

<https://eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2020>

Redes complexas aplicadas às redes de transporte urbano

Complex networks applied to urban transport network

RESUMO

Joana Dafre

joanadafre@alunos.utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

Angel Akio Tateishi

angeltateishi@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

O espaço urbano pode ser estudado com ferramentas da física de sistema complexos, pois é caracterizado por interações não-lineares entre seus inúmeros componentes e pela sua complexidade estrutural. Uma dessas ferramentas é a teoria das redes complexas, a qual empregamos aqui para estudar e caracterizar as redes de transporte do espaço urbano, ou seja, as redes formadas pelas ruas de uma cidade. Utilizando apenas softwares (python, OSMnx) e bases de dados (OpenStreetMaps) de acesso livre, nosso objetivo é realizar um estudo quantitativo que seja prático, factível e que possa ser útil para o planejamento urbano da cidade. Em particular, realizamos a coleta de dados e a caracterização da rede de transporte urbano de algumas cidades que possuem campus da UTFPR. Assim conseguimos determinar quantitativamente a "centralidade" da localização de um campus da UTFPR e como isso é manifestado em suas possíveis rotas de acesso.

PALAVRAS-CHAVE: Redes complexas. Redes de Vias Urbanas. Complexidade. Estrutura de Rota. Acessibilidade Urbana.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

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



ABSTRACT

The urban space can be studied with complex system physics tools, as it is characterized by non-linear interactions between its components and its structural complexity. One of these tools is the theory of complex networks, which we use here to study and characterize as transport networks of urban space, i.e., networks formed by a city's streets. Using only open access software (python, OSMnx) and databases (OpenStreetMaps), our goal is to perform a quantitative study that is practical, feasible, and that can be useful for urban city planning. In particular, we perform the data gathering and characterization of the urban transport network in some cities with UTFPR campuses. Thus, it is possible to quantitatively determine the "centrality" of a UTFPR campus location and how this is manifested in its possible access routes.

KEYWORDS: Complex Networks. Urban Road Network. Complexity. Route Structure. Urban Accessibility.

INTRODUÇÃO

A física estatística tem demonstrado sua versatilidade e importância no estudo de sistemas que se encontram além dos domínios da física tradicional. (MITCHELL, 2009). Destaca-se a sua aplicação em sistemas sociais, principalmente para tentar compreender a dinâmica social de fenômenos coletivos emergentes. (CASTELLANO; FORTUNATO; LORETO, 2009). Nesse contexto, a teoria de rede complexas é uma das mais consolidadas ferramentas da física de sistemas sociais. (ALBERT; BARABÁSI, 2002). Os métodos e métricas dessa ferramenta possibilita identificar características e comportamentos não-triviais a partir das interações entre os componentes de uma rede. Entende-se por redes complexas 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. Com tais características, redes complexas tem se tornado cada vez mais importantes para o estudo da dinâmica e estruturada de cidades. (BARTHELEMY, 2016) (BOEING, 2017a).

Além disso, quando aplicadas 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. (BOEING, 2017a). É uma ferramenta para descrever "morfologia" urbana, possibilitando obter características e propriedades de maneira formal e objetiva. 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. (ROO; RAUWS, 2012). Os padrões físicos resultantes compõem a forma urbana e são 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 perturbações, dados seus padrões espaciais, estrutura, conectividade e eficiência. Isso constitui uma base de informações quantitativa e qualitativa para tomada de decisão urbana, design e planejamento de intervenções. (PORTA; CRUCITTI; LATORA, 2006).

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 as cidades de Pato Branco, Francisco Beltrão, Londrina e Curitiba. Em tais cidades localizam-se um campus da UTFPR. Com a caracterização de rede urbana, em termos de parâmetros de "centralidade", é possível investigar se um dado campus da UTFPR se localiza em uma região de alta ou baixa "conectividade" dentro da rede, e como isso está relacionado as possíveis rotas de acesso ao campus.

Esse trabalho está organizado como segue: Materiais e Métodos, que apresentam 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.

