

## Redes Complexas aplicadas às Redes de transporte Urbano - Coleta de Dados e Caracterização

### Complex Networks Applied to Urban Transport Networks - Data Gathering and Characterization

#### RESUMO

Interação e complexidade estrutural estão entre as principais características de Sistemas Complexos tais como o espaço urbano. Nesse contexto, nosso objetivo é aplicar os conceitos de Redes Complexas e suas ferramentas computacionais já estabelecidas para estudar e caracterizar redes de transporte urbano, isto é, as redes formadas pelas ruas das cidades. Para isso utilizamos softwares (OSMnx) e base de dados (OpenStreetMaps) de acesso livre. O objetivo é realizar um estudo quantitativo que seja prático, factível e que possa ser útil para o planejamento urbano da cidade. Como estudo de caso caracterizaremos a rede do transporte urbana da cidade de Pato Branco, assim demonstrando que uma ferramenta da Física Estatística pode ser aplicada para fazer a ligação entre o conhecimento acadêmico e a comunidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Redes Complexas. Rede de vias Urbanas. Complexidade.

#### ABSTRACT

Interactions and structural complexity are among the main features of Complex Systems, such as the urban space. In this context, our goal is to apply the concepts of Complex Networks and their already established computational tools to study and characterize urban transport networks, i.e., the networks formed by city streets. For this, we use open-access software (OSMnx) and database (OpenStreetMaps). The objective is to perform a quantitative study that is practical, feasible, and useful for the urban planning of a city. As a case study, we characterize the urban transport network of Pato Branco, thus demonstrating that a tool of Statistical Physics can be applied to make the connection between academic knowledge and the community.

**KEYWORDS:** Complex networks. Urban road network. Complexity.

**Joana Dafre**  
[joanadafre@alunos.utfpr.edu.br](mailto:joanadafre@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná, Pato Branco,  
Paraná, Brasil

**Angel Akio Tateishi**  
[angeltateishi@utfpr.edu.br](mailto:angeltateishi@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná, Pato Branco,  
Paraná, Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2019.

**Aprovado:** 01 out. 2019.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

A teoria de *Redes Complexas* é uma das ferramentas que a *Física Estatística* utiliza para estudar *Sistemas Complexos*, principalmente sistemas sociais. Com seus métodos e métricas, essa ferramenta nos ajuda identificar características e comportamentos não-triviais a partir das interações entre os componentes de uma rede. Redes Complexas representam um caso intermediário entre as redes totalmente organizadas e redes totalmente aleatórias; podem ter um número elevado de vértices e arestas, além de características e padrões não-triviais, cuja a obtenção depende da aplicação de técnicas algorítmicas.

Quando aplicada às *malhas viárias urbanas*, as redes complexas descrevem fatores relacionados ao deslocamento de indivíduos, à localização e alocação de serviços, à melhoria de funções logísticas, e até, ao estudo de fatores advindos do comportamento coletivo [1]. É uma ferramenta para descrever "morfologia" urbana, ou seja, possibilita obter características e propriedades de maneira formal e objetiva, com a finalidade de otimizar suas funções e proporcionar designs que sejam adaptáveis às perturbações. Assim é possível estudar como as estruturas físicas construídas por nós humanos influenciam tanto o ambiente quanto as interações entre pessoas. Pois através da coevolução, os seres humanos moldam suas cidades e bairros e, por sua vez, são moldados por eles [2]. Os padrões físicos resultantes compõem a forma urbana e podem ser estudados em termos das características da rede, possibilitando analisar a resiliência, a robustez e a capacidade adaptativa dos sistemas complexos urbanos e como eles respondem à perturbação, dados seus padrões espaciais, estrutura, conectividade e eficiência. Isso fornece uma base para tomada de decisão urbana, design e planejamento de intervenções [3].

Nesse contexto, com a finalidade de demonstrarmos a pesquisa realizada e a aplicabilidade prática da Teoria das Redes Complexas no estudo de vias urbanas, escolhemos a cidade de Pato Branco como estudo de caso. O objetivo é demonstrar que uma ferramenta da Física Estatística pode ser aplicada para fazer a ligação entre o conhecimento acadêmico e a comunidade.

Esse trabalho está organizado como segue: Metodologia, que apresenta as ferramentas utilizadas e como foram obtidos os parâmetros; Resultados onde se tem os parâmetros, os valores obtidos e as explicações e interpretações, juntamente com os grafos necessários; Conclusão com o fechamento do presente trabalho e as futuras perspectivas de pesquisa e aplicação prática.

