

08 a 11 de Outubro de 2018  
Instituto Federal Fluminense  
Búzios - RJ

## CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DA MALHA VIÁRIA URBANA DE SANTARÉM/PA UTILIZANDO MEDIDA DE CENTRALIDADE POR INTERMEDIÇÃO EM TEORIA DOS GRAFOS

**Gabriela Cacilda Godinho dos Reis**<sup>1</sup> – gabihgodinho@gmail.com

**Rodolfo Maduro Almeida**<sup>2</sup> – rodolfomaduroalmeida@gmail.com

<sup>1</sup> Universidade Federal do Oeste do Pará – Santarém, PA, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal do Oeste do Pará, ICED - Santarém, PA, Brasil

**Resumo:** *Redes complexas são analisadas utilizando a Teoria dos Grafos, a área da matemática que estuda as relações entre objetos de um determinado conjunto, empregando o conceito de grafo. Diversos aspectos do mundo real podem ser representados por redes a partir de analogias para fins específicos. Dados georreferenciados de uma malha viária urbana podem ser convertidos em um grafo, onde os vértices são os cruzamentos e as arestas são os caminhos entre estes. O uso do ambiente de computação estatística R, possibilita alcançar a medida de centralidade de intermediação de um vértice ou aresta. Esta centralidade atribui importância a um vértice ou aresta em função da passagem de fluxo por ele para interligar outros dois vértices ou arestas da rede, através do menor caminho possível. Quanto mais central é um vértice ou aresta, maior é o número de vértices ou arestas possíveis de se atingir com maior rapidez ou facilidade. Neste sentido e considerando a expansão urbana não organizada, somada ao crescente uso de veículos motorizados, que têm gerado cenário de congestionamento e difícil mobilidade nas vias urbanas de Santarém, se propôs a utilização da medida de centralidade por intermediação para caracterização e análise da malha viária urbana de Santarém, Pará.*

**Palavras-chaves:** *Teoria dos Grafos, Centralidade de Intermediação, Malha Viária Urbana.*

### 1. INTRODUÇÃO

O conjunto das vias dentro do perímetro urbano de um município ao ser classificado e hierarquizado conforme um dado critério funcional é chamado de malha viária urbana. Uma malha pode ser representada matematicamente por um grafo. Utilizado para descrever a estrutura topológica de uma rede, um grafo é constituído por um conjunto de pontos, denominados nós ou vértices, conectados por linhas que expressam a relação entre eles, denominadas arestas (Freitas, 2010). No contexto deste trabalho, os cruzamentos são os vértices e os caminhos entre os cruzamentos são as arestas.

A malha viária de estudo foi a do município de Santarém, estado do Pará. Pelo IBGE é considerada uma cidade média. Localiza-se estrategicamente à margem direita do rio Tapajós, na confluência com o rio Amazonas. Em uma posição intermediária entre duas capitais amazônicas, Belém e Manaus, Santarém se solidificou como entreposto comercial. Depois do processo de abertura de rodovias nas décadas de 1960 e 1970 teve seu processo de urbanização muito acelerado e seu papel de centro polarizador do Baixo Amazonas reforçado.

Em seu processo de expansão ficou evidente o surgimento de numerosos e populosos bairros, em geral, caracterizados por infraestrutura e serviços precários, como ruas sem pavimentação e má alocação de transporte público (Serppa, 2002). A soma desta expansão urbana não organizada, crescente uso de veículos motorizados, planejamento urbano deficiente e a dificuldade de adaptação da infraestrutura das vias a crescente demanda, têm gerado cenário de congestionamento e difícil mobilidade nas vias urbanas.

A caracterização e análise da malha viária urbana de uma cidade para diversos estudos, entre eles a verificação de seus elementos mais importantes ou centrais é possível através da Teoria dos Grafos. Há diferentes maneiras de avaliar a importância de determinado elemento em uma rede, conceito refletido na palavra centralidade. Dentro da Teoria dos Grafos há diversas métricas de centralidade, como a centralidade de grau, centralidade de proximidade e a centralidade de intermediação (Benício, 2013).

A centralidade por intermediação está relacionada com a importância estrutural que um nó ou aresta possui dentro de uma rede, tomando como critério a proporção de caminhos mínimos entre todos os pares de nós que passam por este nó ou aresta (Guedes, 2013). É indicadora de influência, de maior ou menor tráfego permitido, consequência sobre os outros, caso ocorra remoção, alteração ou interrupção (Cohen & Havlin, 2010). Neste trabalho a centralidade por intermediação foi utilizada para caracterização e análise da atual malha viária urbana da sede de Santarém, estado do Pará.

