PAREDES, M. L. L., DE OLIVEIRA, G. C. G., CORRÊA, S. M. (2014) Prediction of ozone concentration in tropospheric levels using artificial neural networks and support vector machine at Rio de Janeiro, Brazil. *Atmospheric Environment*, 98, 98-104. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.060>
- MANLY, B. J. F. *Métodos Estatísticos Multivariados: Uma introdução*. Tradução: Sara Ianda Carmona. Bookman, Porto Alegre, 3. Ed. 2008, 229p.
- MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. *Estatística básica*. Saraiva, São Paulo, 7. ed. 2002, 540p.
- NICODEMOS, R. M.; JESUS, A. R. DE; FOUTOURA, R. S.; BARROZO, M. A. S. (2009) *Estudo da relação entre variáveis meteorológicas e concentração de MP10 no centro da cidade de Uberlândia-MG*. In: VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2009, Uberlândia. Anais...Uberlândia, 2009, 8 p.
- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. (2019) Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso em: 06 Mar. 2019.
- ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – OECD. OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction. OECD: 2012.

- OECD - ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. (2018) Disponível em: http://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=AIR_GHG#. Acesso em: 23 Fev. 2018.
- PINTO, W. P., REISEN, V. A., MONTE, E. Z. (2018) Previsão da concentração de material particulado inalável, na Região da Grande Vitória, ES, Brasil, utilizando o modelo SARIMAX. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 23 (2), 307-318. DOI: 10.1590/S1413-41522018168758
- QUALIDADE DO AR NO ESTADO DE SÃO PAULO - QUALAR. (2016) Disponível em: <<http://ar.cetesb.sp.gov.br/qualar/>>. Acesso em: 14 Abr. 2016.
- R CORE TEAM (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.
- REGAZZI, A. J. (2001) INF 766 - Análise multivariada. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Departamento de Informática, 2001. 166p. Apostila de disciplina.
- RIBEIRO JUNIOR, P. J. Introdução ao Ambiente Estatístico R. (2011). Disponível em: <<http://www.leg.ufpr.br/~paulojus/embrapa/Rembrapa/>>. Acesso em: 14 Mar. 2016.
- RODOPOULOU, S., SAMOLI, E., CHALBOT, M-C. G., KAVOURAS, I. G. (2015) Air pollution and cardiovascular and respiratory emergency visits in Central Arkansas: A time-series analysis. *Science of the Total Environment*, 536, 872-879. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.056>
- SÃO PAULO. Decreto Estadual n.º 59.113 de 23 de abril de 2013, Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, v. 132.
- SEINFELD, J. H. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. (S. N. Pandis, Coaut. de). New York, NY: John Wiley, 2nd ed. c2006, 1203p.
- SOUZA, A. M. Monitoração e ajuste de realimentação em processos produtivos multivariados. 2000. 179 f. Tese (Doutorado Engenharia de Produção) – Universidade Federal Santa Catarina, 2000.
- SOUZA, R. M. S., COELHO, G. P., SILVA, A. E. A., POZZA, S. A. (2015) Using Ensembles of Artificial Neural Networks to Improve PM10 Forecasts. *Chemical Engineering Transactions*, 43, 2161-2166. DOI: 10.3303/CET1543361
- SOUZA, A., SANTOS, D. A. S., ARISTONE, F., KOVAC-ANDRIC, E., MATASOVIC, B., PIRES, J. C., IKEFUTI, P. V. (2017) Impacto de fatores meteorológicos sobre as concentrações de ozônio modelados por análise de séries temporais e métodos estatísticos multivariados. *HOLOS*, 5, Ano 33. DOI: 10.15628/holos.2017.5033
- STATHEROPOULOS, M., VASSILIADIS, N., PAPPA, A. (1998) Principal Component and Canonical Correlation analysis for examining air pollution and meteorological data. *Atmospheric Environment*, 32 (6), 1087-1095.

VORMITTAG, E. M. P. A. A., COSTA, R. R., BRAGA, A. A., MIRANDA, M., NASCIMENTO, N. C., SALDIVA, P. H.N. (2016) Monitoramento da Qualidade do ar no Brasil. 2014. Disponível em: <<http://www.saudeesustentabilidade.org.br/site/wp-content/uploads/2014/07/Monitoramento-da-Qualidade-do-Ar-no-Brasil-2014.pdf>>. Acesso em: 06 Jul. 2016.

YNOUE, R., REBOITA, M. S., AMBRIZZI, T., SILVA, G. A. M. *Meteorologia: noções básicas*. São Paulo: Oficina de Textos, 2017, 179 p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. (2018) Ambient (outdoor) air quality and health. Geneva: WHO. Disponível em: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). Acesso em: 16 Mai. 2019.