

## **MORFOLOGIA URBANA E QUALIDADE DO AR: Uma proposição metodológica aplicada em caso empírico no Rio de Janeiro.**

**Juliana L. M. Maia**

Universidade Federal Fluminense

**Vinicius M. Netto**

Universidade Federal Fluminense

**José F. Oliveira Júnior**

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Email: [juliana.musarq@gmail.com](mailto:juliana.musarq@gmail.com)

### **RESUMO**

Considerando a importância das cidades como fontes emissoras de poluentes e polos de concentração de população, o trabalho investiga possíveis impactos de aspectos da forma urbana nas concentrações de poluentes. O artigo discute o estado da arte sobre as interações entre a qualidade do ar e indicadores da forma urbana, compara e testa diferentes indicadores da forma urbana, incluindo um indicador de compactação tridimensional proposto. 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 para graus de influência das variáveis taxa de ocupação e verticalização na concentração dos poluentes considerados.

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

### **ABSTRACT**

Considering the importance of cities as pollutants emission sources and population hubs, the work researches possible impacts of the urban form aspects on pollutants concentrations. The paper discusses the state of art of interactions between air quality and urban form indexes, compares and tests different indicators of urban form, including a proposed tridimensional compactness index. It's 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 (wind – direction and speed - , rainfall and air temperature). Results point to grades of influence of the ground space index and verticalization on concentrations of considered pollutants.

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

## 1. 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 e polos de concentração de população, o presente trabalho investiga possíveis impactos da forma urbana nas concentrações de poluentes. Mais especificamente, a abordagem se desdobra a partir de uma hipótese. 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 chuva e ventos, a temperatura e a posição geográfica em relação ao relevo e à hidrografia, poderão impactar (iv) a concentração de poluentes e a *qualidade do ar* (figura 1).



**Figura 1 – Hipótese das relações entre fatores espaciais, comportamentais, ambientais e a qualidade do ar.**

Fonte: Autores.

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. Também aborda fenômenos naturais resultantes da interação da poluição com o clima, como inversões térmicas, *smog* e outros, típicos das áreas urbanas, como a ilha de calor urbano e o domo urbano de poeira. 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 em jogo.

Em seguida, o artigo procura atender a essas carências, buscando nos estudos da forma urbana aspectos mais precisos para a análise do desempenho ambiental da forma urbana. São identificados indicadores mais frequentemente utilizados e a tendência de redução da forma à sua densidade e bidimensionalidade. A partir dessa constatação, um fator mais preciso de descrição da forma, o índice de compacidade 3D, é comparado com outras variáveis de descrição, permitindo a escolha do fator de taxa de ocupação como suficientemente preciso para representar as complexidades da forma urbana.

Tendo chegado a um elemento preciso de descrição da forma urbana, o artigo passa a lidar com variáveis de natureza ambiental. Faz então uma proposição metodológica para tratar o problema da relação entre morfologia e qualidade do ar. A abordagem é então aplicada em um estudo de caso na cidade do Rio de Janeiro (CRJ). Inicialmente, revisaremos seus instrumentos de monitoramento do clima e as condições de relevo na qualidade do ar local. A partir da compilação de fontes de emissão atmosférica e da elaboração de uma base de dados em série histórica para o exame os anos de 2012, 2013 e 2014, procederemos a análise estatística da distribuição espacial de poluentes (dióxido de enxofre - SO<sub>2</sub>, monóxido de carbono - CO e partículas inaláveis - PI) em relação a variáveis morfológicas (taxa de ocupação e percentagem de verticalização) e meteorológicas (direção e velocidade dos ventos, precipitação pluvial e temperatura do ar). Os resultados apontam para graus distintos de influência das variáveis taxa de ocupação e verticalização na concentração dos contaminantes considerados.

## 2. A POLUIÇÃO DO AR E SEUS IMPACTOS

Os compostos poluentes se inserem em processos que fazem parte de ciclos naturais. O conhecimento desses processos nos ajuda a entender melhor as interações dos poluentes no meio ambiente e seus possíveis impactos no meio urbano e na saúde humana, animal e vegetal. Dentre os principais ciclos destacam-se o do Carbono e o do Enxofre, cujos elementos se relacionam com os poluentes tratados nesse artigo.

O ciclo do carbono tem seu início quando o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico é assimilado pelas plantas, algas e cianobactérias por meio da fotossíntese. As plantas são uma espécie de depósito desse elemento que, transformado em carboidrato, percorre toda a cadeia alimentar. Além desse depósito, podemos encontrar outros na terra, na forma de combustíveis fósseis; na água, na forma de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) e bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) dissolvido; no ar, principalmente na forma de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  (metano); e nos seres vivos, fixado na matéria orgânica (Adler e Tanner, 2015).

A atividade antrópica vem interferindo nesse ciclo intensivamente desde o início da Revolução Industrial, quando passou a queimar, em grande escala, combustíveis fósseis como o carvão, o petróleo e o gás natural. Tendo em vista que o ciclo natural envolve uma mobilização de carbono muito grande, parte dessa liberação consegue ser absorvida. Por outro lado, a constante emissão humana gerou uma tendência de crescimento em longo prazo (Adler e Tanner, 2015) que provoca consequências.

Um dos compostos emitidos é  $\text{CO}_2$ . Ele é um dos responsáveis pelo chamado *efeito estufa*: o aumento da concentração desse componente ocasiona um incremento da retenção de radiações solares, que pode provocar um incremento da temperatura planetária (Ribeiro et al., 2000). Esse aumento pode causar mudanças climáticas, alterações no processo de desertificação; redução da Camada de Ozônio entre outros efeitos (Pires, 2005). Outro composto do carbono 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 até a morte (Castro et al., 2003; EPA, 1999; Bair, 2002; Adler e Tanner, 2015).