## 2. TEORIA DOS GRAFOS E MEDIDAS DE CENTRALIDADE

Um grafo é um par  $G = (V, E)$  de conjuntos tal que os elementos de  $V$  são seus vértices e os elementos de  $E$ , suas arestas. Grafos podem ser representados de forma visual em que cada vértice é indicado por um ponto e cada aresta é indicada por uma linha conectando dois pontos. Por exemplo, considerando o grafo ilustrado na figura 1,  $V = (1,2,3,4,5,6)$  e  $E = ((1,2), (1,3), (1,6), (2,3), (3,4), (4,5), (4,6))$ . Um grafo pode ser representado também na forma de lista ou matriz.

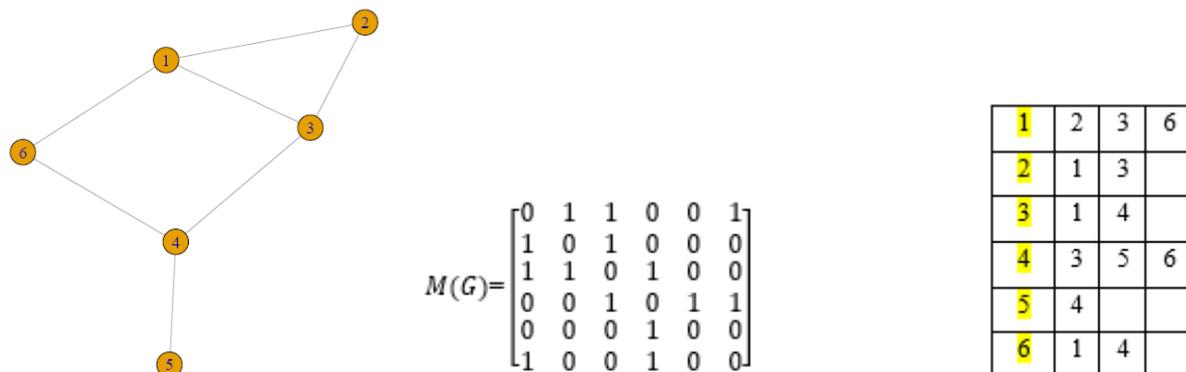


Figura 1 - Representações de um Grafo: a direita em forma de lista, ao centro em forma de matriz e a esquerda de forma gráfica.

Um grafo pode ser classificado em dois tipos com relação a sua orientação. Quando existe na aresta uma direção indicada, identificando o vértice de origem e o vértice de chegada,

o grafo é orientado, sendo assim, denominado grafo direcionado. Quando não há indicação de orientação para as arestas do grafo ele é chamado não direcionado. De acordo com (Bessa et al., 2010), existem definições simples que são muito importantes para a Teoria dos grafos, como: Ao se associar um valor, normalmente um número real, a cada aresta de um grafo, ele é dito ponderado. Este valor é denominado como peso da aresta. Quando houver um caminho entre cada par de vértices o grafo é dito conexo. Caso exista pelo menos um par de vértices que não esteja conectado através de um caminho, o grafo é dito desconexo.

Grafos podem ser analisados por diversos pontos de vista e com variadas finalidades. Um dos conceitos é o de centralidade e refere-se à posição de cada vértice na estrutura e sua importância em relação a seus vizinhos (Paes, 2008). Existem várias maneiras de se determinar a centralidade, cada forma reflete uma característica especial da rede e em geral estão correlacionadas (Mello et al., 2010). Há medidas de centralidade para análise de grafos desde as mais tradicionais como centralidade de grau, centralidade de proximidade e centralidade de intermediação (Guedes, 2013), até as mais recentes como *PageRank* e centralidade autovetor.

A centralidade de intermediação atribui importância a um vértice ou aresta em função da passagem de fluxo por ele para interligar outros dois vértices ou arestas da rede, através do menor caminho possível. Quanto mais central é um vértice ou aresta, maior é o número de vértices ou arestas possíveis de se atingir com maior rapidez ou facilidade, melhor é a conexão e maior a sua influência (Bessa et al. 2010, apud Ulrik 2001). A centralidade por intermediação pode ser definida como a porcentagem de vezes que um vértice  $v_k$  necessita de um vértice  $v_i$ , cuja centralidade está sendo medida, para atingir o vértice  $v_j$ , através do menor caminho possível, sendo  $k \neq i \neq j$  e  $0 < j < k \leq n$ , onde  $n$  é o número de vértices da rede. A centralidade de intermediação é dada pela equação 1.

$$C_i(v_i) = \sum_{j < k} \frac{g_{jk}(v_i)}{g_{jk}}, i \neq j \neq k \quad (1)$$

Onde  $g_{jk}$  é o número de caminhos geodésicos que interligam o vértice  $j$  ao vértice  $k$  e  $g_{jk}(v_i)$  é a quantidade destes caminhos que passam por  $v_i$  (Silva, 2010).

Ainda de acordo com (Silva, 2010), os vértices com maior centralidade por intermediação podem controlar o fluxo em uma rede e inclusive ser pontos de articulação entre pontos isolados da rede.

