

# **Método de localização de estações ferroviárias urbanas com a técnica do diagrama de Voronoi: uma aplicação ao eixo sul de Brasília-Brasil**

**Diego Rosa Mota**

Engenheiro Civil, Ministério da Integração Nacional, Brasil

**Marise Santos Maranhão Takano**

Doutoranda em Transportes, Universidade de Brasília, Brasil

**Pastor Willy Gonzales Taco**

Doutor em Transportes, Universidade de Brasília, Brasil

## **RESUMO**

Este artigo consiste na elaboração de um Método para localização de estações em linhas ferroviárias para transporte urbano de passageiros. O método parte de um traçado previamente definido e considera a área de cobertura das estações e a integração da rede de transporte para propor um Modelo Funcional para a linha de trem. Para isso, são levantados os Polos Geradores de Viagens-PGV ao longo do corredor ferroviário e a partir deles usa-se a técnica dos Diagramas de Voronoi com pesos Multiplicativos para identificar as áreas de concentração de atividade. O Método é aplicado para o Eixo Sul da Região Metropolitana de Brasília e como produto final é obtido um modelo de funcionamento em estrutura tronco-alimentadora em forma de um “T”, onde as estações são classificadas, em função do seu grau de adensamento e de sua importância para integração. O eixo troncal “T” é uma representação da linha do trem urbano e o eixo de distribuição representa a rede de transporte responsável pela repartição dos passageiros na região central de Brasília. O modelo proposto apresenta 69 km de comprimento, tempo de viagem total estimado em toda extensão da ferrovia de 62 minutos e 17 estações sendo 2 integradas ao metrô, 4 integradas ao sistema de veículo leve sob trilhos (VLT) e 3 estações integradas ao sistema de corredor de ônibus.

## **1. INTRODUÇÃO**

Os problemas de mobilidade nos grandes centros urbanos brasileiros são configurados principalmente pelo grande fluxo de passageiros que precisa se deslocar longas distâncias por causa da dependência de um centro onde se localiza a maior parte das oportunidades e ofertas de emprego. Diversas regiões metropolitanas vivenciaram situação semelhante e encontraram nos trilhos uma forma de amenizar este problema.

Em Brasília, a capital do Brasil, a dificuldade em vencer grandes distâncias é uma realidade muito característica e as discussões sobre a implantação de uma linha de trem urbano está atualmente em fase de estudos de viabilidade, sob a coordenação do Governo Federal. A proposta inicial é utilizar parte da infraestrutura ferroviária já existente para uma linha de trem urbano, prioritariamente na região conhecida por Eixo Sul da Região

Metropolitana de Brasília (RMB). Esta é uma aglomeração de cidades ao longo de 60 km, que possui 738.373 habitantes (PDTU/DF, 2011) e que se localiza entre duas distintas unidades federativas brasileiras: o Distrito Federal-DF e o estado de Goiás.

O Eixo Sul de Brasília apresenta consideráveis níveis de desigualdade social com população marcada pela dependência econômica da parte central de Brasília, onde se concentram as ofertas de emprego. Esta realidade configura as viagens pendulares na região. Diariamente são feitas 110.810 viagens entre as cidades do estado de Goiás e Brasília. Estima-se que até 2020 a região terá um aumento de 43% nas viagens por transporte coletivo por ônibus e 59% nas viagens de veículos individuais, chegando a, respectivamente, 41.291 e 8.670 viagens no horário do pico da manhã. Esta demanda crescente e o aumento da taxa de motorização evidenciam a necessidade da implantação de um sistema de transporte troncal mais eficiente e sustentável, como o transporte ferroviário de passageiros, na região (PDTU/DF, 2011).

Para a implantação de um sistema de transporte ferroviário, conforme coloca Vuchic (2005), dois elementos são primordiais: o traçado da via e a localização das estações. Este trabalho foca-se neste último e consiste na elaboração de um método para localização de estações ferroviárias urbanas partindo de traçados pré-definidos. O método usa o diagrama de Voronoi integrado em Sistema de Informação Geográfica – SIG e considera ainda o posicionamento de estações em pontos estratégicos para a integração com a rede de transportes já existente. Desta forma, busca-se um modelo de transportes eficiente, integrado que faça frente aos problemas de mobilidade enfrentados pelos grandes centros urbanos.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 Localização de Estações Ferroviárias**

A quantidade e a localização de estações são variáveis fundamentais em um sistema de operação de trem urbano, uma vez que estão atreladas à velocidade e tempo da viagem, conforto dos passageiros, custos de operações, entre outros fatores. Deste fato, surge a necessidade da existência de um plano de locação de estações que otimize qualitativa e quantitativamente vários aspectos sugeridos por Vuchic (2005). São eles a área de cobertura, a promoção de integração e os aspectos políticos, operacionais e econômicos.

