



**XVII ENANPUR**

SÃO PAULO • 2017



## **Forma Urbana e Qualidade do Ar: o caso do Rio de Janeiro**

**Urban Form and Air Quality: the case of Rio de Janeiro**

*Juliana L. M. Maia, Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
juliana.musarq@gmail.com*

*Vinicius M. Netto, Universidade Federal Fluminense,  
v1n1netto@yahoo.co.uk*

*José F. Oliveira Júnior, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro,  
joliveirajunior@gmail.com*

*Givanildo Goes, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro,  
givanildogois@gmail.com*

## RESUMO

Considerando a importância das cidades como fontes emissoras de poluentes atmosféricos e centros de grande aglutinação populacional, o trabalho investiga possíveis impactos de aspectos da forma urbana nas concentrações de poluentes. Sabendo-se que esta é uma área ainda incipiente dos estudos urbanos, a pesquisa buscou uma abordagem panorâmica do problema que pudesse indicar o potencial do campo e abrir novas discussões através de uma revisão teórica e um estudo de caso na cidade do Rio de Janeiro (CRJ). A investigação discute o estado da arte sobre as interações entre a poluição, elementos naturais e condições climáticas e a literatura que aborda as interações entre a qualidade do ar e indicadores da forma urbana. Também revisa indicadores de estudos morfológicos no que se refere a sua precisão de análise da tridimensionalidade da forma urbana e aponta a taxa de ocupação como fator de interesse para a investigação. Aproxima-se então do objeto de estudo e expõe, de maneira crítica, o tratamento da questão da qualidade do ar na Cidade do Rio de Janeiro (CRJ). O artigo sugere uma forma de modelagem e avaliação dessas relações, e apresenta, por fim, um estudo de caso na cidade do Rio de Janeiro, envolvendo métodos estatísticos aplicados a poluentes (SO<sub>2</sub>, CO e PI), variáveis morfológicas (taxa de ocupação e percentagem de verticalização) e meteorológicas (vento – direção e velocidade -, precipitação pluvial e temperatura do ar). Os resultados apontam a relevância e graus de influência das variáveis taxa de ocupação e verticalização na concentração dos poluentes considerados.

**Palavras chave:** morfologia; poluição; desempenho; forma urbana; qualidade do ar.

## ABSTRACT

Considering the importance of cities as pollutant sources and hubs of population, the work researches possible impacts of the urban form aspects on pollutants concentrations. In view of the incipient state of this area in Urban Studies, the research chose a panoramic view of the problem, which was capable of indicating the field's potential and to open new discussions through a literature review and a case study in Rio de Janeiro city (RJC). The paper discusses the state of art on interactions between pollution, natural elements and climate conditions and the literature on the relations between air quality and urban form indexes. Also reviews urban form indexes in what refers to its accuracy in analysing the tridimensionality of the form, pointing to ground space index as a factor of interest to the investigation. Getting close to the case study, it shows, in a critical way, the treatment of the air quality issue in Rio de Janeiro City. It's then suggested a way of modeling and testing these relations and presented a case study in Rio de Janeiro city, involving statistical methods applied to pollutants (SO<sub>2</sub>, CO e PI), morphological variables (ground space index and verticalization) and meteorological factors (wind – direction and speed -, rainfall and air temperature). Results point to grades of influence of the ground space index and verticalization on concentrations on considered pollutants concentrations.

**Key words:** morphology; pollution; urban performance; urban form; air quality.

## INTRODUÇÃO

A atividade humana e sua concentração em formas de urbanização têm sido associadas a um progressivo aumento da degradação do meio ambiente. Dentre fatores de degradação, a poluição atmosférica e a qualidade do ar tem tido posição de destaque, dado seu poder de atingir grandes parcelas da população e o meio ambiente (Castro et al., 2003). Considerando a importância das cidades como fontes emissoras de poluentes e polos de concentração de população, este trabalho investiga possíveis impactos da forma urbana nas concentrações de poluentes. Essencialmente, argumentaremos que (i) diferenças de *padrões de urbanização* referentes a formas de ocupação e verticalização, usualmente associados a (ii) fatores comportamentais humanos, como a intensidade de uso de automóveis particulares, e em interação com (iii) *vetores ambientais* tais como o regime de chuvas e ventos, a temperatura e a posição geográfica em relação ao relevo e à hidrografia, poderão impactar (iv) a concentração de poluentes (SO<sub>2</sub>, CO e PI) e, conseqüentemente, a *qualidade do ar* (figura 1).



Figura 1 – Hipótese das relações entre fatores espaciais, comportamentais, ambientais e a qualidade do ar. Fonte: Maia, 2016.

A investigação do desempenho ambiental da forma urbana parte da compreensão de que os poluentes fazem parte de ciclos naturais que sofrem interações com outros compostos, elementos naturais e condições climáticas, provocando impactos no ambiente e na saúde dos seres humanos, animais e vegetais. Reuniremos alguns dos principais estudos que tratam dessas interações, apontando para a carência de investigações empíricas que identifiquem com precisão possíveis influências de aspectos da forma urbana nos níveis de poluição – sobretudo no que tange aos aspectos espaciais.

Procuramos atender a essas carências, buscando nos estudos teóricos da forma urbana aspectos mais precisos para a análise do desempenho ambiental da forma urbana. São identificados os indicadores mais frequentemente utilizados e a tendência de redução da forma à sua densidade e bidimensionalidade. A partir dessa constatação, compara-se um fator mais preciso de caracterização da forma, o índice de compacidade 3D, com outras variáveis descritivas, permitindo a escolha do fator de taxa de ocupação como suficientemente preciso para representar as complexidades da forma urbana.

Tendo chegado a um elemento acurado de descrição da forma urbana, o artigo passa a lidar com variáveis de natureza ambiental. Faz uma proposição metodológica envolvendo métodos estatísticos para tratar o problema da relação entre morfologia e qualidade do ar e a aplica em um estudo de caso na cidade do Rio de Janeiro (CRJ). Os resultados apontam para graus distintos de

influência das variáveis taxa de ocupação e verticalização na concentração dos contaminantes analisados.

## A POLUIÇÃO DO AR E SEUS IMPACTOS

Os compostos poluentes se inserem em processos que fazem parte de ciclos naturais. Dentre os principais, destacam-se o Ciclo do Carbono e o do Enxofre, cujos elementos se relacionam intimamente com os poluentes tratados neste trabalho (SO<sub>2</sub>, CO e PI)<sup>1</sup>.

A atividade antrópica vem interferindo no ciclo do Carbono (C) desde o início da Revolução Industrial, quando passou a queimar combustíveis fósseis em grande escala. Como o ciclo natural já envolve uma mobilização de carbono muito grande, parte da liberação antrópica consegue ser absorvida. Mas, a constante emissão humana gerou uma tendência de crescimento desse elemento em longo prazo (Adler e Tanner, 2015), trazendo consequências.

Um dos compostos emitidos é o gás carbônico (CO<sub>2</sub>), um dos responsáveis pelo chamado *efeito estufa*. O aumento da concentração desse componente pode provocar um aumento da temperatura planetária, podendo causar mudanças climáticas, alterações no processo de desertificação; redução da Camada de Ozônio, entre outros efeitos (Pires, 2005). Outro composto lançado em excesso é o monóxido de carbono (CO). Esse gás, produzido principalmente pela combustão dos automóveis (90%), pode chegar a um nível 100 vezes maior nas cidades do que nas áreas circundantes, e é encontrado em concentrações muito mais altas em lugares fechados, como túneis. Quando inalado em grande quantidade, ele diminui drasticamente a oxigenação dos órgãos e tecidos e pode provocar a morte (Castro et al., 2003; Adler e Tanner, 2015 ver em Maia, 2016).