### 3. ANÁLISE DE MALHA VIÁRIA URBANA E CENTRALIDADE POR INTERMEDIAÇÃO

Diversos pesquisadores acreditam que a configuração urbana condiciona os sistemas de transporte nelas existentes, além de interferir no processo de deslocamento dos indivíduos. Existem outros fatores, uma vez que a dinâmica das cidades incorpora uma série de ir e vir no espaço (Barros et al. 2013), no entanto a configuração do espaço não é um elemento passivo, é uma variável independente e pode se converter em um atributo para a interpretação da mobilidade urbana, uma vez que afeta a vida social nele existente.

Para a análise de fluxo de tráfego em redes de malhas urbanas, (Kazerani & Winter, 2009) afirmam que as centralidades por intermediação tradicionais sozinhas não são apropriadas de se utilizar, pois concentram-se somente em propriedades estruturais, em formulações estáticas de centralidade e as redes de vias possuem propriedades dinâmicas que não podem ser negligenciadas como: restrições temporais significativas como fechamentos noturnos, alocação de faixas dinâmicas ou volume de tráfego atual, além de taxas de mudanças lentas na própria rede.

Com o estudo da centralidade por intermediação, neste trabalho, é apenas verificado quais são as vias mais importantes para deslocamento dentro de todos os deslocamentos possíveis na rede baseando-se nos caminhos mais curtos. Com essa análise é possível, identificar, por exemplo, vias que deveriam ser priorizadas para asfaltamento

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho compreendeu 2 etapas principais. A primeira etapa correspondente ao uso de técnicas de geoprocessamento mediante o uso de um sistema de informações geográficas (SIG) para obtenção a malha, representação através de um grafo e edições. A segunda etapa correspondeu ao uso do ambiente de computação estatística R, para cálculo da centralidade por intermediação.

### 4.1 Softwares Utilizados

Os dados geográficos utilizados nesta pesquisa, que incluem a malha viária urbana, foram adquiridos gratuitamente pela internet por meio do sítio do projeto OpenStreetMap (<http://www.openstreetmaps.org>). Os dados foram adicionados a um projeto no software Sistema de Informações Geográficas Quantum GIS (QGIS). Em seguida passados a outro programa do SIG, o PostgreSQL, um sistema de gerenciamento de dados de código livre, que através do PostGIS, extensão que permite leitura de arquivos em GIS e o Pgrouting, ferramenta do postgis que proporciona ao usuário condições de trabalhar com algoritmos de roteirização, armazenou os dados que foram editados no QGIS.

A segunda etapa correspondeu a utilização da linguagem R, através do software R para cálculo da centralidade de intermediação. O R é um ambiente moderno, de domínio público que possui código livre. Quando instalado, é possível a obtenção de vários pacotes, entre eles o pacote igraph, biblioteca que tem como principais funções facilitar o acesso a implementação de algoritmos gráficos, promover a manipulação rápida de grandes grafos, cálculo de métricas, plotagem de redes, entre outras.

### 4.2 1º Etapa: Uso do Sistema de Informações Geográficas

Para representação da malha viária urbana por um grafo foram realizados os seguintes passos: Através do complemento Openlayers do QGIS, foi escolhida a opção “adicionar uma camada do OpenStreetmaps”, para enquadrar a camada da área de Santarém na tela. Em seguida o arquivo foi baixado através do complemento “Vetor > OpenStreetmap > Download data” e guardado em extensão OSM.

Para converter a estrutura de dados da extensão OSM, para pgrouting, foi preciso criar um banco de dados no postgresql, o sistema de banco de dados objeto relacional utilizado nesse trabalho para armazenar dados adquiridos do openstreetmaps e converter através das extensões, em arquivos GIS, para posteriormente serem editados no QGIS e adicionar duas extensões, sendo postgis e pgrouting.

O passo seguinte foi criar um diretório com o arquivo mapconfig.xml e utilizando o prompt de comando gerar o arquivo XML. O comando utilizado foi o “osm2pgrouting -f map.osm -c mapconfig.xml -h localhost -p 5432 -d banco\_de\_dados -U postgres -W senha”. Ao utilizar esse comando, automaticamente é gerado o arquivo XML e criadas as camadas do pgrouting. Em seguida as camadas, com os atributos das arestas e dos vértices, foram adicionadas ao QGIS no intuito de convertê-las em Shapefile.

Os projetos iniciados no QGIS apresentam o formato universal no início, no caso o

datum WGS84, por este motivo, foi necessário mudar o SRC para o formato UTM - SIRGAS 2000 – zona 21S, que é referente a localização da região em que se encontra o município de Santarém-PA, de acordo com o IBGE.

Utilizando os arquivos convertidos em Shapefile, foi preciso fazer um tratamento de dados, no QGIS, na propriedade descrita como tabela de atributos, na qual obteve-se da camada arestas os valores descritos como source (vértices de origem), target (vértices de destino), oneway (sentido das vias) e cobertura (condições de pavimentação das vias). Nesse trabalho, por se tratar de uma análise de malha viária do Município de Santarém, foi necessária atenção especial ao sentido das vias e a pavimentação.