Um segundo ciclo de interesse é o do enxofre, um elemento fundamental para as células, bem como para enzimas e aminoácidos que formam as proteínas. 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, do aumento da exposição de sedimentos de lagos secos e do sulfeto de dimetila, liberado de terrenos encharcados com carga elevada de nitrogênio (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 ( $\text{SO}_2$ ). Esse gás é produzido naturalmente por vulcões e através da intervenção humana pela queima de carvão e óleo. Sua inalação excessiva pode causar irritação da mucosa respiratória desde a nasofaringe e a orofaringe até os alvéolos, levando a inflamação, hemorragia e necrose, doenças cardíacas e pulmonares (Horstman et al., 1982; Adler e Tanner, 2015). Quando suspenso, contribui para a diminuição da visibilidade (sulfato particulado) (Pires, 2005; Martins et al., 2003) e sua interação com outros compostos atmosféricos ainda gera o ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), 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 (Holland et al., 1979; 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 populacional, situações meteorológicas desfavoráveis podem provocar a concentração dos poluentes (Duchiade, 1992).

### 3. CIDADE, CLIMA E POLUIÇÃO

Um dos principais fatores meteorológicos responsáveis pela qualidade do ar nas cidades é o vento. De modo geral, esse fenômeno natural é sentido quando o ar se movimenta das regiões de alta pressão, onde normalmente a temperatura é menor, para as regiões de baixa pressão, onde a temperatura tende a ser maior. 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, o padrão natural do vento tende a ser alterado, pois as edificações ora se encontram em posições contrárias aos movimentos horizontais, diminuindo sua velocidade (Landsberg, 1997) e alterando sua direção, ora favorecem a ocorrência de fenômenos que alteram as dinâmicas dos 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 (Lee, 1979 apud 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; Pimentel et al., 2014) e *inversão térmica* (Duchiade, 1992) que provocam o conhecido *smog*, caracterizado por uma neblina com alta concentração de poluentes. 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 (Manley, 1958; Oke, 1987 apud Adler e Tanner, 2015). Uma das principais causas dessa modificação climática são o elevado adensamento construtivo, que concentra uma baixa taxa de evaporação do solo e uma grande massa edificada de alta capacidade calorífica, e atividades produtoras de calor e poluição, como os meios de transporte e as indústrias (Givoni, 1992). 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.

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. Landsberg (1997), por exemplo, identificou uma média de temperatura anual superior nos ambientes citadinos de 0,5°C a 3°C em relação a ambientes não urbanos e uma umidade relativa 10% inferior. Observou ainda que, no ambiente urbano, a corrente de ar quente ascendente, junto ao aumento de poluentes, pode provocar um aumento de precipitações, e que a redução da velocidade do vento é na ordem de 20 a 30% (Adler e Tanner, 2015). García (1996) também definiu a intensidade e a magnitude das ilhas de calor a partir da observação de diferentes amplitudes térmicas. Estas pesquisas observam diferenças do ambiente urbano para os não urbanos sem, no entanto, atrelar essas variações a nenhum aspecto formal específico observado empiricamente.

Outras investigações procuram *associar a temperatura com parâmetros da forma* visando o planejamento urbano, mas não incluem em seus estudos empíricos a poluição. É o caso de Assis (2000), que procurou identificar a melhor disposição das edificações em relação ao conforto térmico, e Duarte e Serra (2003), que fazem correlações entre a temperatura do ar e parâmetros de ocupação do solo em cidades de clima tropical úmido no Brasil.

Os estudos que abarcam o chamado *cânion urbano*, cavidade formada pelas edificações enfileiradas em ambos os lados da rua, costumam fazer uso da modelagem. Baik e Kim (2002), por exemplo, demonstraram

a contribuição da turbulência para a remoção dos poluentes e a reentrada dos mesmos, provocada pelos fluxos advectivos. Xiu e Pleim (2001) desenvolveram um modelo de Camada Limite Atmosférica (CLA) para avaliação da qualidade do ar, que leva em conta os efeitos das superfícies do solo. Carslaw (2005) modelou as concentrações diárias de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) e monóxido de carbono (CO) em um cânion no período de 1998 a 2005 e demonstrou que a redução geral do tráfego e de fatores meteorológicos contavam para a queda das concentrações de NO<sub>x</sub>. 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.

Há outros trabalhos que estudam as relações da forma com a poluição, mas que não tocam na questão das interferências com o clima. A maior parte desses trabalhos analisam a relação do uso e da forma urbana com a eficiência e a matriz energética e com o uso do automóvel, o que afetaria de modo indireto a poluição.

Um dos primeiros trabalhos que relacionam a forma urbana e o uso de combustível fóssil foi feito por Newman et Kenworthy (1989). Em seu estudo, os autores mostram que o uso de combustível per capita cai com a densidade urbana. Mais recentemente, Echenique et al. (2012) concluíram que a compactação reduz em torno de 5% as milhas viajadas por veículo (MVV); Ewing e Cervero (2001, 2010) fizeram uma pesquisa semelhante e demonstraram que ao dobrar a densidade de um bairro, a distância veicular automotiva também é reduzida em torno de 5% por pessoa. Um benefício, porém de pouca expressividade.

Salat (2009) relaciona aspectos da forma urbana com as emissões de CO<sub>2</sub> através do consumo energético das edificações. Se utilizando de modelos estatísticos, ele procura determinar o peso da morfologia urbana, da forma das edificações, dos sistemas de energia e do comportamento humano nas necessidades energéticas da população e descobriu que a morfologia urbana tem um forte potencial para reduzir os consumos de energia e as emissões de gases efeito de estufa. Apesar de comparar tipos formais diferentes, ele não aponta *quais aspectos da forma seriam responsáveis* por essa redução.

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 compactidade 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 no 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 de modelos de regressões lineares e encontraram que a caminhabilidade impacta em 1,8% as milhas viajadas por veículo e explica em torno de 1,7% a variabilidade das emissões de Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>) 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 óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e compostos orgânicos voláteis (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 NO<sub>x</sub> 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, investigações realizadas em três capitais no sul e sudeste do Brasil 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 (ver SABOYA et al. 2015; NETTO et al. 2012). 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 NO<sub>x</sub>.