Um segundo ciclo de interesse é o do enxofre. A presença humana interfere nesse ciclo a partir da queima de combustíveis fósseis e do refino de minérios, da poeira da agricultura e da pecuária, entre outros (Galloway, 1996). Apesar da maioria desses processos acontecerem fora dos limites urbanos, a combustão aumenta o nível de enxofre nos solos também da cidade (Simon, 2001), gerando dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>). Sua inalação excessiva pode causar irritação da mucosa respiratória, levando a inflamação, hemorragia e necrose; doenças cardíacas e pulmonares (Horstman et al., 1982; Adler e Tanner, 2015). Quando em estado suspenso (sulfato particulado), ainda contribui para a diminuição da visibilidade (Pires, 2005; Martins et al., 2003). Sua interação com outros compostos atmosféricos também gera o ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), componente da chuva ácida que corrói metais, danifica tecidos e pinturas.

Os efeitos da poluição têm sido sentidos desde a escala local até a global, evidenciando a dimensão do problema. Isso acontece porque, normalmente ao serem emitidos, os poluentes se misturam com um grande volume de ar (GERJ, 2015). A partir daí, o seu destino e velocidade de dispersão passam a se relacionar com fatores como a *topografia local*, as *condições atmosféricas* e *meteorológicas*, que ajudam a moldar os padrões de vento e a remover da atmosfera determinados poluentes (Frank et al., 2006). As condições meteorológicas, por sua vez, são especialmente importantes tanto pelas alterações na pressão atmosférica, que modificam as condições dos ventos, fundamentais para dispersão dos poluentes, quanto em função das chuvas que ajudam na sua deposição. Nas cidades, onde a emissão de poluentes é associada à densidade

---

<sup>1</sup> Para saber mais sobre os ciclos naturais ver Adler e Tanner, 2015.

populacional, situações meteorológicas desfavoráveis podem provocar a concentração dos poluentes (Duchiade, 1992).

## CIDADE, CLIMA E POLUIÇÃO

Um dos principais fatores meteorológicos responsáveis pela qualidade do ar nas cidades é o vento. Ele é responsável pela diluição e transporte dos contaminantes atmosféricos e o faz através dos mecanismos de turbulência e de movimentos de ar horizontais e verticais na atmosfera. (Graedel e Crutzel, 1997). Nas áreas urbanas, seu padrão natural tende a ser alterado, pois as edificações ora se encontram em posições contrárias a seus movimentos horizontais, diminuindo sua velocidade (Landsberg, 1997) e alterando sua direção, ora favorecem a ocorrência de fenômenos que alteram as dinâmicas de seus movimentos verticais. Segundo Robaa (2003), essas alterações tendem a diminuir a velocidade média do vento nas cidades. Com essa redução, a transferência térmica das edificações para o meio tende a ser menor, o que dificulta o transporte dos poluentes para fora das áreas urbanas (ver Adler e Tanner, 2015).

Essa característica da ventilação nas cidades pode ser ainda agravada quando as situações meteorológicas não se encontram favoráveis e ocorrem situações de *calmaria* (Graedel e Crutzel, 1997) e *inversão térmica* (Duchiade, 1992), que provocam o conhecido *smog* (ver Maia, 2016). Os contaminantes retidos na baixa atmosfera podem aderir às superfícies ou ser incorporados à umidade e à chuva. Quando agregados à umidade, são retirados da atmosfera pela ação da gravidade (INEA, 2015), quando assimilados à precipitação, formam a *chuva ácida*. Esses eventos são fenômenos climáticos naturais que se intensificam no meio urbano devido, principalmente, à disposição dos edifícios e ao volume de poluentes emitidos nessas áreas.

Há, porém, um fenômeno típico das áreas urbanas: a ilha de calor (Adler e Tanner, 2015). Esse evento, caracterizado pela desigualdade térmica entre áreas urbanas e não urbanas, é atribuído aos efeitos do ambiente construído (Oke, 1987). Uma das principais causas dessa modificação climática são o elevado adensamento construtivo e as atividades produtoras de calor e poluição, como os meios de transporte e as indústrias. Quando sob as condições desse evento, o ar, muitas vezes, se insere num ciclo de circulação entre a cidade e a periferia urbana que cria uma célula, onde o ar fica aprisionado e a poluição concentrada. Este efeito recebe o nome de *domo urbano de poeira* (Adler e Tanner, 2015).

No que se refere à interação dos fenômenos climáticos com os níveis de poluentes e o ambiente urbano, observa-se que, apesar de alguns estudos teóricos sugerirem a *influência de características da forma urbana no clima e do clima nos níveis poluição*, os estudos empíricos disponíveis não parecem estabelecer a relação de características da forma com a poluição de modo direto. A maior parte dos estudos se concentra na área de investigação dos efeitos do clima associados ao conforto térmico; dos fenômenos associados à termodinâmica; e das trocas de ar no cânion urbano (Maia, 2016).

Estudos que abordam os efeitos da termodinâmica das edificações sobre a atmosfera de modo mais abrangente, discutem a questão sem incluir os tipos de forma. Podemos observar isso, por exemplo, em Landsberg (1997) e García (1996). Estas pesquisas observam diferenças térmicas e de ventilação do ambiente urbano para os não urbanos sem, no entanto, atrelar essas variações a nenhum aspecto formal específico observado empiricamente.

Alguns estudos que abarcam o chamado *cânion urbano*, costumam fazer uso de modelagem como os trabalhos de Baik e Kim (2002) e Carslaw (2005). O problema da utilização desses modelos é que, muitas vezes, são considerados cânions *idealizados*, o que por si já exclui a discussão dos diversos tipos de cânion. Não parece ser aberta também a discussão do *comportamento dos ventos em outros tipos de forma urbana* menos verticais e mais ou menos densas.

Um dos primeiros trabalhos que relacionam a forma urbana e o uso de combustível fóssil é o de Newman et Kenworthy (1989). Mais recentemente, Echenique et al. (2012) e Ewing e Cervero (2001, 2010) também fizeram uma pesquisa. Seus achados apontam para uma redução do uso do automóvel com o aumento da densidade. Correlacionando aspectos da forma urbana com as emissões de CO<sub>2</sub>, Salat (2009) também aponta que a morfologia urbana tem um forte potencial para reduzir os consumos de energia e as emissões de gases efeito de estufa.

A maior parte dos estudos nesse campo relacionam as viagens de automóvel e a matriz energética com os níveis de poluição, mas *não incluem poluentes entre suas variáveis empíricas*. Ainda, a discussão da forma tende a se focar no nível de compacidade bidimensional do tecido construído, não considerando fatores como a verticalização, o percentual de ocupação do solo, a porosidade ao vento do tecido, etc.

Na literatura do tema, três trabalhos se aproximaram da relação entre a forma urbana e a poluição: Adolphe (2001) considera que diferentes configurações da forma urbana sejam capazes de alterar fluxos relacionados ao clima, alterando tanto o microclima interno como o externo às edificações; e que cada configuração modifica esses fluxos de maneira diferente – mas não realiza avaliação classificatória que indique qual configuração teria o melhor desempenho e nem o quanto cada aspecto da forma poderia importar, como sua densidade, tamanho das edificações, continuidade de fachadas etc.