### 4.3 2º Etapa: Cálculo da Centralidade de Intermediação

Para serem encontrados os caminhos mais importantes em relação a centralidade de intermediação foi utilizado o pacote igraph do programa R e a ferramenta *Betweenness* (termo em inglês para intermediação). Para cálculo da centralidade para cada via, o número de caminhos mais curtos que passam pela via tem que ser contabilizado e para o cálculo de caminho mínimo a ferramenta utiliza o algoritmo de Dijkstra.

#### *Cálculo dos Caminhos Mínimos*

O algoritmo de Dijkstra é utilizado para encontrar os menores caminhos entre vértices ou arestas quaisquer de um grafo. Proposto em 1959 pelo cientista da computação holandês Edsger Dijkstra, considera um grafo  $G$ , de  $n$  vértices, e  $m$  arestas. Além disto, são fornecidos dois vértices distintos e com algum caminho entre,  $u$  e  $v$  que são a origem e o destino (Neves, 2007). Os vértices são divididos da seguinte maneira: os que já foram visitados (conjunto C), os que são candidatos (conjunto F) e os que nunca foram visitados (conjunto D). A seguir o resumo dos passos do algoritmo.

- O conjunto C é inicializado contendo apenas o vértice de origem. Os vértices vizinhos imediatos do vértice de origem são inseridos no conjunto F, sendo registrados os custos para alcançar cada um a partir do vértice de origem, e os demais inicialmente pertencem ao conjunto D.
- A cada iteração, os vértices do conjunto F são verificados para determinar qual a melhor opção, qual caminho possui menor peso e então será transferido para C o vértice cujo custo acumulado seja o menor dentre os candidatos. Neste momento seus vizinhos são transferidos do conjunto D para o conjunto F.
- As iterações param quando o vértice de destino for alcançado ou quando não houver mais vértices a percorrer.
- Quando os caminhos simulados são isonômicos, o peso de todos os vértices é o mesmo. Já quando for considerada a condição de pavimentação das vias, pesos diferentes são atribuídos para as arestas, representando o custo de tráfego.

Após os cálculos dos caminhos mínimos, a centralidade de intermediação foi calculada pela ferramenta.

Duas análises foram feitas: uma partindo dos valores de intermediação obtidos entre todos os possíveis pares de vértices da malha desprezando e levando em conta os sentidos das vias, e outra análise comparando a intermediação com revestimento das vias para identificar quais as ruas importantes para o deslocamento e não estão asfaltadas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 2 apresenta o mapa resultado da etapa de edição dos dados do grafo da malha viária urbana de Santarém, apresenta a cobertura do solo das vias. Esta informação é de suma importancia quando se trata de deslocamento urbano em um município pois influenciam a decisão de qual caminho utilizar.

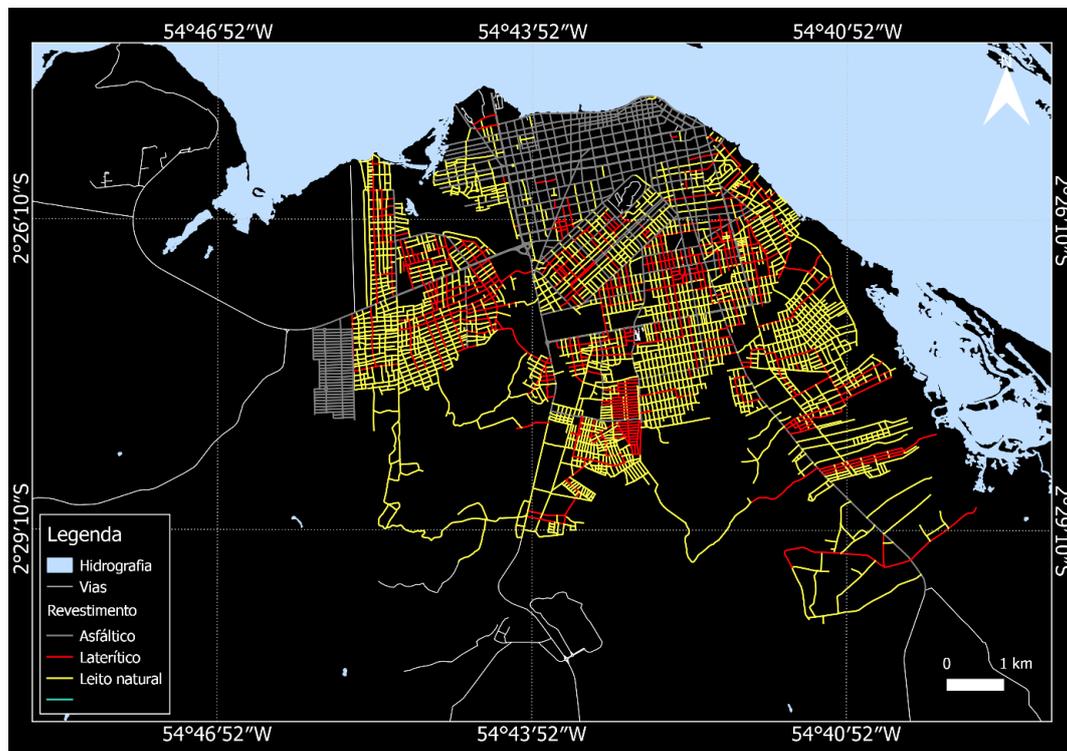


Figura 2 – Mapa da cobertura das vias da malha viária urbana da sede de Santarém-PA.