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>1</sup>(PM<sub>2,5</sub>) em ambientes construídos diferenciados pelo fator da altura das edificações. Seus resultados indicam que a altura pode influenciar na velocidade do vento e, conseqüentemente, na dispersão dos poluentes no tecido urbano. Apesar desse estudo ter considerado a influência da morfologia na dispersão dos poluentes, não incluiu variáveis morfológicas entre as variáveis preditivas da poluição. Além disso, as características morfológicas de assentamento são pouco exploradas, ficando restritas à diferença de altura. O número de casos também é pouco expressivo, impossibilitando a generalização dos resultados.

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 como o tamanho das edificações, densidade da rede de ruas, verticalização etc. Vejamos como a literatura tem lidado com o problema do desempenho da forma urbana.

#### 4. IDENTIFICANDO FATORES PRECISOS 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 – reunindo as primeiras evidências empíricas a favor do que seria adiante tratado como ‘cidade compacta’. O indicador segue utilizado no presente, como em Sorensen (2009), que relaciona densidade aos congestionamentos nas vias expressas em Los Angeles, e Chakrabarti (2013), que relaciona densidade, sistema de transporte e infraestrutura. Ambos encontram resultados que corroboram o modelo compacto. Entretanto, hoje a literatura oferece um leque extenso de indicadores de características da forma urbana e de certos aspectos de seu desempenho (Quadro 1).

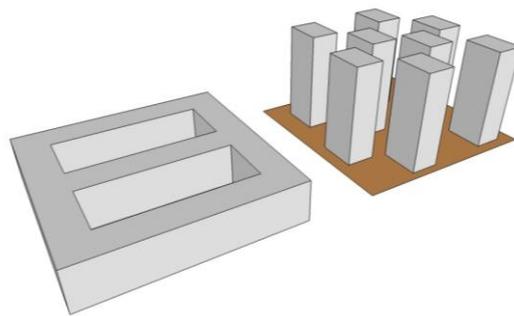
TRABALHO	VARIÁVEIS QUE ANALISA
Galster et al (2001)	Densidade; Centralidade; Proximidade; Nuclearidade; Continuidade; Concentração; Aglomeração; e mistura de usos.
Tsai (2005)	Tamanho metropolitano, Densidade, Grau de distribuição e Grau de agrupamento.
Huang, Lu e Sellers (2007)	Densidade; Compacidade; 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.
Berghauer 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.

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. Uma diluição similar da configuração tridimensional da forma é encontrada em outras medidas que tendem a não considerar os objetos construídos encontrados nas cidades, como é o caso dos índices de dispersão. 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, apontamos que ele apresenta severa limitação para representar a totalidade da forma e, portanto, não permite esgotar suas implicações mais profundas. A Figura 2 ilustra esse argumento, ao trazer dois quarteirões com configurações absolutamente distintas e que, no entanto, possuem a mesma densidade.

<sup>1</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).



**Figura 2 – Arquétipos de quarteirões com mesma densidade e configurações distintas.**

Fonte: Elaborada pelos autores a partir do software Google SketchUp.

Propomos um Índice de Compacidade capaz de incluir a terceira dimensão a partir de uma definição do conceito sugerida por Rocha: é “a capacidade que as formas têm de envolver a maior quantidade de conteúdo com a menor quantidade de matéria continente” (Rocha, 2014:3). Uma comparação entre essas medidas da forma urbana se torna de interesse a fim de reconhecermos seu grau de similaridade e sentido empírico como indicadores de desempenho urbano. Fizemos a comparação através do confronto estatístico entre o Índice de Compacidade 3D e fatores espaciais disponibilizados publicamente pela pesquisa “Efeitos da Arquitetura” (Netto et al., 2012). Este banco de dados conta com informações detalhadas a respeito de 24 setores censitários sorteados em áreas distintas da cidade do Rio de Janeiro com a predominância de edificações em altura (acima de 2 pavimentos), incluindo 500 faces de quarteirão (faixas de lotes ao longo de 250 trechos entre esquinas de rua) e cerca de 3.800 edifícios. Os fatores espaciais considerados foram: densidade de economias (unidades de apartamentos, comércios ou serviços); densidade arquitetônica (somatório da área construída dividida pela área do lote); índice de continuidade (percentual de fachadas contínuas na face do quarteirão); índice de aproveitamento (número que indica a área construída a partir área do lote) e taxa de ocupação (percentual da projeção da edificação sobre a área do lote).

Utilizando-se dessas bases de dados, o confronto envolveu correlações estatísticas (Tabela 1) baseadas no coeficiente de Pearson, variando entre zero e -1 ou +1 (correlação perfeita negativa ou positiva), com todos os intervalos de confiança acima de 99% (probabilidade da média verdadeira das observações ocorrer).

MEDIDAS DA FORMA	DENS_ARQ	DENS_ECON	IND_CONTIN	IND COMP 3D
Dens_Econ	0.541	1	<b>0.278</b>	<b>0.280</b>
Dens_Arq	1	0.541	<b>0.458</b>	<b>0.483</b>
Ind Contin	0.458	0.278	1	<b>0.612</b>
Ind Comp 3D	0.483	0.280	<b>0.612</b>	1
IA	0.570	0.665	<b>0.466</b>	<b>0.633</b>
TO	0.497	0.331	<b>0.581</b>	<b>0.967</b>

**Tabela 1 - Correlações entre indicadores apontam seu grau de similaridade em situações reais**

Em geral, as medidas apresentaram correlações eloquentes, mostrando ora similaridades, ora diferenças relevantes. Os índices de compacidade (tridimensional) e o índice de continuidade (bidimensional) têm correlações similares com as densidades arquitetônica e de economias, sendo mais próximos à primeira. Interessantemente, têm correlação positiva entre si (0,612), o que aponta o grau de similaridade expressiva entre características tridimensionais e a ‘pele’ do quarteirão em sua interface com o canal da rua. Uma correlação similar é encontrada entre indicadores tridimensionais (IA – Índice de Aproveitamento - e Compacidade), evidenciando formas distintas de análise da forma. Mas o mais surpreendente é a correlação entre compacidade tridimensional a medida bidimensional da projeção do edifício sobre o solo (taxa de ocupação - TO), de 0,967. Essa correlação sugere a possibilidade de utilização dos dados de TO como *proxy* para a compacidade urbana: quando o TO sobe, a compacidade tende fortemente a subir; a queda de TO é um indicador suficiente também para descrever a dispersão e fragmentação tridimensional.