Frank et al. (2006) buscam associações entre a facilidade que o bairro oferece para viagens a pé (caminhabilidade) e a qualidade do ar, através modelos de regressões lineares e encontraram que a caminhabilidade impacta as milhas viajadas por veículo e explica variabilidade de parte das emissões de Óxidos de Nitrogênio (NOx) e Compostos Orgânicos Voláteis (COV). Em outras pesquisas os autores já haviam encontrado *correlações positivas entre as milhas viajadas de veículo per capita e as emissões per capita* de NOx e COV (FRANK, STONE et BACHMAN, 2000); bem como *correlações negativas entre o uso misto do solo, densidades altas e maior conectividade de ruas com emissões* de NOx e COV (FRANK et ENGELKE, 2005; FRANK et al., 2000; FRUMKIN et al., 2004). Essas pesquisas não associam aspectos da forma com a poluição diretamente. Entretanto, SABOYA et al. (2015) revelaram uma associação entre uso pedestre e tipos arquitetônicos, apontando para a forma urbana mais contínua e compacta como associada positivamente ao movimento de pedestres. Similarmente, o estudo de Larrañaga et al. (2009; 2010) mostra que o alto número de deslocamentos a pé se deve à *diversidade de uso do solo* e à *dificuldade de utilizar modos alternativos*. Essas associações sugerem uma relação entre padrões da morfologia e indução à dependência do uso veicular e, portanto, com emissões de COV e NOx.

Finalmente, Pan et al. (2010) desenvolveram um estudo estatístico visando investigar a influência de *variáveis meteorológicas e variáveis relacionadas ao tráfego nas concentrações de Partículas Inaláveis<sup>2</sup>* (PM<sub>2,5</sub>) em ambientes construídos. Seus resultados indicam que a altura pode influenciar

<sup>2</sup> As partículas inaláveis são partículas sólidas suspensas no ar com diâmetro menor que 10mm (MP<sub>10</sub>) e menor que 2,5mm (MP<sub>2,5</sub>) que, quando inaladas, podem carrear poluentes tóxicos para partes profundas do aparelho respiratório e aumentar a mortalidade em geral (CASTRO et al., 2003; CAVALCANTI, 2003; MARTIN E BRADLEY, 1960; SHUMWAY et al., 1988).

na velocidade do vento e, conseqüentemente, na dispersão dos poluentes no tecido urbano. Apesar desse estudo ter considerando a influência da morfologia na dispersão dos poluentes, não incluiu variáveis morfológicas entre as variáveis preditivas da poluição.

Percebemos que o campo de investigação apresenta algumas contribuições relevantes, mas seu estado da arte sugere que ainda há muito a ser explorado – especialmente no que se refere à influência dos diferentes tipos de forma urbana e aspectos morfológicos. Vejamos como a literatura tem lidado com o problema do desempenho da forma urbana.

## FATORES DE DESCRIÇÃO DA FORMA URBANA

O debate em torno do desempenho da forma urbana e seus arquétipos incluem abordagens quantitativas aos padrões de ocupação do solo. Entre os pioneiros está o mencionado clássico de Newman e Kenworthy (1989), associando o desempenho da forma urbana em relação ao consumo de energia através da densidade. O indicador segue utilizado no presente, como em Sorensen (2009) e Chakrabarti (2013), entretanto, hoje a literatura oferece um leque extenso de indicadores de características da forma urbana e de certos aspectos de seu desempenho (Quadro 1).

TRABALHO	VARIÁVEIS QUE ANALISA
Galster et al (2001)	Densidade; Centralidade; Proximidade; Nuclearidade; Continuidade; Concentração; Aglomeração; e mistura de usos.
Tsai (2005)	Tamanho metropolitano, Densidade, Grau de distribuição e Grau de agrupamento.
Huang, Lu e Sellers (2007)	Densidade; Compacidade; Complexidade; Centralidade; e Porosidade.
Ojima (2007)	Densidade; Fragmentação; Linearidade; Integração/ Centralidade.
Torrens (2008)	42 variáveis associadas ao Desenvolvimento Urbano; Densidade; Características Sociais; Dinâmicas dos espaços; Fragmentação; Descentralização; e acessibilidade.
Berghauser Pont e Haupt (2009)	Índice de Aproveitamento, Taxa de Ocupação e Número de Pavimentos Índice de Espaços Abertos Densidade da Rede Largura (média) das ruas (b) e das quadras.
Frenkel e Ashkenazi (2008)	Configuração (densidade; irregularidade da forma; fragmentação); Composição (usos)
Ribeiro (2009)	Índice de dispersão; integração; densidade viária; ociosidade per capita.
Salvação (2012)	Índice de percentagem de ocupação urbana; número de manchas por km <sup>2</sup> ; Índice de centralidade média; compacidade média; dimensão fractal média; proximidade média.
Paim e Faria (2014)	Índice de compacidade; Medida de compacidade urbana; Indicador de continuidade.

*Quadro 1 - Fatores da forma urbana em abordagens recentes. Fonte: Maia, 2016.*

A redução da forma à sua densidade tem sido uma característica comum entre os indicadores disponíveis na literatura. Surpreendentemente, a compacidade, a fragmentação ou a dispersão materializada na terceira dimensão não aparecem problematizadas por essas abordagens. Outros indicadores de compacidade gerados por medidas fractais também se relacionam à forma bidimensional urbana. Indicadores de densidade, por sua vez, tendem a basear-se em medidas populacionais ou em taxas de densidade construída que passam a guardar pouca relação com a forma urbana em sua configuração tridimensional, arquitetônica.

Reconhecida a utilidade geral desse indicador no entendimento de processos urbanos, observa-se que ele apresenta severa limitação para representar a totalidade da forma. A Figura 2 ilustra esse argumento, ao trazer dois quarteirões com configurações absolutamente distintas e que, no entanto, possuem a mesma densidade.

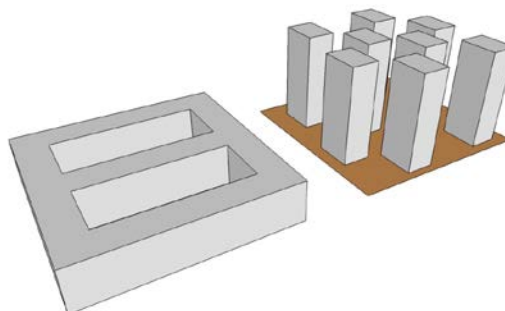


Figura 2 – Arquétipos de quarteirões com mesma densidade e configurações distintas. Fonte: Maia e Netto, 2016.

Observando isso, Maia e Netto (2016) propõem um Índice de Compacidade que seria capaz de captar a terceira dimensão da forma urbana. Utilizando um amplo banco de dados, fazem uma série de testes estatísticos demonstrando a utilidade deste fator e seu grau de similaridade com outros indicadores de desempenho urbano. Os resultados apontam uma forte correlação (0,967) entre a compacidade 3D e a taxa de ocupação (TO), sugerindo a possibilidade de utilização de dados de TO como *proxy* para a compacidade urbana: quando o TO sobe, a compacidade 3D tende fortemente a subir; a queda de TO seria um indicador suficiente também para descrever a dispersão e fragmentação tridimensional.

Baseados nessa constatação, buscamos um banco de dados com essa variável espacial passível de uso em estudo de caso. Classificamos os dados morfológicos com base em um banco de dados público do Grupo SEL-RJ feito a partir de técnicas de fotointerpretação (ver Tângari et al., 2011). O banco oferece informações para todas as quadras da cidade a respeito da incidência percentual de verticalização e de espaços livres (públicos e privados) intraquadra e apresenta um estudo de tipomorfologia de quadra para a cidade do Rio de Janeiro. A existência desses dados facilitou consideravelmente o cálculo das taxas de ocupação das quadras. De posse deste banco de dados de variáveis espaciais, partimos para o banco de dados de variáveis ambientais e de qualidade do ar.

## FATORES DE QUALIDADE DO AR NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

No Rio de Janeiro, três órgãos públicos dispõem de uma rede de estações meteorológicas que incluem aferição de poluentes e ajudam a fazer o controle e a classificação da qualidade do ar na cidade. São eles: o Instituto Estadual do Ambiente (INEA), a Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMAC) e o Instituto de Meteorologia (INMET).