A centralidade foi calculada primeiro sem levar em consideração os sentidos das vias, ou seja, utilizando a rede não direcionada, tomando como peso somente distância, e o mapa da figura 3 foi obtido. A análise da centralidade por intermediação da rede não direcionada indica presença de baixos valores de centralidade, representados pelas cores de tom frio azul até altos valores de centralidade representados pelas cores de tom quente, chegando aos valores de máxima centralidade em vermelho. É possível verificar que mesmo ao se considerar somente o desenho da malha, vias de maior centralidade coincidem com vias de maior tráfego no dia a dia. Como o caso da Avenida Cuiabá, Avenida Engenheiro Fernando Guilhon e Avenida Curuá-una. Outro fato interessante é a alta centralidade das outras 3 vias que ligam a grande área do Santarenzinho com o restante da cidade e que no entanto, ao comparar com o mapa da figura 2, apresentam leito natural, deixando evidente que seus potenciais como vias importantes para o deslocamento na malha ainda não são explorados.

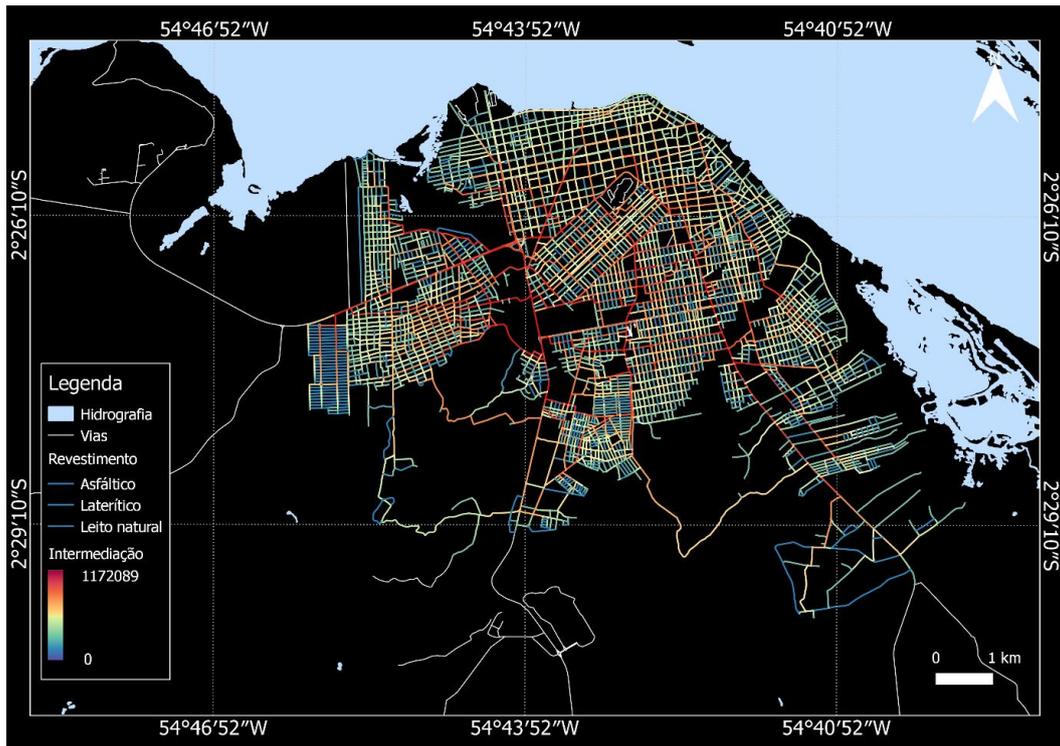


Figura 3 - Mapa da Centralidade Por Intermediação da malha viária urbana da sede de Santarém-PA, sem considerar sentido de via.

Em seguida os sentidos foram contabilizados e elaborado o mapa da figura 4, de centralidade por intermediação da rede direcionada.