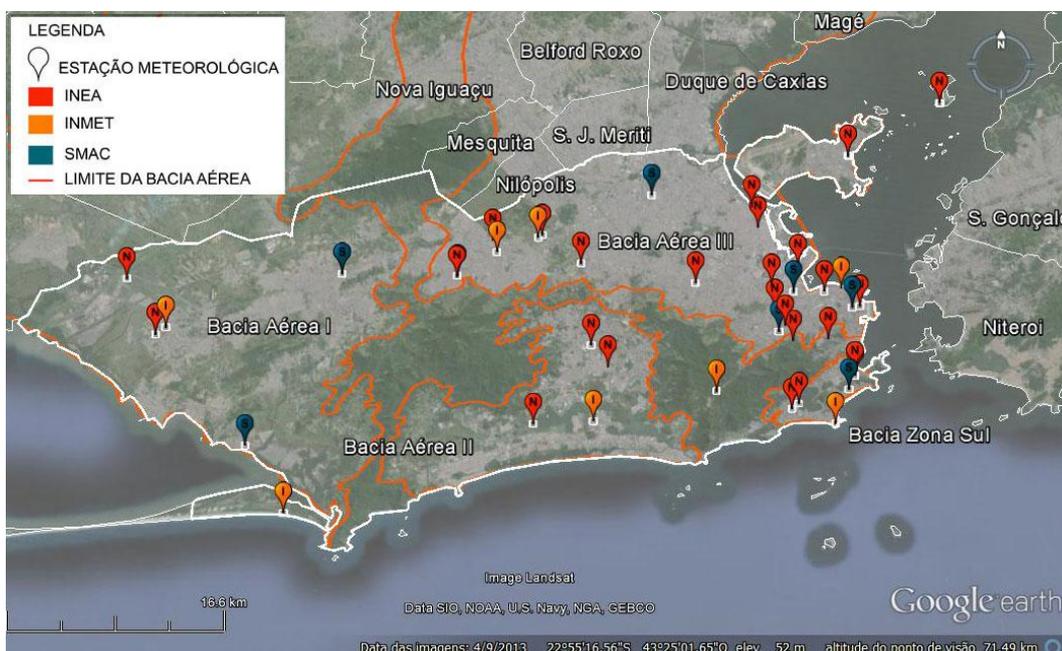
Esse achado contraintuitivo, não examinado em abordagens anteriores (no melhor do nosso conhecimento), tem implicações consideráveis para a análise da forma e o uso de indicadores para avaliar desempenho urbano. Podemos descrever a forma urbana com grande economia de informações, baseadas na taxa de ocupação.

Baseados nessa constatação, nosso próximo passo foi buscar de 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, variável validada como *proxy* da compactidade tridimensional. De posse deste banco de dados de variáveis espaciais, do banco de dados de variáveis ambientais e de qualidade do ar.

## 5. IDENTIFICANDO FATORES DE QUALIDADE DO AR NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

No Rio de Janeiro, três órgãos 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), órgão responsável pelo controle da qualidade do ar, a Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMAC) e o Instituto de Meteorologia (INMET) - Figura 3.



**Figura 3 - Localização das estações meteorológicas na cidade do Rio de Janeiro**

Fonte: Elaborado pelo autores com base em imagem do Google Earth 2013 e coordenadas das estações.

Um dos instrumentos que auxilia esses órgãos a fazerem o monitoramento é o inventário de fontes de emissão de poluição atmosférica feito pela FEEMA, em 2004, para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). Ele identificou que as fontes fixas são responsáveis especialmente pela emissão de Dióxido de Enxofre ( $\text{SO}_2$  – 88%). Já as fontes móveis são responsáveis, principalmente, com as emissões de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$  – 67%), monóxido de carbono ( $\text{CO}$  – 98%) e hidrocarbonetos ( $\text{HC}$  – 67%). Em relação às partículas inaláveis ( $\text{MP}_{10}$ ), é possível observar que há uma distribuição mais equilibrada, mesmo que as fontes fixas tenham um peso maior. Isso se deve ao fato desse poluente ser típico da queima de combustíveis fósseis mais pesados, usados nos processos industriais (óleo combustível) e em veículos automotores (diesel) (INEA, 2010). Dentro da contribuição das fontes móveis, os veículos movidos à gasolina, como os carros de passeio, emitem mais monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) e hidrocarbonetos ( $\text{HC}$ ). Veículos movidos a diesel, como ônibus e caminhões, são majoritariamente responsáveis pelas emissões de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}$ ), dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e material particulado (FEEMA, 2004). O relatório estima que na RMRJ as fontes móveis sejam as principais responsáveis (77%) pelo total de poluentes emitidos.