Um dos instrumentos que auxilia esses órgãos a fazerem o monitoramento é o inventário de fontes de emissão de poluição atmosférica feito em 2004, pela FEEMA para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). Ele identificou que as fontes fixas são responsáveis especialmente pela emissão de SO<sub>2</sub> (88%). Já as fontes móveis contribuem, principalmente, com as emissões de NO<sub>x</sub> (67%), CO (98%) e hidrocarbonetos (HC – 67%). Em relação às partículas inaláveis (MP<sub>10</sub>), é possível observar que há uma distribuição mais equilibrada, mesmo que as fontes fixas tenham um peso maior. O relatório estima que na RMRJ as fontes móveis sejam as principais responsáveis (77%) pelo total de poluentes emitidos.



O relevo acidentado também influencia na climatologia, criando divisores microclimáticos. Ainda devem ser ponderadas as características do clima tropical onde a região se insere, com intensa *radiação solar* e *temperaturas elevadas*, que favorecem os processos fotoquímicos, assim como outras reações que geram poluentes potencialmente nocivos à saúde (Carvalho et al., 2002).

Considerando a importância da ventilação na diluição e dispersão dos poluentes, Pimentel et al. (2014) definem o regime de vento na cidade do Rio de Janeiro baseado em três setores conformados a partir da topografia (Oeste, Centro-Sul e Leste) e em dados de algumas dessas estações. Os autores identificaram ventos formados pelas brisas marítimas e terrestres no contorno da costa nas Regiões Oeste e Centro-Sul; na região Centro-Sul a predominância dos ventos nas direções norte-sul; e observam um efeito de canalização do vento pela Baía de Guanabara na Região Leste. Maia (2005) indica a posição desfavorável dos maciços da Tijuca e da Pedra Branca, paralelos à orla marítima, atuando como barreiras físicas aos ventos predominantes do mar. Constata ainda que a qualidade do ar tende a melhorar nos meses de verão, quando a chuva e os ventos promovem uma eficiente remoção dos contaminantes atmosféricos.

Observando a utilização frequente de modelos de simulação atmosférica em estudos da qualidade do ar, Farias (2013) examina a influência do relevo na ventilação em diferentes localidades da RMRJ através de uma comparação da dispersão de poluentes. Ele conclui que a posição e a orientação do relevo têm grande influência na circulação dos ventos e na dispersão ou concentração dos poluentes em algumas áreas da RMRJ.

A análise da literatura evidencia uma carência de estudos relativos à climatologia urbana que subsidiem os estudos de qualidade do ar na RMRJ. Parece haver um interesse maior pelo regime de ventos e as influências do relevo. Durante o período de pesquisa foi possível identificar apenas um estudo para além desse caráter. Albuquerque (2014) analisa a influência da morfologia urbana e das diferentes formas de ocupação do solo no comportamento microclimático. Ela encontra relações entre áreas com os maiores índices construtivos e/ou com menores percentuais de cobertura vegetal e suas temperaturas e umidade relativa. Não obstante, a autora não faz associações desses achados com a poluição atmosférica.

Tendo identificado a insuficiência de estudos que tratem empiricamente das interações da forma urbana com a qualidade do ar, tanto no contexto internacional quanto no Brasil, realizamos um estudo de caso para a cidade do Rio de Janeiro (CRJ). Com base no inventário da FEEMA (2004) foi selecionado o SO<sub>2</sub>, como um indicador das fontes fixas; o CO, para refletir as fontes móveis; e as PI, como *proxy* dos dois. As variáveis meteorológicas (chuva, vento e temperatura) foram selecionadas tendo em vista sua influência na qualidade do ar, como citado anteriormente.

Realizamos então um exame estatístico relacionando os poluentes (SO<sub>2</sub>, CO e PI) e as variáveis morfológicas (taxa de ocupação e verticalização) e meteorológicas (vento – direção e velocidade -, precipitação pluvial e temperatura do ar). Os dados ambientais foram disponibilizados pela SMAC. Essas informações coletadas por estações meteorológicas localizadas em diferentes áreas da cidade foram compiladas pela presente pesquisa e organizadas em uma base de dados ambientais na forma de uma série histórica. Foram selecionados os anos de 2012, 2013 e 2014, para os quais havia a maior quantidade de estações com dados disponíveis para análise, num total de 7 estações: Bangu (SMAC), Campo Grande (SMAC), Copacabana (SMAC), Irajá (SMAC), Pedra de Guaratiba (SMAC) São Cristóvão (SMAC) e Tijuca (SMAC) (Figura 3).<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Para mais detalhes ver Maia (2016).

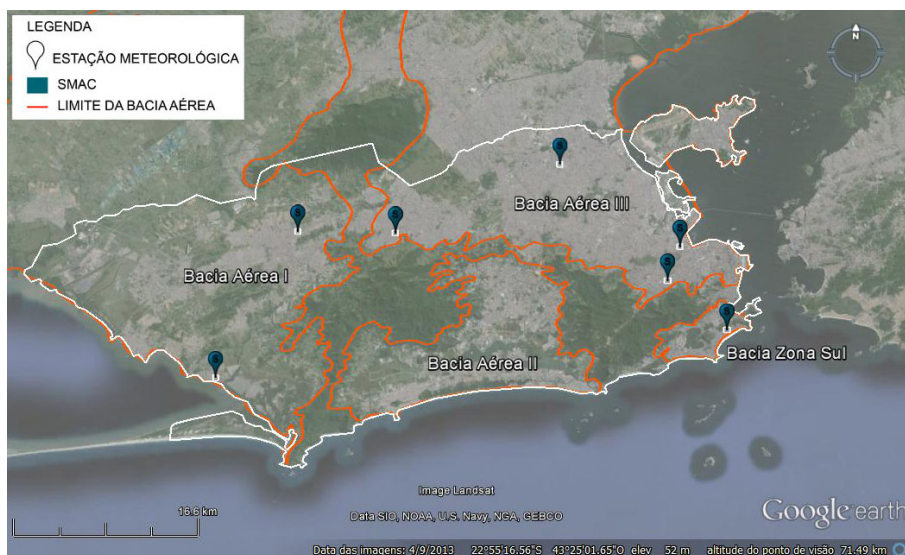


Figura 3 - Localização das Estações Meteorológicas analisadas. Fonte: Elaborado pelos autores com base em imagem do Google Earth 2013.

Utilizando a localização espacial das estações meteorológicas, as áreas para análise foram definidas em recortes de 500 x 500m no entorno das estações (Figura 4).

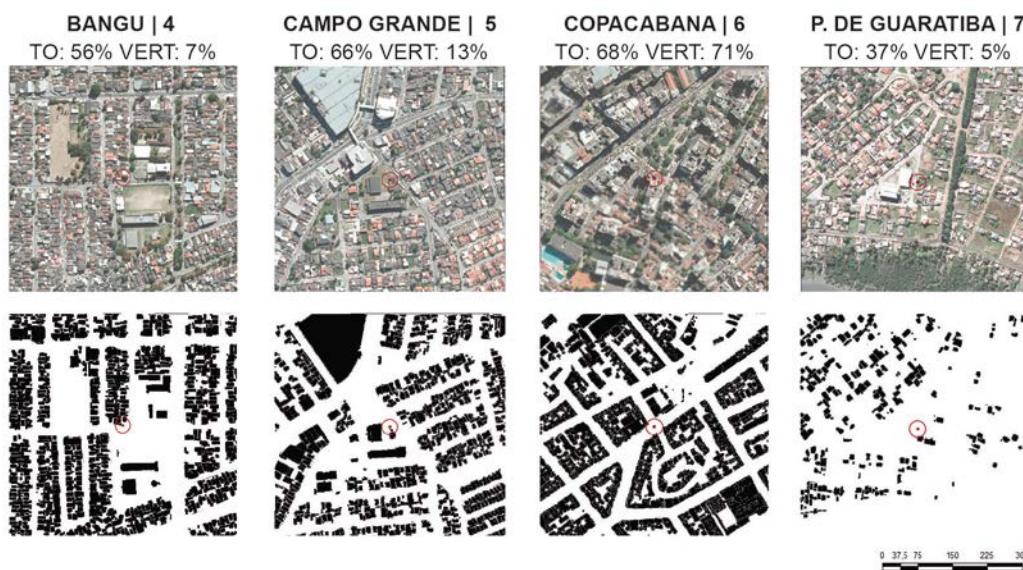


Figura 4 – Principais janelas morfológicas no entorno das estações Meteorológicas analisadas. Fonte: Elaborado pelos autores com base em imagem do Google Earth 2013.