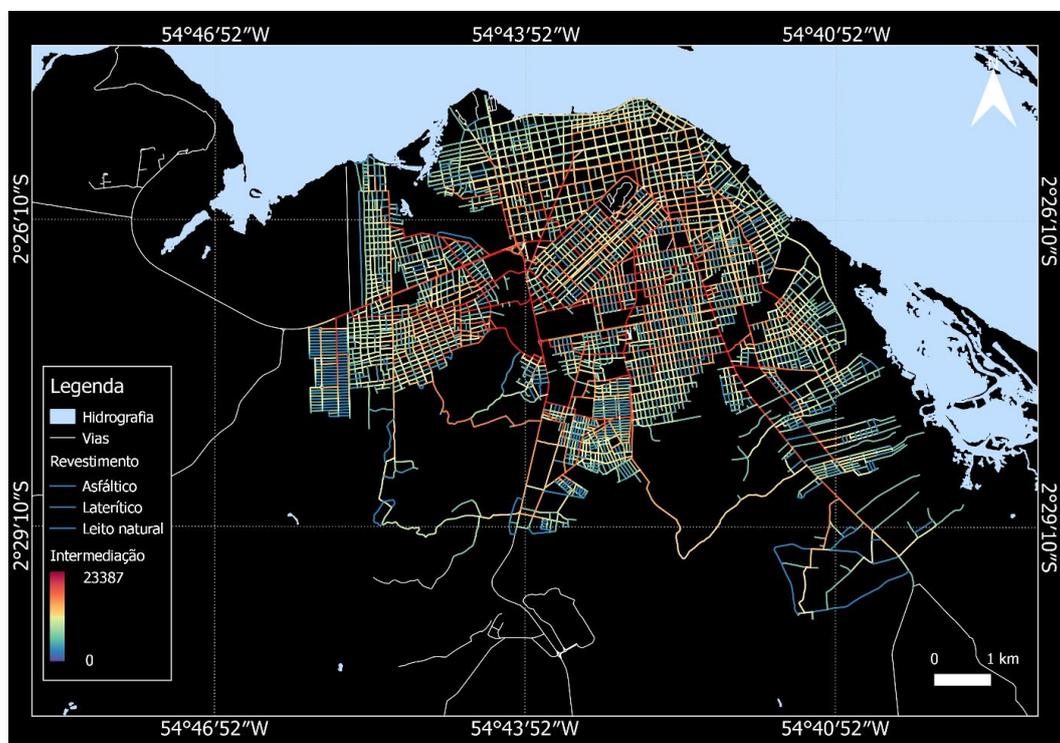


Figura 4 - Mapa da Centralidade Por Intermediação da malha viária urbana de Santarém-PA, considerando sentido de via.

Notou-se que quando o sentido das vias foi considerado, o valor máximo de centralidade foi menor, comparado ao da rede não direcionada. A importância das vias é mostrada pela variação de tons. Tons quentes significam vias mais centrais e tons frios vias menos centrais.

O alto número de trechos com centralidade alta na malha da rede direcionada e semelhança com a rede não direcionada pode ser relacionado ao fato de a maior parte das vias apresentarem duplo sentido, permitindo maior número de deslocamentos possíveis.

Visualmente a distribuição das centralidades da rede direcionada e não direcionada são muito semelhantes e para melhor compreensão dos resultados, foram examinadas quantitativamente as propriedades estatísticas das centralidades das redes, com a utilização de histogramas e suas respectivas distribuições cumulativas. Ao observar os gráficos da figura 5 foi notória a semelhança da distribuição das centralidades. Uma das diferenças entre as distribuições das centralidades das redes foi a frequência em que foram encontradas. Vias com baixa e média intermediação são mais frequentes no grafo não direcionado. Já as vias de média-alta e alta intermediação apresentam frequência significativamente semelhantes. Mais especificamente e com a observação dos gráficos da figura 6 aproximadamente 20% das vias possuem intermediação baixa, mais de 70% das vias apresentam intermediação média e menos de 10% tem alto valor de centralidade por intermediação no grafo direcionado.