O relevo acidentado ainda contribui na climatologia criando divisores microclimáticos (Ferreira, 2005). Também 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 na atmosfera, 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) procuraram definir o regime de vento na cidade do Rio de Janeiro baseado em três setores conformados a partir da topografia (Oeste, Centro- Sul e Leste). Os autores identificaram ventos conformados pelas brisas marítimas e terrestres num ângulo aproximadamente perpendicular ao contorno da costa nas Regiões Oeste e Centro-Sul; na região Centro-Sul a predominância dos ventos nas direções norte-sul. Já na Região Leste, observaram que os ventos perpendiculares à costa ocorrem somente nas estações Centro e Galeão, pois, segundo eles, a Baía de Guanabara causaria um efeito de canalização do vento. 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. Ela ressalta o período de maio a setembro como crítico em relação aos índices de poluição. Constata ainda que a qualidade do ar tende a melhorar nos meses de verão, quando os níveis de precipitação e as temperaturas estão mais elevados, e promovem uma eficiente remoção dos contaminantes atmosféricos pela ação da chuva e dos ventos.

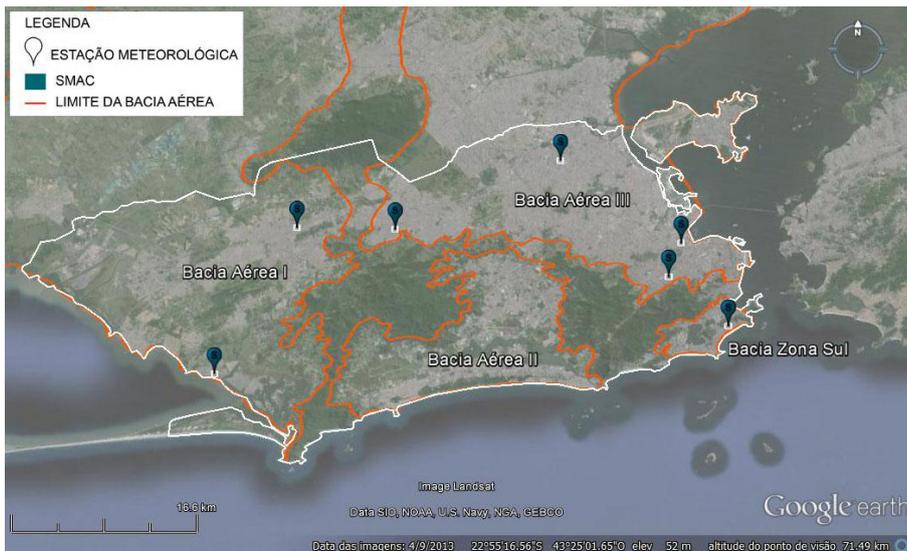
Dentro das investigações sobre a qualidade do ar na cidade, Carvalho (2006) realiza um diagnóstico da RMRJ em relação ao *comportamento das concentrações de ozônio (O<sub>3</sub>)* e dos *óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>)*. Os resultados indicam possíveis relações de causa e efeito entre os parâmetros meteorológicos e de qualidade do ar para a região. Ela também observa que, em geral, os maiores valores correspondem ao período de agosto a fevereiro e os menores ao período março a julho. Esse comportamento pode ser associado à diminuição da temperatura e da radiação solar nos meses de inverno que dificulta a formação do O<sub>3</sub>.

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 no inverno de 2013. Um de seus achados é que as áreas com os maiores índices construtivos e/ou com menores percentuais de cobertura vegetal apresentaram temperaturas médias mais elevadas e menor umidade relativa no ar. Não obstante, a autora não faz associações desses achados à 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 foram selecionadas tendo em vista sua influência na qualidade do ar, como citado anteriormente.

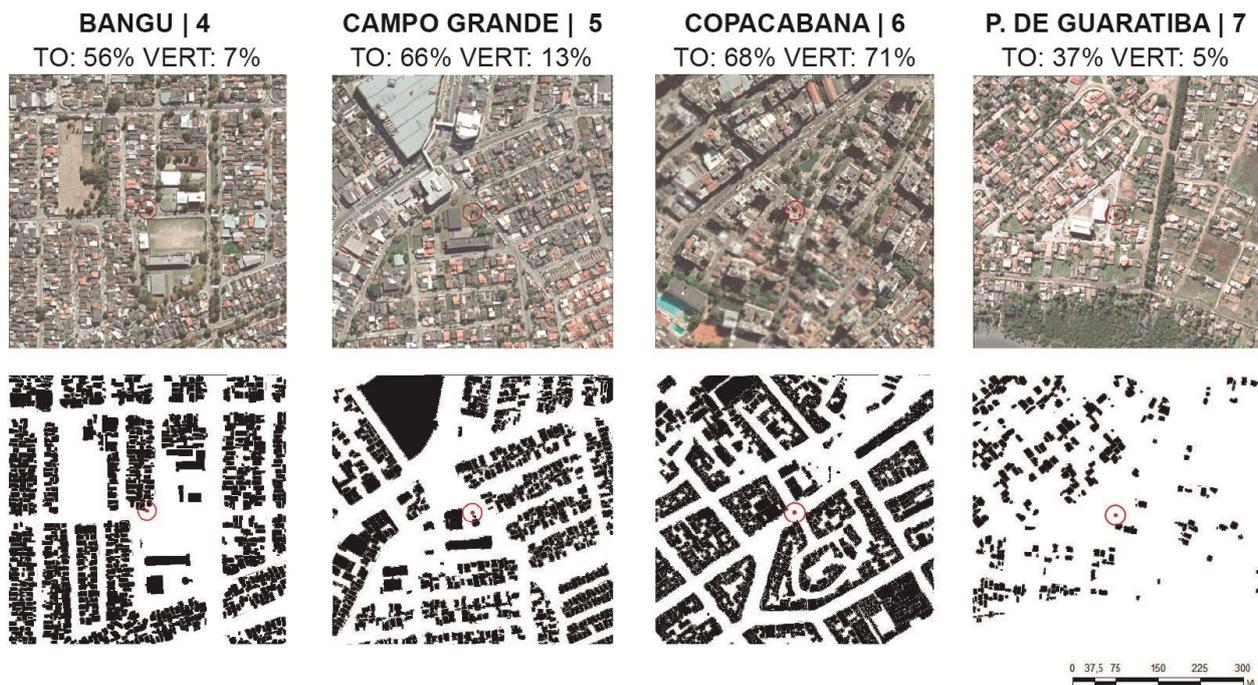
Realizamos então um exame estatístico relacionando os poluentes (SO<sub>2</sub>, CO e PI) e as variáveis morfológicas (taxa de ocupação e verticalização) e meteorológicas (vento – direção e velocidade -, precipitação pluvial e temperatura do ar). Os dados ambientais foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), pelo Instituto Estadual do Meio Ambiente (INEA) e pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SMAC). Essas informações coletadas por estações meteorológicas localizadas em diferentes áreas da CRJ 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, em um total de 7 estações: Bangu (SMAC), Campo Grande (SMAC), Copacabana (SMAC), Irajá (SMAC), Pedra de Guaratiba (SMAC) São Cristóvão (SMAC) e Tijuca (SMAC) (Figura 4).