Cientes da importância do clima para a qualidade do ar, apresentamos uma análise simplificada dos anos estudados numa comparação entre si e em relação às normais climatológicas da CRJ, fornecidas pelo INMET. A **temperatura do ar** média dos 3 anos estudados (Gráfico 1) indica um comportamento similar entre eles e, em todos os casos, acima do valor normal (de 1,1°C a 2,5°C para mais). Na escala mensal, o comportamento da temperatura do ar nos anos estudados foi similar, tendo apresentado mais regularidade no que se refere ao comportamento anual. As

médias anuais, entretanto, são mais parecidas nos anos de 2012 (25,39°C) e 2014 (25,36°C), tendo sido 2013 um ano de temperatura mais baixa (24,9°C).

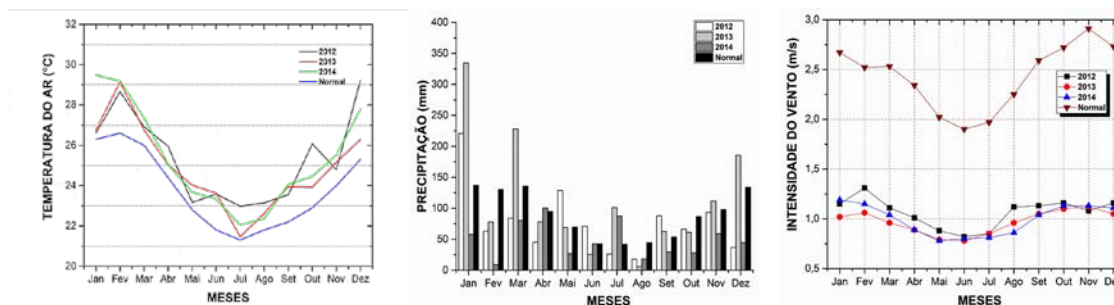


Gráfico 1 - Temperaturas médias (°C), precipitação média acumulada (mm) e intensidade do vento (m/s): comparação 2012-2014. Fonte: Maia, 2016.

O confronto da **precipitação pluvial** acumulada mostra que os anos foram atípicos, com distribuição da curva pluviométrica bastante alternada. Isso se deve a influência de vários sistemas produtores de chuva de característica regional e local que atuam na CRJ. Em 2014, o ano foi seco (585 mm anual) em comparação aos demais, tendo sido considerado muito seco pelo INMET (2015), seguido por 2012 (941,1mm anual), que também foi considerado um ano seco (INMET, 2015). Dentre eles, 2013 foi o único no qual choveu acima do esperado (1341 mm anual – 272mm a mais), tendo sido considerado um ano normal (INMET, 2015). A análise do **vento** revela que, tanto 2012, como 2013 e 2014 tiveram velocidades muito abaixo do esperado (menos de 50%), tendo sido o ano de 2012 o que mais ventou (média de 1,07m/s), seguido do ano de 2014 (média de 0,99m/s) e 2013 (média de 0,97m/s).

## ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As análises de correlação para o ano de **2012** revelaram a influência dos parâmetros morfológicos na concentração dos poluentes para os casos estudados. Dentre todas as variáveis, o percentual de verticalização teve as correlações mais altas em relação ao SO<sub>2</sub> (0,40) e ao CO (-0,46) e PI (0,33). Tendo em vista a natureza das fontes emissoras desses poluentes, sugerimos a possibilidade das morfologias mais verticalizadas estarem associadas a um menor uso de automóvel, o que explicaria a redução de CO, mas que elas dificultem os movimentos de ar que ajudariam na dispersão do PI e do SO<sub>2</sub>. A taxa de ocupação foi associada ao incremento na concentração de PI (0,25) e a uma redução do SO<sub>2</sub>(-0,39). Há uma possível dificuldade de dispersão do PI causado pelo aumento da taxa de ocupação na ventilação; o aumento do SO<sub>2</sub> com a redução da taxa de ocupação pode se dever à localização de indústrias em áreas menos ocupadas.

Em relação aos parâmetros ambientais, foi identificada uma correlação negativa dos poluentes com a chuva, confirmando sua atuação como agente de deposição dos poluentes, observada na literatura. Essa correlação, porém, foi fraca ou muito fraca, provavelmente, devido ao baixo índice pluviométrico registrado em 2012. O aumento da temperatura foi associado à redução dos poluentes CO (-0,27) e PI (-0,13) e a um incremento de SO<sub>2</sub> (-0,13) o que indica uma possível atuação da temperatura favorecendo os movimentos ascendentes que ajudam na dispersão dos poluentes em áreas mais verticalizadas, onde normalmente, se concentram CO e PI, e auxiliando na criação de um domo de poeira nas áreas menos ocupadas, onde é mais encontrado o SO<sub>2</sub>.

2012	SO <sub>2</sub>	CO	PI
CHUVA	-0,31	0,08	-0,16
TEMP	0,32	-0,27	-0,13
TO	-0,39	-0,04	0,25
VERT	0,40	-0,46	0,33

Tabela 1 - Análises de Correlação de Pearson 2012.

2012	SO <sub>2</sub> [R <sup>2</sup> 38,6%]			CO [R <sup>2</sup> 38,4%]			PI [R <sup>2</sup> 20,6%]		
	Coef.	Erro Padrão	Pr(> t )	Coef.	Erro Padrão	Pr(> t )	Coef.	Erro Padrão	Pr(> t )
CHUVA	-7,0008	3,6855	0,0618	-0,0705	0,1364	0,6069	-0,0266	0,0321	0,4099
TEMP	0,3799	0,1389	0,0079	-0,0214	0,0051	8,87E <sup>-05</sup>	-0,0301	0,2447	0,9023
TO	-0,4376	0,1968	0,0296	-0,0171	0,0072	0,021873	0,2136	0,0925	0,0241
VERT	0,4710	0,1315	0,0006	-0,0269	0,0048	5,82E <sup>-07</sup>	0,1374	0,0459	0,0039

Tabela 2 - Análises de Regressão 2012

As análises de regressão confirmaram o papel explicativo dos parâmetros morfológicos na variação de todos poluentes, da temperatura para SO<sub>2</sub> e PI e a insignificância da atuação da chuva na remoção dos poluentes esse ano. Os modelos foram capazes de explicar 38,6% da concentração de SO<sub>2</sub>, 38,4% da concentração de CO e 20,6% da concentração de PI.

Em 2013, a taxa de ocupação apresentou uma correlação moderada com o SO<sub>2</sub> (-0,44), e muito fraca com o CO (-0,11) e PI (0,12). No primeiro caso, levantou-se a possibilidade da correlação negativa ser reflexo da localização das indústrias, sua principal fonte emissora. Já no segundo, as áreas mais ocupadas podem ter desencorajado, ainda que de maneira sutil, a utilização do automóvel. No terceiro caso, o leve aumento do poluente pode ser associado à dificuldade de circulação dos ventos em áreas com solo mais ocupado. A variável verticalização apresentou uma correlação positiva com todos os poluentes, tendo sido uma correlação moderada com o SO<sub>2</sub> (0,37), baixa com PI (0,21) e desprezível com CO (0,05). Em todos os casos, o aumento da concentração de poluentes indica que a verticalização pode estar dificultando a ventilação.