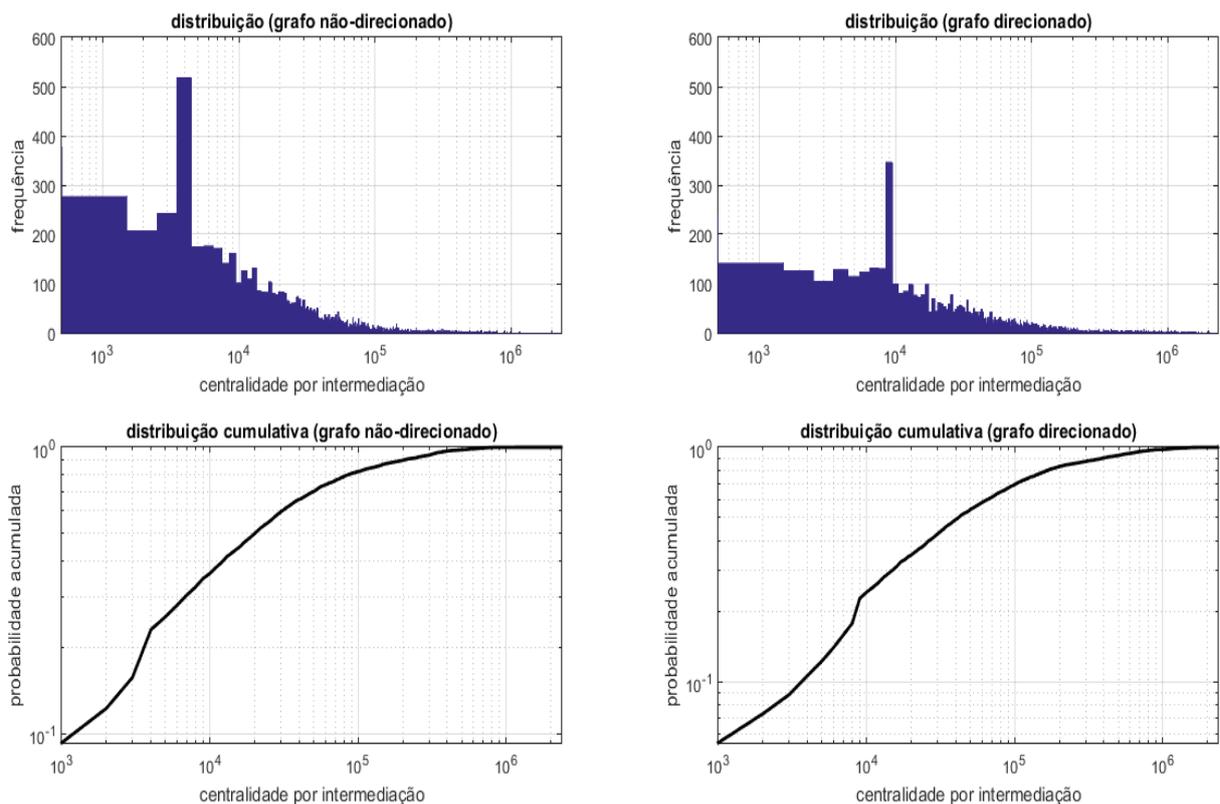


Figura 5 - Histograma da centralidade de intermediação da rede direcionada e não direcionada e distribuições cumulativas.

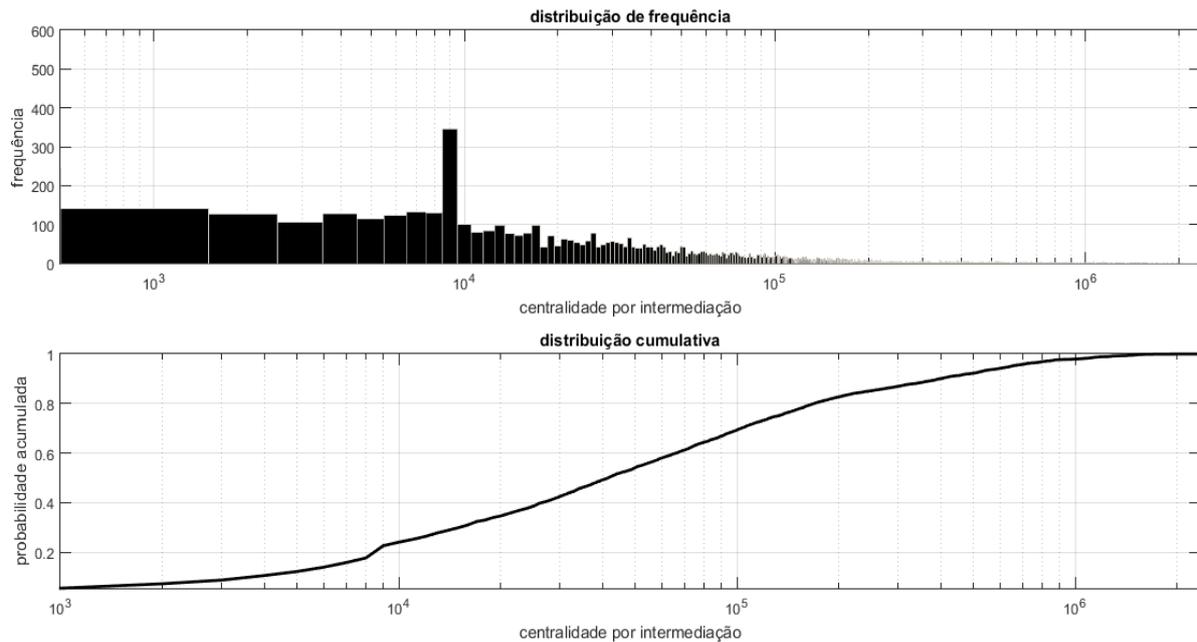


Figura 6 - Histograma da centralidade por intermediação do grafo direcionado.