**Figura 4 - 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 5).



**Figura 5 – 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 a 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).

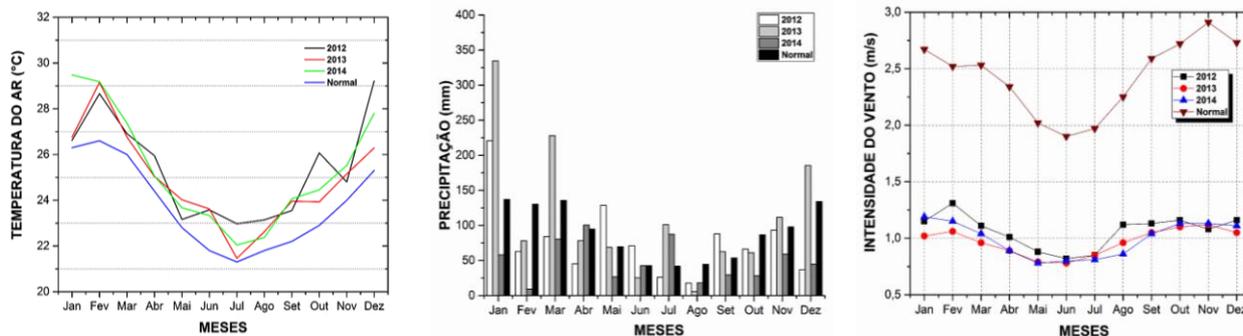


Gráfico 1 - Temperaturas médias (°C), precipitação média acumulada (mm) e intensidade do Vento (m/s): comparação 2012-2014

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 (585mm 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 ano que choveu acima do esperado (1341mm 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 ano 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).

## 6. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As análises 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.

2012	SO <sub>2</sub>	CO	PI
<b>POLUENTE</b>	1,00	1,00	1,00
<b>CHUVA</b>	-0,31	0,08	-0,16
<b>TEMP</b>	0,32	-0,27	-0,13
<b>TO</b>	-0,39	-0,04	0,25
<b>VERT</b>	0,40	-0,46	0,33

Tabela 2 - Análises de Correlação 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 )
<b>CHUVA</b>	-7,0008	3,6855	0,0618	-0,0705	0,1364	0,6069	-0,0266	0,0321	0,4099
<b>TEMP</b>	0,3799	0,1389	0,0079	-0,0214	0,0051	8,87E <sup>-05</sup>	-0,0301	0,2447	0,9023
<b>TO</b>	-0,4376	0,1968	0,0296	-0,0171	0,0072	0,021873	0,2136	0,0925	0,0241
<b>VERT</b>	0,4710	0,1315	0,0006	-0,0269	0,0048	5,82E <sup>-07</sup>	0,1374	0,0459	0,0039

Tabela 3 - Análises de Regressão 2012

Em relação aos parâmetros ambientais, foi identificada uma correlação negativa dos poluentes com a chuva, confirmando a 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>.

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**, as análises revelaram diferentes níveis de correlações entre as variáveis ambientais e morfológicas com os poluentes. A taxa de ocupação teve 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
<b>POLUENTE</b>	1,00	1,00	1,00
<b>CHUVA</b>	-0,26	-0,16	-0,45
<b>TEMP</b>	0,08	-0,07	-0,15
<b>TO</b>	-0,44	-0,11	0,12
<b>VERT</b>	0,37	0,05	0,21

Tabela 4 - Análises de Correlação 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 )
<b>CHUVA</b>	-0,1267	0,0714	0,0807	-0,0582	0,0524	0,2708	-22,0538	5,9873	0,0005
<b>TEMP</b>	-1,3910	1,0088	0,1725	-0,4081	0,7062	0,5653	0,2493	0,3345	0,4588
<b>TO</b>	-1,2649	0,3654	0,0009	-0,4552	0,2691	0,0954	0,4712	0,3278	0,1553
<b>VERT</b>	-	-	-	-0,1552	0,0975	0,1163	0,1837	0,2758	0,5078

Tabela 5 - 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, apresentado 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
<b>POLUENTE</b>	1,00	1,00	1,00
<b>CHUVA</b>	-0,22	-0,22	-0,27
<b>TEMP</b>	-0,01	-0,07	-0,08
<b>VENT. VEL</b>	-0,34	-0,05	-0,29
<b>VENT. DIR</b>	0,21	0,09	0,01
<b>TO</b>	-0,77	0,07	0,20
<b>VERT</b>	-0,14	-0,20	0,34

Tabela 6 - Análises de Correlação 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	-0,05672	0,081001	0,486262	-0,25064	0,053616	1,53E-05	-0,09664	0,046719	0,042511
TEMP	1,156237	0,457757	0,013949	0,454129	0,30027	0,135279	-0,14728	0,281629	0,602757
VENT. VEL	-0,15431	0,160002	0,338358	-0,7128	0,109052	1,13E-08	0,064244	0,07412	0,389216
VENT. DIR	-	-	-	0,636934	0,228038	0,006851	0,211341	0,20751	0,312177
TO	-2,63361	0,35879	4,01E-10	1,868586	0,250858	2,78E-10	-	-	-
VERT	0,266261	0,107501	0,015826	-0,5968	0,071067	5,75E-12	0,091969	0,041016	0,028309

Tabela 7 - Análises de Regressão 2014

Entre os parâmetros morfológicos, a taxa de ocupação apresentou correlações positivas muito fraca 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 ser reflexo da 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 8 - Análises de Correlação dos 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 9 - 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.