MATERIAL

Todo o trabalho desenvolvido foi baseado na linguagem de programação Python. Em particular, utilizamos a distribuição *Anaconda* (Individual Edition), um projeto open-source que contém a linguagem *Python* e centenas de bibliotecas destinadas a análise de dados. No navegador do *Anaconda* utilizamos o software *Jupyter Notebook*, um ambiente interativo de desenvolvimento de programação no qual utilizamos o Python versão 3.7. Dentro dessa ambiente usamos o software *OSMnx* (criado BOEING (2017b)) para ter acesso a rede de ruas dentro dos limites de cada cidade e, em seguida, calcular vários parâmetros que caracterizam redes complexas. O pacote *OSMnx* é um kit de ferramentas gratuito e de código aberto que utiliza os dados espaciais (incluindo limites municipais e ruas) do *OpenStreetMap*, transformado-os em objetos de teoria de gráfico para análise de rede. (ROO; RAUWS, 2012). (mais detalhes na seção de Métodos). Tais softwares foram utilizados em um computador pessoal com as seguintes configurações: Asus Rog Gaming Strix Hero II ; I7 - 8750H 2.2Hz; 16GB;512 SSD M.2; Placa de Vídeo RTX 2060 6GB.

MÉTODOS

Uma rede complexa pode ser caracterizada e compreendida em termos de seus parâmetros. Para caracterizar as redes de transporte urbano de cidades utilizamos *OSMnx* , que opera com dados do *OpenStreetMap* para modelar a rede complexa de vias urbanas. 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. (PORTA; CRUCITTI; LATORA, 2006). 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. (BOEING, 2017b). Seguidamente ao tratamento de dados, com a rede formada é possível calcular os parâmetros sobre a rede. Em particular, utilizaremos o closeness centrality (centralidade de proximidade), o qual também pode ser usado para obter outros parâmetros de rede (como o betweenness centrality); e construiremos diversas rotas entre localização de um campus da UTFPR e pontos distribuídos na rede. A seguir explicamos com mais detalhes tais procedimentos.

De acordo com NEWNAN (2010), esse parâmetro de centralidade é uma relacionada com a distância média de um vértice (intersecção entre ruas no nosso caso) em relação a todos os outros vértices da rede. Para definir tal parâmetro, é necessário utilizar também o caminho geodésico, d_{ij} , considerando o menor caminho topológico através da rede entre os vértices i e j . A média

dessa distância geodésica a partir do vértice i até j , considerando todos os vértices j da rede é dada por

$$l_i = \frac{1}{n} \sum_j d_{ij}. \quad (1)$$

Quanto menor essa média, mais "conectado" é o vértice, quanto menor a média, menos conectado ele é. A centralidade de proximidade é então definida como o inverso de l_i , ou seja

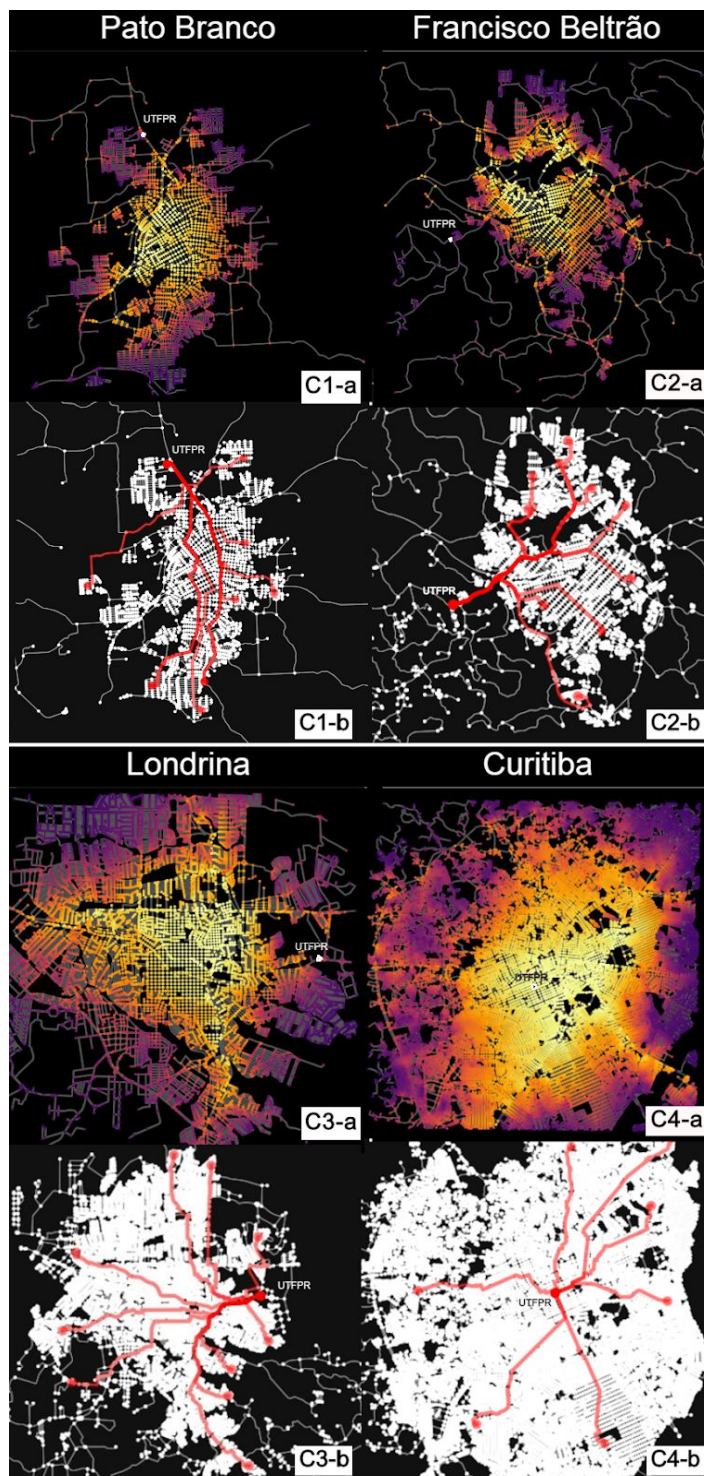
$$C_i = \frac{1}{l_i} = n / (\sum_j d_{ij}). \quad (2)$$