2013	SO <sub>2</sub>	CO	PI
CHUVA	-0,26	-0,16	-0,45
TEMP	0,08	-0,07	-0,15
TO	-0,44	-0,11	0,12
VERT	0,37	0,05	0,21

Tabela 3 - Análises de Correlação de Pearson 2013

2013	SO <sub>2</sub> – R <sup>2</sup> 21,5%			CO – R <sup>2</sup> 7,8%			PI – R <sup>2</sup> 23,3%		
	Coef.	Erro Padrão	Pr(> t )	Coef.	Erro Padrão	Pr(> t )	Coef.	Erro Padrão	Pr(> t )
CHUVA	-0,1267	0,0714	0,0807	-0,0582	0,0524	0,2708	-22,0538	5,9873	0,0005
TEMP	-1,3910	1,0088	0,1725	-0,4081	0,7062	0,5653	0,2493	0,3345	0,4588
TO	-1,2649	0,3654	0,0009	-0,4552	0,2691	0,0954	0,4712	0,3278	0,1553
VERT	-	-	-	-0,1552	0,0975	0,1163	0,1837	0,2758	0,5078

Tabela 4 - Análises de Regressão 2013

As análises de regressão indicaram que, apesar das correlações existirem, dentro dos parâmetros selecionados, nenhum foi capaz de explicar a variação de CO. A chuva foi a única capaz de explicar a variação de PI e a taxa de ocupação e a verticalização foram as únicas capazes de explicar a variação de SO<sub>2</sub>, tendo sido a taxa de ocupação mais relevante. Os modelos foram capazes de explicar 21,5% da concentração de SO<sub>2</sub>, 7,8% da concentração de CO e 23,3% da concentração de PI.

Em **2014**, os parâmetros ambientais seguiram o pressuposto apontado pela literatura, apresentando correlações negativas com todos os poluentes. Apesar dessas correlações terem sido fracas, a precipitação pluviométrica parece ter auxiliado na deposição dos poluentes, a velocidade do vento na sua dispersão e a temperatura na criação de movimentos verticais de ar que também auxiliaram sua dissipação. Há possibilidade de que as correlações tenham sido fracas devido ao ano ter sido muito seco e com velocidades de vento baixas.

2014	SO <sub>2</sub>	CO	PI
CHUVA	-0,22	-0,22	-0,27
TEMP	-0,01	-0,07	-0,08
VENT. VEL	-0,34	-0,05	-0,29
VENT. DIR	0,21	0,09	0,01
TO	-0,77	0,07	0,20
VERT	-0,14	-0,20	0,34

Tabela 5 - Análises de Correlação de Pearson 2014

2014	SO <sub>2</sub> – R <sup>2</sup> 62,1%			CO – R <sup>2</sup> 56,2%			PI – R <sup>2</sup> 16,2%		
	Coef.	Erro Padrão	Pr(> t )	Coef.	Erro Padrão	Pr(> t )	Coef.	Erro Padrão	Pr(> t )
CHUVA	-0,0567	0,081001	0,4863	0,25064	0,0536	1,5300	0,0966	0,0467	0,0425
TEMP	1,1562	0,457757	0,0139	0,4541	0,3003	0,1353	0,14728	0,2816	0,6027
VENT. VEL	-0,1543	0,1600	0,3384	-0,7128	0,1090	1,1300	0,0642	0,0741	0,3892
VENT. DIR	-	-	-	0,6369	0,2280	0,0068	0,2113	0,2075	0,3122
TO	-2,6336	0,3588	4,010	1,8686	0,2509	2,7800	-	-	-
VERT	0,26626	0,1075	0,0158	-0,5968	0,0711	5,7500	0,0920	0,0410	0,0283

Tabela 6 - Análises de Regressão 2014

Entre os parâmetros morfológicos, a taxa de ocupação apresentou correlações positivas muito fracas com CO (0,07), fraca com PI (0,20) e uma correlação negativa forte com SO<sub>2</sub> (-0,77). A forte correlação negativa com SO<sub>2</sub> pode refletir a localização das indústrias. No caso do CO e do PI, o aumento da taxa de ocupação pode estar interferindo na dissipação dos poluentes. A verticalização demonstrou correlação positiva com PI (0,34) e negativa, ainda que baixa, com CO (-0,20), e muito baixas com SO<sub>2</sub> (-0,14). O aumento de PI pode estar relacionado a uma dificuldade de circulação dos ventos causada pelo aumento da verticalização, o que pode ser endossado pelas altas correlações de -0,72, -0,69 e -0,72 da verticalização com a velocidade do vento.

Nas análises de regressão, todos os parâmetros foram importantes para explicar algum dos poluentes. A taxa de ocupação, a verticalização e a temperatura foram significativas na concentração de SO<sub>2</sub>, tendo, juntas, um poder explicativo de 62,1%; a precipitação pluviométrica, a ventilação (direção e velocidade), a taxa de ocupação e a verticalização conseguiram explicar 56,2% da variação de CO; e a precipitação pluviométrica e a verticalização impactaram em 16,2% a concentração de PI.

### ANÁLISE CONJUNTA DOS 3 ANOS (2012, 2013 E 2014)

3 anos	SO <sub>2</sub>	CO	PI
SO <sub>2</sub>	1,00	1,00	1,00
CHUVA	-0,23	-0,06	-0,35
TEMP	0,16	-0,13	-0,07
TO	0,03	0,11	-0,26
VERT	0,35	0,02	-0,15

Tabela 7 - Análises de Correlação dos 3 anos

3 anos	SO <sub>2</sub> – R <sup>2</sup> 12,3%			CO – R <sup>2</sup> 7,6%			PI – R <sup>2</sup> 18,7%		
	Coef.	Erro Padrão	Pr(> t )	Coef.	Erro Padrão	Pr(> t )	Coef.	Erro Padrão	Pr(> t )
CHUVA	-0,2264	0,050402	1,16E-05	-0,0393	0,0312	0,2081	-0,0656	0,0185	0,0005
TEMP	0,787082	0,441389	0,075986	-0,3763	0,2640	0,1556	-0,1011	0,1511	0,5042
TO	-	-	-	0,1978	0,0504	0,0001	-0,1062	0,0287	0,0003
VERT	0,085893	0,025589	0,000935	-0,1344	0,0368	0,0003	0,0460	0,0210	0,0293

Tabela 8 - Análises de Regressão dos 3 anos

Nas análises da média dos 3 anos a precipitação pluviométrica seguiu o comportamento esperado e contribuiu para uma redução dos poluentes na atmosfera, a temperatura também teve uma correlação negativa com os poluentes, porém as regressões indicaram que não foi significativa na explicação das concentrações. Já os parâmetros morfológicos contribuíram na explicação da concentração de todos os poluentes. A taxa de ocupação e a verticalização foram associadas a um aumento de CO (0,11 e 0,02 respectivamente) e a uma redução de PI (-0,26 e -0,15 respectivamente). É possível especular que, no caso do CO, o aumento da ocupação esteja dificultando a circulação dos ventos que favoreceriam a dissipação dos poluentes. Em relação ao PI, a associação negativa pode ser reflexo da localização das fontes emissoras, pois indústrias, veículos movidos à diesel e concentração de obras não costumam se localizar em áreas muito ocupadas e verticalizadas. O SO<sub>2</sub> também apresentou uma correlação positiva fraca com a verticalização (0,35) e uma correlação quase desprezível com a taxa de ocupação (0,03), apontando uma possível dificuldade de dispersão dos poluentes em áreas mais verticalizadas.