De acordo os mapas 3 e 4 todos as grandes áreas de Santarém possuem alguma via com alto valor de centralidade por intermediação, ou seja, são muito importantes perante todos os deslocamentos possíveis dentro da malha do município, porém, se comparados com o mapa da figura 2, nem todas estas vias importantes possuem cobertura adequada para deslocamento de pedestres, ciclistas ou por veículos motorizados. A centralidade por intermediação da malha não direcionada pode indicar a importância de cada trecho de via para deslocamentos a pé ou de bicicleta, tendo em vista que esses dois deslocamentos ocorrem sem levar em consideração os sentidos das vias. Enquanto a medida de centralidade por intermediação da malha direcionada indica a importância de cada trecho de via para deslocamentos por veículos motorizados, uma vez que tem que seguir obrigatoriamente os sentidos das vias. A cidade apresenta mais vias com média importância, poucas vias com muita importância, e as com mais baixa centralidade, em sua maioria, se encontram nas áreas mais periféricas. Muitas dessas vias importantes não possuem cobertura adequada para o deslocamento, o que leva as vias mais centrais e com melhor pavimentação serem provavelmente as escolhidas para o deslocamento urbano, podendo assim, haver engarrafamentos em horários de pico de deslocamento, aumento da possibilidade de acidentes de trânsito e desgaste mais rápido do revestimento dessas vias.

## 6. CONCLUSÕES

A medida de centralidade por intermediação, indicadora de influência, de maior ou menor tráfego permitido, que afirma que quanto mais central é um vértice, maior é o número de vértices possíveis de se atingir com maior rapidez ou facilidade, apresentou resultados úteis, condizentes com a realidade e possíveis de ser fonte de subsidio para pesquisas futuras e inclusive tomadas de atitude por parte dos governantes para melhoria das vias e deslocamentos no município.

## Agradecimentos

A meu orientador Rodolfo Maduro Almeida pelo auxílio na implementação deste projeto, por compartilhar seu conhecimento e fazer com que esse trabalho fosse concluído com êxito.

## REFERENCES

- Barros, A. P. et al. (2013), “*Impacto do Desenho da malha Viária na Mobilidade Urbana*”. Paranoá n.9 Mobilidade, Cidade e Território, ISSN\_1677-7395, UNB, Brasília.
- Benicio, M. A. (2013), “*Centralidade da caminhada aleatória em redes complexas*”. Dissertação de Mestrado em Física, UEPG, Ponta Grossa.
- Bessa, A. D. et al. (2010), “*Introdução às redes complexas*”. UFBA. Bahia
- Cohen, R.; Havlin, S. (2010), “*Complex Networks: structure, robustness, and functions*”. Virtual book, Universidade de Cambridge, Nova York.
- Freitas, L. Q. (2010), “*Medidas de centralidade em grafos*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, UFRJ, Rio de Janeiro.
- Guedes, D. A. (2013), “*Classificação dinâmica de nós em redes em malha sem fio*”. Dissertação de Mestrado em Computação, UFG, Goiânia.
- Kazerani, A.; Winter, S.(2009), “*Can betweenness centrality explain traffic flow?*”. Anais 12th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Alemanha.
- Mello, B. A. et al. (2010), “*Teoria de redes complexas e o poder de difusão dos municípios*”. IPEA. No 1484. Brasília.
- Neves, P. T. (2007), “*Variações e aplicações do Algoritmo de Dijkstra*”. Dissertação de Mestrado em Ciência da Computação, UNICAMP, Campinas.
- Paes, C. A. (2013), “*Caracterização Topológica de redes complexas geradas no processo de mineração de documentos*”. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro.
- Serpa, A. (2002), “*A paisagem periférica*”. Turismo e Paisagem., São Paulo, Editora Contexto, 2002, p. 162-179.
- Silva, T. S. (2010), “*Um estudo de medidas de centralidade e confiabilidade em redes*”. Dissertação de Mestrado em Tecnologia, CEFET/RJ, Rio de Janeiro.

## CHARACTERIZATION AND ANALYSIS OF THE URBAN ROAD NETWORK OF SANTARÉM / PA USING BETWEENNESS CENTRALITY IN GRAPHS THEORY

**Abstract:** *Complex networks are analyzed using Graphs Theory, the area of mathematics that studies the relations between objects of a given set, using the concept of graph. Several aspects of the real world can be represented by networks from analogies for specific purposes. Georeferenced data of an urban road network can be converted into a graph, where the nodes are the intersections and the edges are the paths between them. The use of the statistical computing environment R makes it possible to reach the measure of betweenness centrality of a node or edge. This centrality attaches importance to a node or edge as a function of the flow passage through it to interconnect two other nodes or edges of the lattice, through the smallest possible path. The more centered a vertex or edge is, the greater the number of vertices or edges that can be reached more quickly or easily. In this sense, and considering the unorganized urban expansion, together with the increasing use of motor vehicles, which have generated a congestion scenario and difficult mobility in the urban roads of Santarém, this work was proposed to use of betweenness centrality by to characterize and analyze the road network of Santarém, Pará.*

**Keywords:** *Graphs Theory, Betweenness Centrality, Urban Road Network.*