Dessa forma, quanto maior o valor de C_i , maior é a importância dele na rede. No caso da rede de vias urbanas, isso significa que a partir determinada interseção entre ruas (vértice) é possível chegar em várias outras ruas percorrendo na média menos intersecções do que no caso no qual C_i tem um valor baixo. Para ilustrar esses valores, nas redes utilizaremos um mapa de cores: para cada vértice da rede quanto maior o valor de C_i mais próximo de amarelo claro; quanto menor o valor de C_i mais próximo de roxo.

Por sua vez, as rotas serão obtidas da seguinte maneira. Podemos encontrar a interseção mais próxima da localização geográfica do ponto de interesse em uma via, como por exemplo a entrada do campus da utfpr Pato Branco cuja as coordenadas são $26^{\circ}11'47.4''S$ $52^{\circ}41'19.9''W$. Onde a interseção será o ponto de menor distância Haversine das coordenadas de interesse, e será representada por um número de referência para o grafo (mapa da cidade). A distância Haversine calcula a distância entre dois pontos numa esfera, e é calculada do ponto de interesse até os as intersecções de rede na redondezas, o ponto com menor distância ao ponto de interesse será a interseção cujo ID (número de referência) usado usado para se referir aquelas coordenadas. Com o número de referência dos pontos podemos obter a rota de menor distância entre dois pontos, desse modo tomando como destino uma das sedes UTFPR (universidade tecnológica federal do paraná) e como partidas pontos de periferia da cidade, obtemos um gráfico de rotas da cidade sede.

RESULTADOS

Figura 1 – Os Grafos, C1-a,C2-a,C3-a,C4-a, se refere ao grafo de closeness-centrality. Os Grafos C1-b, C2-b, C3-b, C4-b se refere a rotas, com destino a UTFPR do câmpus Pato Branco (C1), câmpus de Francisco Beltrão(C2), câmpus de Londrina(C3), e do câmpus de Curitiba(C4).



Fonte: Autoria Própria (2020).

Para as redes complexas das vias urbanas das cidades de Pato Branco, Francisco Beltrão, Londrina e Curitiba, calculamos o valor da centralidade de proximidade para cada um dos vértices das redes. Além disso, em cada cidade fixamos a localidade do respectivo campus da UTFPR e fizemos diversas rotas entre a UTFPR e diversos pontos distantes em aproximadamente dez quilômetros. Esses resultados estão todos representados na Figura 1. Em particular, para cada cidade fizemos dois gráficos, o gráfico "a" demonstra a centralidade de cada vértice na rede da cidade; e o gráfico "b", representa as rotas entre diversos pontos e o campus da UTFPR.

DISCUSSÃO

É importante começar ressaltando que a centralidade de um vértice é um parâmetro topológico, isto é, não é baseado na distância geométrica entre dois vértices, mas sim no número de vértices (conexões) "percorridos" entre dois vértices. Como a rede de vias urbanas é uma rede física e com distâncias geométricas, as regiões com maior centralidade (cor amarela claro) podem coincidir com regiões centrais do mapa. Contudo, é possível observar na Figura 1 - gráficos "a", que existem intersecções nas extremidades geométricas do mapa que possuem uma centralidade maior do que em regiões mais próximas do centro geométrico da rede.