As análises de regressão confirmaram os resultados das correlações. Indicaram que a chuva foi significativa auxiliando na deposição de SO<sub>2</sub> e PI da atmosfera. A taxa de ocupação esteve associada com o incremento de CO e com a redução de PI, enquanto que a verticalização foi o único parâmetro com implicações para todos os poluentes. Ela favoreceu o acúmulo de SO<sub>2</sub> e PI e foi associada a uma diminuição de CO. Novamente a temperatura não foi significativa para explicar nenhum dos modelos. Os modelos foram capazes de explicar 12,3% da concentração de SO<sub>2</sub>, 7,6% da concentração de CO e 18,7% da concentração de PI.

## CONCLUSÃO

Os resultados apontam para a relevância dos aspectos de verticalização e taxa de ocupação na concentração dos poluentes nos casos estudados. Em muitas análises, ambas apresentaram correlações mais altas com os poluentes do que aspectos ambientais como a precipitação pluviométrica, a temperatura e a ventilação e, por vezes, foram as únicas variáveis capazes de explicar a concentração dos contaminantes. Elas só não apresentaram poder explicativo para o comportamento de CO e PI em 2013, quando nenhum dos outros parâmetros considerados teve poder explicativo e a chuva teve um poder explicativo muito alto, respectivamente.

A taxa de ocupação contribuiu na explicação da maioria dos modelos analisados e apresentou correlações significativas em todas as análises. Apesar dos padrões de impacto não terem sido perfeitamente consistentes, genericamente, o aumento da taxa de ocupação parece associado ao acúmulo de CO e PI e a uma redução de SO<sub>2</sub>. Como as principais fontes de emissão de CO e PI encontram-se espalhadas pela cidade, é possível indicar que o aumento da ocupação esteja dificultando a ventilação e, portanto, favorecendo o acúmulo dos poluentes. Considerando que as indústrias são a principal fonte de SO<sub>2</sub>, o achado pode refletir o fato das indústrias localizarem-se em áreas menos ocupadas, onde a legislação permite e o valor do solo é baixo. Dentre os parâmetros eleitos, o percentual de verticalização (menor ou maior de 4 pavimentos) foi a variável mais vezes

relevante na explicação dos modelos. Na maior parte dos casos, seu aumento foi associado a uma redução de CO e a um acúmulo de PI e SO<sub>2</sub>. Assim como no caso da taxa de ocupação, o aumento da presença de edificações acima de 4 pavimentos pode ter dificultado os movimentos de ar que auxiliariam na dispersão e diluição dos poluentes. Um indicativo de que esse pode ser o caso é a forte correlação negativa (-0,71 em média) que a velocidade do vento apresentou nas 3 análises realizadas em 2014. Quanto à redução de CO, há a possibilidade de que o aumento da presença de edificações possa estar associado a tipos de morfologia que incentivam viagens a pé e que utilizam o transporte público, reduzindo, portanto, a emissão do poluente.

No que se refere aos parâmetros ambientais, o comportamento da *chuva* corroborou com as indicações da literatura e seu aumento foi associado a uma redução dos poluentes em todas as análises, certamente por ter contribuído com a deposição dos mesmos. Ela foi importante na explicação de 5 dos 12 modelos rodados, tendo impactado mais vezes a concentração de PI do que de CO e SO<sub>2</sub>. Curiosamente, apesar do ano de 2013 ter sido o mais chuvoso dos três, não foi nele que as correlações negativas da chuva com os poluentes foram mais altas. Neste ano, inclusive, a precipitação pluviométrica não esteve envolvida na explicação de CO, nem na de SO<sub>2</sub>. Talvez estes resultados sejam explicados pela distribuição assimétrica da chuva ao longo desse ano.

A *temperatura* apresentou correlações negativas com CO e PI e positivas com SO<sub>2</sub>. Tendo em vista a identificação de CO e PI com áreas mais ocupadas e a de SO<sub>2</sub> com áreas menos ocupadas, imagina-se que, nas áreas mais ocupadas, o aumento da temperatura tenha favorecido os movimentos de ar verticais que auxiliaram na dispersão dos poluentes, já nas áreas menos ocupadas, o incremento da temperatura, pode ter estado associado à criação de um domo de poeira que facilitou o acúmulo dos poluentes. Por outro lado, julgando pelo fato da cidade do Rio de Janeiro ser considerada uma cidade quente e por esses terem sido anos com temperaturas acima da média, surpreende que esse parâmetro só tenha contribuído na explicação de 3 dos 12 modelos rodados.

Por fim, apesar da falta de dados só ter permitido a análise da ventilação em 2014, foi possível observar uma associação negativa dos poluentes com a *velocidade do vento*, o que indica que esta favoreceu a dispersão dos poluentes, como apontado pela bibliografia. Já a *direção dos ventos* foi associada positivamente com os contaminantes, revelando um possível aporte de outros locais. O vento (velocidade e direção), no entanto, só contribuiu na explicação da concentração de CO.

Conclui-se que, mesmo que o poder explicativo dos modelos não tenha sido elevado e que o número de casos não permita uma extrapolação dos resultados, os achados da pesquisa são relevantes na medida em que apontam empiricamente para a influência de variáveis aparentemente não contempladas pela literatura nos estudos de qualidade do ar como a taxa de ocupação e a verticalização. O trabalho ainda buscou contribuir com uma abordagem que pode ser replicada e ampliada em outras investigações, de modo a incluir outras variáveis de interesse, tais como a continuidade de fachadas, a permeabilidade do tecido urbano ao vento, o altura precisa das edificações, a umidade, a concentração de fontes emissoras, etc. Ressalta-se ainda a urgência de pesquisas nesse campo e os indícios a serem encontrados como relevantes para a elaboração de políticas públicas e legislações urbanísticas que possam contribuir para a melhoria da qualidade do ar nas nossas cidades.

## REFERÊNCIAS

- ADLER, F. R.; TANNER, C. J. **Ecosystemas Urbanos**: São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- ADOLPHE, Luc. A Simplified Model of Urban Morphology: Application to an Analysis of the Environmental Performance of Cities. **Environment And Planning B: Planning and Design**, [s.l.], v. 28, n. 2, p.183-200, abr. 2001.
- ALBUQUERQUE, C. T. **Análise Microclimática em diferentes condições de urbanização, na Baixada de Jacarepaguá, Rio de Janeiro - RJ**. 2014. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Sociais, Departamento de Geografia e Meio Ambiente, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- BAIK, J.; KIM, J. On the escape of pollutants from urban street canyons. **Atmospheric Environment**, v. 36, n. 3, p. 527-536, 2002.
- CARSLAW, D. C. Evidence of an increasing NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> emissions ratio from road traffic emissions. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 26, p. 4793-4802, 2005.
- CARVALHO, V. S. B. et al. **Avaliação das parcelas de inaláveis no material particulado coletado pela FEEMA na Bacia Aérea III da Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu-Paraná. Anais. Foz de Iguaçu, Paraná, 2002. p. 2045-54.
- CASTRO, H. A. de; et al. Questões metodológicas para a investigação dos efeitos da poluição do ar na saúde. **Rev. Bras. Epidemiol**, v. 6, n. 2, p.135-149, 2003.
- CHAKRABARTI, V. **A Country of Cities**. Nova York: Metropolis Books, 2013.
- DUCHIADE, M. P. Poluição do ar e doenças respiratórias: uma revisão. **Cad. Saúde Pública**, v. 8, n. 3, p. 311-30, 1992.
- ECHENIQUE, M. H. et al. Growing Cities Sustainably. **Journal Of The American Planning Association**, [s.l.], v. 78, n. 2, p.121-137, abr. 2012. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01944363.2012.666731>>. Acesso em: 16 set. 2015.
- EWING, R; CERVERO, R. Travel and built environment: A synthesis. **Transportation Research Record**, [s.l.], v. 1, n. 1780, p.87-114, 2001.
- FARIAS, Heitor Soares de. Bacias Aéreas: uma proposta metodológica para o estudo da qualidade do ar em áreas influenciadas pelo relevo. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s.l.], v. 12, p.48-60, 2013.
- FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente. **Inventário de fontes emissoras de poluentes atmosféricos da região metropolitana do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro. FEEMA, 26p, 2004.
- FRANK, L. D., et al. Many pathways from land use to health: associations between neighborhood walkability and active transportation, body mass index, and air quality. **Journal of the American Planning Association**, v. 72, n. 1, p. 75-87, 2006.