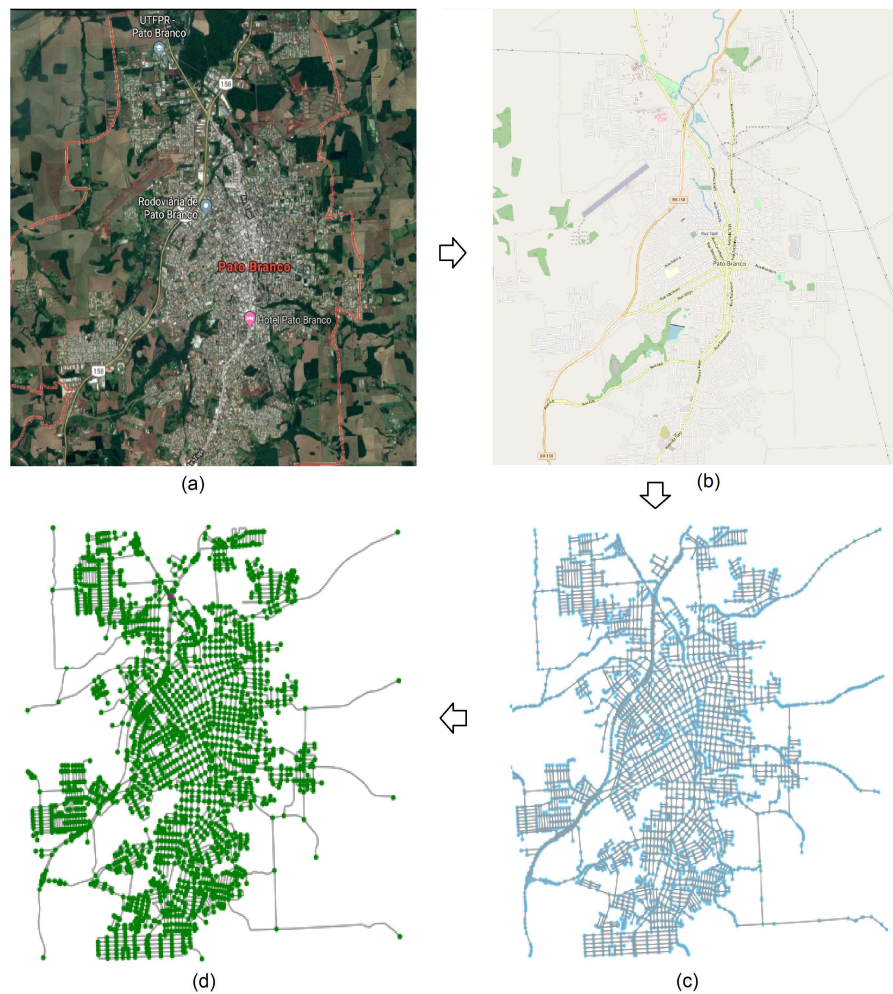
## METODOLOGIA

A caracterização e o entendimento da estrutura de uma rede complexa são baseados em seus parâmetros. Para estudar e caracterizar as redes de transporte urbano de cidades aprendemos utilizar a ferramenta *OSMnx* (desenvolvida na linguagem Python), que opera com dados do *OpenStreetMap* para modelar a rede complexa de vias urbanas. Enfatizando que todas essas ferramentas são de uso livre e gratuito. O *OSMnx* é usado para criar a rede complexa das ruas de uma cidade a partir da rede primal, que é rede planar onde os cruzamentos das ruas e os becos sem saída são os *nós (interseções)* da rede complexa e a seção da rua que liga dois *nós* são as arestas (*links*) da rede complexa [4]. Quando uma rede é criada a partir do *OpenStreetMap* ela apresenta nós que não são nós na teoria da rede complexas. Assim a rede precisa ser simplificada para que os nós na rede criada sejam adequados, que serão chamados de interseções [5]

Após isso é possível: calcular os parâmetros de rede complexa para a rede da cidade; saber se as ruas são unidirecionais ou bidirecionais; construir diagramas para demonstrar a acessibilidade das pessoas a nós da rede partindo do centro da mesma, diferenciando o tipo de via e a velocidade; construir redes para mostrar a centralidade de cada nó da rede

e saber a proporção de quantas ruas passam pelas interseções. Em particular, consideramos uma região de 4000 metros de raio da cidade Pato Branco (Figura-1a), a partir do centro da mesma, pois é a parte mais urbanizada e mais centralizada da cidade. Utilizamos os dados do *OpenStreetMap* (Figura-1b), que são de uso livre, o que não acontece com as imagens de satélite (onde somente a visualização é permitida). Assim obtivemos a rede de vias urbanas de Pato Branco (Figura-1c), a qual passou por uma simplificação (Figura-1d) para que os parâmetros sejam calculados a partir de nós que sejam interseções e becos sem saída.

Figura 1 – Procedimento de construção da rede das vias urbanas de Pato Branco



Fonte: Autoria própria (2019).