## 7. 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 de 8 dos 12 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, tendo contribuído em 9 das 12 regressões realizadas. 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, a 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.

## 8. REFERÊNCIAS

ADLER, F. R., TANNER, C. J. (2015). *Ecosistemas Urbanos*. São Paulo: Oficina de Textos.

ADOLPHE, L. (2001). A Simplified Model of Urban Morphology: Application to an Analysis of the Environmental Performance of Cities. *Environment And Planning B: Planning and Design*, 28 (2), 183-200.

ALBUQUERQUE, Camila Thomé de. (2014). Análise Microclimática em diferentes condições de urbanização, na Baixada de Jacarepaguá, Rio de Janeiro - RJ. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Sociais, Departamento de Geografia e Meio Ambiente, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ASSIS, E. S. D. (2000). Impactos da forma urbana na mudança climática: método para previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano. São Paulo. Tese de doutorado em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de São Paulo.

BAIK, J. J., KIM, J. J. (2002). On the escape of pollutants from urban street canyons. *Atmospheric Environment*, 36(3), 527-536.

BAIR, C. (2002). *Química Ambiental*. Porto Alegre: Bookman.

BERGHAUSER PONT, M. Y., HAUPT, P. A. (2009). *Space, density and urban form*. TU Delft: Delft University of Technology.

BERTAUD, A., MALPEZZI, S. (2003). The spatial distribution of population in 48 world cities: Implications for economies in transition. *World Bank Report*.

CARSLAW, D. C. (2005). Evidence of an increasing NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> emissions ratio from road traffic emissions. *Atmospheric Environment*, 39(26), 4793-4802.

CARVALHO, V. S. B. (2006). *Meteorologia da Qualidade do Ar no que tange as Concentrações de ozônio e dos óxidos de nitrogênio na Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CARVALHO, V. S. B., WALDHEIM, P. V., MAIA, L. F. P. G. (2000). Avaliação das parcelas de inaláveis no material particulado coletado pela FEEMA na Bacia Aérea III da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu-Paraná. Agosto. 2045-54.

CASTRO, H. A., GOUVEIA, N. (2003). Questões metodológicas para a investigação dos efeitos da poluição do ar na saúde. *Revista Brasileira de epidemiologia*, 6(2) p.135-149.

CHAKRABARTI, V. (2013). *A country of cities: a manifesto for an urban America*. New York: Metropolis Books.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO (DENATRAN). (2016). Departamento Nacional de Trânsito: Frota. By Ministério das Cidades, 2016. Retirado de <http://www.denatran.gov.br/frota.htm> (Acesso em: 29/01/2016).

DUARTE, D. H. S., SERRA, G. G. (2003). Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental brasileira: correlações e proposta de um indicador. *Ambiente construído*, 3(2), 7-20.

DUCHIADE, M. P. (1992). Poluição do ar e doenças respiratórias: uma revisão. *Cad Saúde Pública*, 8(3), 311-30.

ECHENIQUE, M. H., HARGREAVES, A. J., MITCHELL, G., NAMDEO, A. (2012). Growing cities sustainably: does urban form really matter? *Journal of the American Planning Association*, 78(2), 121-137.

EWING, R., CERVERO, R. (2001). Travel and the built environment: a synthesis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1780), 87-114.

Environmental Protection Agency (EPA).(1999) U.S.Handbook for criteria Pollutant Inventory Development: A Beginner's Guide for Point and Area Sources,September,1997.

FARIAS, H. S. (2012) Espaços de risco à saúde humana na região metropolitana do Rio de Janeiro: um estudo das trajetórias de poluentes atmosféricos do Arco Metropolitano, CSA e COMPERJ. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade Federal Fluminense, Niterói. 149p.

FARIAS, Heitor Soares de. (2013). Bacias Aéreas: uma proposta metodológica para o estudo da qualidade do ar em áreas influenciadas pelo relevo. *Revista Brasileira de Climatologia*, 12, 48-60.

FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente. (2004) Inventário de fontes emissoras de poluentes atmosféricos da região metropolitana do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: FEEMA. 26p.

FERREIRA, Marcio Santos. (2005). Simulação do Transporte de Poluentes Atmosféricos na Bacia Aérea III da Região Metropolitana do Rio de Janeiro Via o Modelo AERMOD. 211 f. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FRANK, L. D., et al.(2006). 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*, 72(1), 75-87.

FRENKEL, A., ASHKENAZI, M. (2008). Measuring urban sprawl: how can we deal with it? *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35(1), 56-79.

GALSTER, G. et al.(2001). Wrestling sprawl to the ground: defining and measuring an elusive concept. *Housing policy debate*, 12(4), 681-717.

GALLOWAY, J. N. (1996). Anthropogenic mobilization of sulphur and nitrogen: Immediate and delayed consequences. *Annual review of energy and the environment*, 21(1), 261-292.

GARCÍA, F. F. (1996).Manual de climatologia aplicada: clima, medio ambiente y planificación. Madrid: Editorial síntesis, S.A. 285p.

GERJ - GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. (2015) INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). Portal do INEA. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/>. (Acesso em: 22/12/2015).

GIVONI, B. (1992) Comfort climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, 18(1), 11-23.

GRAEDEL,T.E.,CRUTZEN,P.J. (1997). Atmospherere Climate and Change. New York: Scientific American Library,.

HOLLAND, W. W. (1979). Health effects of particulate pollution: reappraising the evidence. *American Journal of Epidemiology*, 110(5), 525-659.