Assim podemos ver como existe uma grande diferença no valor do *closeness-centrality* nas diferentes sedes da UTFPR, como pode ser visto na Figura-1 "a". No campus UTFPR Curitiba tem um *closeness-centrality* com valor altíssimo (amarelo claro) para essa rede onde ele está localizado o que indica que vai existir uma variedade muito mais de rotas passando por aquele pontos. E também as rotas melhores rotas vindas das bordas da cidade raramente se sobreponham, o que é visto na Figura- 1 "b". O oposto é visto nos campus de Pato Branco e Francisco Beltrão, ambos apresentam um valor de *closeness-centrality* (roxo), o que para o campus de pato branco indica uma variabilidade rotas baixa e uma grande sobreposição de rotas, existindo 3 principais rotas para utfpr que fazem parte de grande partes das rotas indicadas na figura 1 "b". Já no campus de Francisco Beltrão além da sobreposição de rotas ainda há a baixíssima resiliência do ponto onde se localiza a entrada para sede da UTFPR, a baixa resiliência vem do fato que se retirado algum ponto nas "proximidades" algumas das rotas se inviabilizam ou há o desmembramento do campus de Francisco Beltrão da cidade , ainda é possível "ilhar" com a retirada de 3 outros vértices que não precisam ser adjacentes ao ponto sede da UTFPR.

CONCLUSÃO

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 estudo de caso construímos e analisamos a rede de vias urbanas das cidades: de Pato Branco - PR; Francisco Beltrão-PR; Londrina-PR, Curitiba-BR. Para cada cidade

contrimos grafos de centralidade de proximidade e mapa de rotas das bordas das cidades até a sede do campus da UTFPR da respectiva cidade.

A Partir das informações obtidas podemos observar as rotas de resultado de sobreposição de outras rotas , o que significa que vai ser uma rota com maior movimentação de carros, pessoas , mercadorias, e desse modo fazer planejamento das ruas, sugerir e facilitar circulação por outras rotas.

A centralidade de proximidade também pode indicar se o ponto pode ficar isolado facilmente em caso de desastres como enchentes, terremotos, incêndio. O que pode facilitar as medidas de precauções, criação de rotas de fuga, e rota de ações de profissionais como policiais e bombeiros ao atuar nessas áreas e também a localização de entrepostos desses profissionais.

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 aprofundar o conhecimento nas ferramentas de rede complexa e na linguagem python com a finalidade de conseguir análises que possam resolver problemas práticos de desenvolvimento urbano.

REFERÊNCIAS

ALBERT, R.; BARABÁSI, A.-L. (2002). *Statistical mechanics of complex networks*. *Reviews of Modern Physics*, 74(1), 47–97. doi:10.1103/revmodphys.74.47 .Disponível em: <https://arxiv.org/abs/cond-mat/0106096> . Acesso em: 08 abr. 2020.

BARTHELEMY, M. (2016). *The Structure and Dynamics of Cities: Urban Data Analysis and Theoretical Modeling*. Cambridge: **Cambridge University Press**. doi: 10.1017/9781316271377 . Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/structure-and-dynamics-of-cities/50359353B081D0A38928961FE16FB2FD> . Acesso em: 28 out. 2019.

BOEING, G., Methods and Measures for Analyzing Complex Street Networks and Urban Form (2017a) . <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3012684> .Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=301268 . Acesso em: 17 jan. 2019.

BOEING, G. OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 65, Set. 2017b, p.: 126-139. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/309738462_OSMnx_New_Methods_for_Acquiring_Constructing_Analyzing_and_Visualizing_Complex_Street_Networks . Acesso em: 27 dec. 2018.

CASTELLANO, C.; FORTUNATO, S.; LORETO, V. (2009). *Statistical physics of social dynamics*. **Reviews of Modern Physics**, 81(2), 591–646.

doi:10.1103/revmodphys.81.591 .Disponível em:

<https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.81.591#fulltext> .

Acesso em: 15 mar. 2020.

MITCHELL, M. *Complexity: a guided tour*. **New York: Oxford University Press**, 2009.

NEWMAN, M.(2010). *Networks*. doi:

10.1093/acprof:oso/9780199206650.001.000. Disponível em:

<https://oxford.universitypressscholarship.com/view/10.1093/acprof:oso/9780199206650.001.0001/acprof-9780199206650> . Acesso em: 15 jan. 2020

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.

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.