## RESULTADOS

A caracterização da rede complexa referentes às vias urbanas da cidade de Pato Branco, em termos de diversos parâmetros da rede está demonstrada abaixo no quadro 1. Esses parâmetros foram obtidos utilizando a ferramenta *OSMnx*.

**Quadro 1** – Caracterização da Rede de vias urbanas da cidade de Pato Branco

Parâmetros de rede	Valores Obtidos	Significado dos Parâmetros
n	4534	Número de nós na rede
m	10234	Número de arestas na rede
Média de nós	4,51	Número médio de bordas de entrada e saída incidentes nos nós
Número de interseções	4144	Número de interseções na rede
Média de ruas por nó	2,52	Número médio de ruas físicas que emanam de cada nó (interseções e becos sem saída)
Comprimento total de arestas	794398,41	Soma dos comprimentos de aresta na rede (metros)
Comprimento médio de arestas	72,62	Comprimento médio da aresta na rede (metros)
Comprimento total de rua	414409,36	Soma dos comprimentos de aresta na representação não direcionada de rede
Comprimento médio de rua	72,58	Comprimento médio da aresta na representação não direcionada da rede (metros)
Área	60787599	Área da rede em metros quadrados
Densidade de nó	74,59	n dividido por área em quilômetros quadrados
Densidade de interseções	68,17	Interseções dividido por área em quilômetros quadrados
Densidade de arestas	13068,43	Comprimento total da aresta dividido pela área em quilômetros quadrados
Densidade de rua	6817,33	Distância total da rua dividida por área em quilômetros quadrados
Média de grau de vizinhança média	2,50	Média de todos os graus médios de vizinhança na rede
Média Grau de vizinhança ponderado médio	0,09	Média de todos os graus de vizinhança média ponderada na rede
Grau médio de centralidade	0,001	Média de todas as centralidades de grau na rede
Coeficiente de agrupamento ponderado médio	3,07	Média dos coeficientes de agrupamento ponderados de todos os nós na rede
Diâmetro	14063,17	Excentricidade máxima de qualquer nó na rede;
Raio	7111,21	Excentricidade mínima de qualquer nó na rede
Centralidade de proximidade média	0,01	Média de todas as centralidades de proximidade de todos os nós na rede
Centralidade de distância media	0,01	Média de todas as centralidades de intermediação de todos os nós na rede

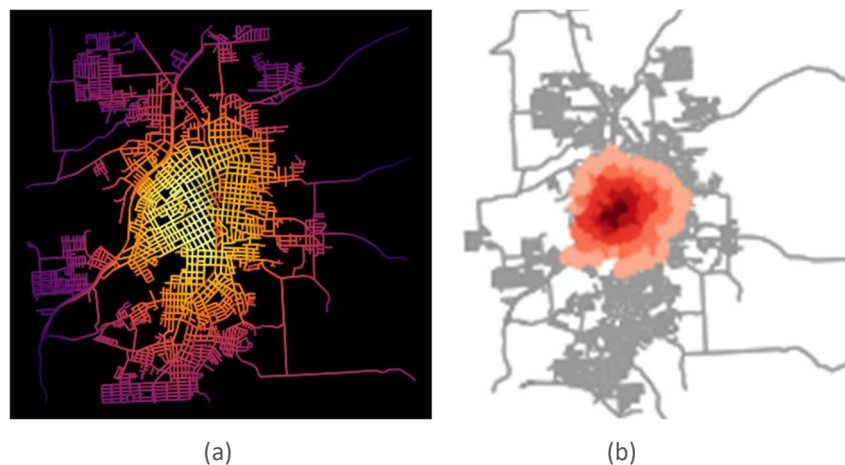
Fonte: Autoria própria (2019).

A *conectividade* mede o número mínimo de nós ou arestas que devem ser removidos de um gráfico conectado para desconectá-lo. É uma medida de resiliência, pois redes complexas com alta conectividade fornecem mais opções de roteamento aos agentes e são mais robustas contra falhas. As distâncias, os graus e a conectividade da rede são significativamente restringidos pela inserção espacial e pela planaridade aproximada. Outras medidas de conectividade, como *densidade de interseção*, *distribuição de graus de nós* e *centralidade (agrupamento)* capturaram melhor a natureza da conectividade. Redes com baixa conectividade podem ter múltiplos pontos singulares de falha, deixando o sistema particularmente vulnerável às perturbações. Isso pode ser visto no design urbano através de permeabilidade e pontos de estrangulamento: se a circulação for forçada através de pontos singulares de falha, podem ocorrer engarrafamentos e as redes de circulação podem falhar. A conectividade também tem sido associada ao volume de pedestres da rede de ruas [5].