HOLANDA, F. Uma Ponte para Urbanidade. (2002) R. B. Estudos Urbanos e Regionais, 5, 59-76.

HORSTMAN, D., HAZUCHA, M., HAAK, E., STACY, R. (1982). Effects of submicronic sulfuric acid aerosol on human pulmonary function. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 37(3), 136-141.

HUANG, J., LU, X. X., SELLERS, J. M. (2007). A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing. *Landscape and urban planning*, 82(4), 184-197.

INEA - INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. (2015). Relatório da Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro: Ano base 2012. Rio de Janeiro: INEA.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (2015). Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/>. (Acesso em: 01/12/2015).

LANDSBERG, H.E. (1997). The urban climate. New York: Academic Press.276p.

- LARRAÑAGA, A. M., Ribeiro, J. L. D., & Cybis, H. B. B. (2009). Fatores que afetam as decisões individuais de realizar viagens a pé: estudo qualitativo. *Revista TRANSPORTES*, 17(2).
- LARRAÑAGA, A. M. TEN CATEN, C. CYBIS, H. (2009). Relação entre Estrutura Urbana e Padrão de Viagens a Pé. (<http://www.cbtu.gov.br/monografia/2009/trabalhos>).
- LEE, D. O. (1979). The influence of atmospheric stability and the urban heat island on urban-rural wind speed differences. *Atmospheric Environment* (1967), 13(8), 1175-1180.
- MAIA, L. F. P. G. (2005). 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). Tese de Doutorado em ciências sociais. IGEO/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MANLEY, G. (1958). On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 84 (359): 70-72.
- MARTINS, C. R. et al. (2003). Ciclos globais de carbono, nitrogênio e enxofre. *Cadernos temáticos de Química Nova na Escola—Química, Vida e Ambiente*, 28-41.
- NETTO, V. D. M., VARGAS, J. C. B., SABOYA, R. T. D. (2012). (Buscando) os efeitos sociais da morfologia arquitetônica. *Urbe: revista brasileira de gestão urbana*. Paraná. Vol. 4, n. 2 (jul./dez. 2012), p. 261-282.
- NEWMAN, P. W., KENWORTHY, J. R. (1989). Gasoline consumption and cities: a comparison of US cities with a global survey. *Journal of the American Planning Association*, 55(1), 24-37.
- OJIMA, R. (2007). Dimensões da urbanização dispersa e proposta metodológica para estudos comparativos. *Revista Brasileira de Estudos Populacionais*, 24 (2), 277-300.
- OLIVEIRA, J. (2004). Análise espacial e modelagem atmosférica: contribuições ao gerenciamento da qualidade do ar da bacia aérea III da região metropolitana do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Tese de Doutorado—COPPE—Universidade Federal do Rio de Janeiro, 144p.
- OKE, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*. New York: Routledge.
- PAIM, D. T.; FARIA, A. P. N. (2014) O que a medida de acessibilidade descreve da morfologia urbana. In: XVI ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFPEL. Pelotas.
- PAN, Hansheng et al. (2010). Influence of Urban Morphology on street level concentrations: water channel and field study in three southern Californian cities. 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. (2014). Caracterização do regime de vento em superfície na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. *Eng. sanit. ambient*, 19(2), 121-132.
- PIRES, D. O. (2005). Inventário de emissões atmosféricas de fontes estacionárias e sua contribuição para a poluição do ar na região metropolitana do Rio de Janeiro. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- RIBEIRO, S.K.; COSTA, C.V.; DAVID, E.G.; REAL, M.V.; DÁGOSTO, M.A. (2000). *Transporte e Mudanças Climáticas*. 1ª ed. Rio de Janeiro: Mauad.
- RIBEIRO, R.J. C. (2009) Índices de Qualidade Configuracional Urbana. In: XIII Encontro da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional, Florianópolis: Enanpur, p. 1 - 21.
- ROBAA, S. M. (2003). Urban-suburban/rural differences over Greater Cairo, Egypt. *Atmosfera*, 16(3), 157-171.

ROCHA, S. J. J. (2014) Compacidade Urbana e arquitetônica como indicador de sustentabilidade. In: III Congresso Internacional Sustentabilidade e Habitação de Interesse Social, Porto Alegre. Anais eletrônicos. Porto Alegre: Edipucrs.

SALAT, S. (2009). Energy loads, CO2 emissions and building stocks: morphologies, typologies, energy systems and behaviour. *Building Research & Information*, 37(5-6), 598-609.

SALVAÇÃO, J. L. (2012) Relação entre a dispersão urbana e os custos de saneamento básico: Análise paramétrica com base nos municípios de Portugal Continental. 68 f. Dissertação de Mestrado, Curso de Sistemas de Informação Geográfica, Universidade de Trás-os- Montes e Alto Douro, Vila Real.

SIMON, L. (2001). Heavy metals, sodium and sulphur in roadside topsoils and in the indicator plant chicory (*Cichorium intybus* L.). *Acta Agronomica Hungarica*, 49(1), 1-13.

SORENSEN, P. (2009). Moving Los Angeles. *ACCESS Magazine*, 1(35).

TÂNGARI, V. R. et al. (2011). Morfologia Urbana, Suporte Geo-Bio Físico e o Sistema de Espaços Livres no Rio de Janeiro. En: CAMPOS, Ana Cecília Arruda et al (org.). *Quadro dos sistemas de Espaços livres nas cidades brasileiras*. São Paulo: FAU USP.

TORRENS, P. M. (2008). A toolkit for measuring sprawl. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 1(1), 5-36.

TSAI, Y. H. (2005). Quantifying urban form: compactness versus 'sprawl'. *Urban studies*, 42(1), 141-161.

XIU, A., PLEIM, J. E. (2001). Development of a land surface model. Part I: Application in a mesoscale meteorological model. *Journal of Applied Meteorology*, 40(2), 192-209.