- FRENKEL, A., ASHKENAZI, M. Measuring urban sprawl: how can we deal with it. **Environment And Planning B: Planning and Design**, [s.l.], v. 35, n. 1, p.56-79, 2008.
- GALLOWAY, J. N. Anthropogenic mobilization of sulphur and nitrogen: Immediate and delayed consequences. *Annual review of energy and the environment*, v. 21, n. 1, p. 261-292, 1996.
- GALSTER, G et al. Wrestling sprawl to the ground: defining and measuring an elusive concept. **Housing Policy Debate**, [s.l.], v. 12, n. 4, p.681-717, 2001.
- GARCÍA, F. F. **Manual de climatología aplicada**: clima, medio ambiente y planificación. Madrid: Editorial síntesis, S.A., 1996. 285p.
- GERJ - GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). **Portal do INEA**. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/>>. Acesso em: 22 dez. 2015.
- GRAEDEL, T. E., CRUTZEN, P. J. **Atmospherere Climate and Change**. New York: Scientific American Library, 1997.
- HORSTMAN, D. et al. Effects of submicronic sulfuric acid aerosol on human pulmonary function. **Arch Environ Health**, [s.l.], v. 37, p.136-41, 1982.
- HUANG, J; LU, X. X.; SELLERS, J. M. A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing. **Landscape And Urban Planning**, [s.l.], v. 82, p.184-197, 2007..
- INEA - INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Governo do Rio de Janeiro. **Relatório da Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro**: Ano base 2012. Rio de Janeiro: INEA, 2015. 147 p.
- INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)**. 2015. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 01 dez. 2015.
- LANDSBERG, H.E. **The urban climate**. New York: Academic Press, 1997. 276p. (original publicado em 1981).
- LARRAÑAGA, A. M.; RIBEIRO, J. L. D.; CYBIS, H. B. B. Fatores que afetam as decisões individuais de realizar viagens a pé: estudo qualitativo. **Revista TRANSPORTES**, v. 17, n. 2, 2009.
- MAIA, Juliana Lúcio Motta. **Impactos de Padrões Morfológicos na concentração de poluentes atmosféricos**: o caso da cidade do Rio de Janeiro. 2016. 288 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.
- MAIA, Juliana Lúcio Motta; NETTO, Vinicius M.. Forma Urbana: Uma discussão sobre Compacidade e Desempenho. In: **ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO**, Não use números Romanos ou letras, use somente números Arábicos., 2016, Florianópolis. Anais... . Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016. p. 152 - 163.
- MAIA, L. F. P. G. **Cenarização Espaço-Temporal dos Impactos na Qualidade do Ar na Bacia Aérea III pelo Aumento de Demanda do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro**: Antonio Carlos Jobim (Galeão). 2005. 409 f. Tese (Doutorado) - Curso de Instituto de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

- MARTINS, C. R. et al. Ciclos Globais de Carbono, Nitrogênio e Enxofre: a Importância na Química da Atmosfera. **Química Nova**, [s.l.], v. 5, n. 3, 2003. Disponível em: <<http://qnint.sbq.org.br/novo/index.php?hash=tema.7>>. Acesso em: 20 jan. 2016.
- NEWMAN, P. W. G; KENWORTHY, J. R. Gasoline Consumption and Cities: A Comparison of U.S. Cities with a Global Survey. **Journal Of The American Planning Association**, [s.l.], v. 55, p.24-37, 1989.
- OJIMA, R. Dimensões da urbanização dispersa e proposta metodológica para estudos comparativos. **Revista Brasileira de Estudos Populacionais**, [s.l.], v. 24, n. 2, p.277-300, 2007.
- OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. New York: Routledge, 1996. 2.ed. (1a ed. 1987).
- PAIM, D. T.; FARIA, A. P. N. de. O que a medida de acessibilidade descreve da morfologia urbana. In: **XVI ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFPEL**. Pelotas, 2014.
- PAN, H. et al. **Influence of Urban Morphology on street level concentrations**: water channel and field study in three southern Californian cities. 2010. 6p. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Hansheng\\_Pan/publication/242567291\\_INFLUENCE\\_OF\\_URBAN\\_MORPHOLOGY\\_ON\\_STREET\\_LEVEL\\_CONCENTRATIONS\\_WATER\\_CHANNEL\\_AND\\_FIELD\\_STUDY\\_IN\\_THREE\\_SOUTHERN\\_CALIFORNIAN\\_CITIES/links/02e7e53c353d55f5c5000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hansheng_Pan/publication/242567291_INFLUENCE_OF_URBAN_MORPHOLOGY_ON_STREET_LEVEL_CONCENTRATIONS_WATER_CHANNEL_AND_FIELD_STUDY_IN_THREE_SOUTHERN_CALIFORNIAN_CITIES/links/02e7e53c353d55f5c5000000.pdf). Acesso em: 12/01/2016.
- PIMENTEL, L. C. G., et al. Caracterização do regime de vento em superfície na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. **Eng. sanit. ambient**, v. 19, n. 2, p. 121-132, 2014.
- PIRES, D. O. **Inventário de Emissões Atmosféricas de Fontes Estacionárias e Sua Contribuição para a Poluição do Ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. 2005. 188 f. Tese (Doutorado) - Curso de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- RIBEIRO, R. J. C. Índices de qualidade configuracional urbana. In: **XIII Encontro da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano E Regional**, 13, 2009, Florianópolis: Enanpur, 2009. p. 1 - 21.
- ROBAA, S. M. Urban-suburban/rural differences over Greater Cairo, Egypt. **Atmosfera**, v. 16, n. 3, p. 157-171, 2003.
- SALAT, S. Energy loads, CO2 emissions and building stocks: morphologies, typologies, energy systems and behaviour. **Building Research & Information**, v. 37, n. 5-6, p. 598-609, 2009.
- SALVAÇÃO, J. L. **Relação entre a dispersão urbana e os custos de saneamento básico**: Análise paramétrica com base nos municípios de Portugal Continental. 2012. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Sistemas de Informação Geográfica, Universidade de Trás-os- Montes e Alto Douro, Vila Real, 2012.
- SIMON, L. Heavy metals, sodium and sulphur in roadside topsoils and in the indicator plant chicory (*Cichorium intybus* L.). **Acta Agronomica Hungarica**, v. 49, n. 1, p. 1-13, 2001.

- SORENSEN, P. Moving Los Angeles. Access. **The Magazine Of The University Of California**. Transportation Center. [s.l.], p. 16-24. 2009.
- TÂNGARI, V. R. et al. Morfologia Urbana, Suporte Geo-Bio Físico e o Sistema de Espaços Livres no Rio De Janeiro. In: CAMPOS, Ana Cecilia Arruda et al (Org.). **Quadro dos sistemas de Espaços livres nas cidades brasileiras**. São Paulo: Fau Usp, 2011.
- TORRENS, P. A toolkit for measuring sprawl. **Applied Spacial Analysis And Policy**, v. 1, p.5-36, 2008.
- TSAI, Yu-hsin. Quantifying Urban Form: Compactness versus 'Sprawl'. **Urban Studies**, [s.l.], v. 42, n. 1, p.141-161, jan. 2005.