Por sua vez, a *centralidade* indica a importância dos nós em uma rede (Figura-2a). Este é um indicador de resiliência: as redes com uma centralidade de máxima interferência são mais propensas a falhas ou ineficiências, caso esse ponto de estrangulamento singular falhe. A *centralidade média de distância* é a média de todas as centralidades de intermediação na rede e é usada para identificar intervenções *top-down* versus auto-organização *bottom-up* e evolução do tecido urbano. A *centralidade de proximidade* representa, para cada nó, o recíproco da soma da distância deste nó a todos os outros na rede: isto é, os nós se classificam como mais centrais se estiverem, em média, mais próximos de todos os outros nós.

Também é possível analisar a partir de um local da rede quais interseções são atingidas com maior rapidez, identificando o tipo de via desejada e a velocidade média. Por exemplo, na Figura-2b consideramos uma pessoa caminhando a uma velocidade média de 4,5Km/h em vias do tipo “walk” (que possibilitam a passagem de pedestres).

Figura 2 – (a) Grafo da centralidade de proximidade para todos nós da rede de Pato Branco. Quanto mais próximo de um amarelo claro “maior” é a “centralidade” do nó; quanto mais próximo do violeta, “menor” é o valor da centralidade do nó.(b) Grafo de facilidade de acesso de pedestres. Quando é o vermelho mais escuro da escala de cores, indica o tempo de caminhada de até 5 min (o menor tempo), e o vermelho mais claro o de até 25min (o maior tempo).



Fonte: Autoria própria (2019).

## CONCLUSÕES

Neste estudo demonstramos como construir a rede de vias urbanas de uma cidade utilizando a ferramenta desenvolvida em Python denominada OSMnx, sendo os dados são obtidos do OpenStreetMaps. Após construída a rede complexa é possível obter vários parâmetros que a caracterizam. Como caso de estudo construímos e analisamos a rede de vias urbanas da cidade de Pato Branco - PR. Para uma região de raio de 4000 metros da cidade obtemos a contagem de 4534 nós e 10234 arestas (conexões entre nós). Por mais trivial que isso pareça, realizar tal contagem manualmente seria uma tarefa demorada, principalmente para grandes centros urbanos. Outros parâmetros que caracterizam dimensões espaciais da rede estão no quadro 1. Destacamos a centralidade de proximidade, (ver Figura-2a) que nos permite observar que a região cujos os nós possuem a maior centralidade é a região central da cidade. Tal resultado de certa maneira é esperado pois trata-se de uma rede em que a distância entre nós é uma distância física. Contudo, um resultado não trivial obtido foi que as vias consideradas centrais pelo senso comum não são as que apresentam a maior centralidade de proximidade. Com tais informações é possível saber quais são as intersecções mais importantes e que se fossem bloqueadas causariam problemas de acesso à outras regiões da cidade. Além disso, ao analisar o acesso de pedestres a partir do ponto central da cidade de Pato Branco, é possível ver que o acesso não é uniforme em todas as direções cardeais. Portanto muitos bairros são de difícil acesso por pedestres e somente a região central de maior centralidade tem melhor acessibilidade. Esses são exemplos de possíveis análises a partir da rede obtida.

De fato, a vantagem dessa abordagem computacional é a otimização da obtenção dos dados e a possibilidade de uma análise baseado em ferramentas já estabelecidas no estudo de Sistemas Complexos. Uma caracterização quantitativa das vias urbanas pode ser extremamente útil para guiar decisões de planejamento urbano, pois problemas complexos exigem ferramentas complexas para resolvê-los. De acordo com essas perspectivas de aplicação desse estudo, o próximo passo será automatizar o procedimento de obtenção e caracterização de dados para analisarmos e compararmos as redes de transporte urbano de diversas cidades.

## REFERÊNCIAS

[1]Spadon G., Scabora L.C., Nesso-Jr, M.R. Traina-Jr C., Rodrigues-Jr J.F. Caracterização topológica de redes viárias por meio da análise de vetores de características e técnicas de agrupamento. **SBC 33rd Brazilian Symposium on Databases (SBBDD)**. Rio de Janeiro, 2018.

[2]Boeing, Geoff. 2018. Measuring the Complexity of Urban Form and Design. **URBAN DESIGN International** [1357-5317] Boeing, 2018, v. 23 n.:4, p.:281 -292.

[3]de Roo, G., & Rauws, W. S. Positioning Planning in the World of Order, Chaos and Complexity. In J. Portugali, H. Meyer, E. Stolk, & E. Tan (Eds.), **Complexity Theories of Cities Have Come of Age**, Berlin, 2012, p.:207–220.

[4]Porta, S., Crucitti, P., & Latora, V. The network analysis of urban streets: a primal approach. **Environment and Planning B**, v. 33(5), 2006, p.:705–725.

[5]Boeing, Geoff. OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 65, Set. 2017, p.: 126-139.