A área de cobertura é função do número de estações ao longo do traçado. Pode ser decisiva no sucesso de uma linha ferroviária, uma vez que potencializa seu uso. A distribuição de estações ao longo da linha deve priorizar uma área de captação de passageiros máxima de passageiros.

A área de cobertura pode ser definida de várias formas. Vuchic (2005), toma como modelo o acesso a pé às estações. Por isso, define a área de cobertura com sendo um círculo com um raio de comprimento representado pela máxima distância de caminhada (400m).

Horner & Grubestic (2001) colocam como modelo o acesso via automóvel, que caracteriza as chamadas estações park-and-ride, muito comuns nos EUA. Neste caso, eles propõem uma área de cobertura parabólica, que reflete na decisão dos passageiros, que preferem embarcar em uma estação mais a frente no sentido da sua viagem, do que dirigir no sentido contrário para embarcar numa estação mais próxima.

Outro estudo importante relativo à área de captação é o trabalho de Silva (2008). Ele propõe a definição de áreas de captação de uma estação de metrô a partir dos padrões de deslocamento espaço-temporal dos usuários da estação. Ou seja, a área de captação depende da decisão do passageiro em se deslocar dentro de um determinado intervalo de tempo. Assim como Horner & Grubestic (2001), Silva (2008) coloca a área de captação como dependente do sistema de integração da estação de trem ao sistema de transporte da cidade.

A integração é outro aspecto a ser considerado no plano de localização de estações. Os possíveis pontos de integração ao longo de linha ferroviária devem ser considerados na localização de estações de forma que a rede de transporte existente trabalhe conjuntamente com a nova linha de trem para a melhoria da mobilidade dos passageiros. Por isso, Vuchic (2005) recomenda que estações de trem sejam localizadas em pontos de terminais pré-existentes, pontos de interceptação com vias e com demais sistemas de transporte.

Entre os outros aspectos sugeridos por Vuchic (2005) citam-se os aspectos políticos, onde consideram-se as políticas de estímulo ao desenvolvimento urbano, alcance de metas de planejamento e necessidade locais da população; os aspectos operacionais onde prioriza-se a promoção do tempo mínimo de viagem, um ponto determinante para o indivíduo escolher ou não ser usuário de uma determinada linha de transporte; e os aspectos econômicos, onde consideram-se os custos mínimos de investimento, operação e manutenção.

Para nortear a decisão de onde localizar estações alguns métodos e técnicas podem ser utilizados. Eles consideram todos ou parte dos aspectos sugeridos por Vuchic (2011) e podem ser usados juntos a técnicas e softwares de análise espacial, como o ArcGIS.

Um método para Localização de Estações é o desenvolvido por Repolho *et al.*(2012). Neste trabalho foi elaborado um modelo de otimização inteiro-misto a partir da minimização dos custos de viagem para determinar a quantidade e localização de estações em uma linha de trem de alta velocidade entre Lisboa e Porto. Entre outras variáveis, foram considerados neste modelo as áreas geradoras de viagens, a matriz origem destino, a área de captação das estações e o tempo perdido nas paradas.

Novaes (2007), que aplicou os Diagramas de Voronoi para definir as áreas de influência de estações e para alocá-las ao longo de um trecho hipotético de uma linha de Metrô.

## **2.2 Diagramas de Voronoi**

O diagrama de Voronoi é uma ferramenta geométrica útil para estudos de proximidade em

um plano. Ele permite a identificação de áreas de cobertura e regiões de influência no espaço, sendo, por isso, aplicado a problemas de localização de facilidades e de zoneamento.

Segundo Novaes (2007), define-se Diagrama de Voronoi pela seguinte proposição matemática: “dado um conjunto de pontos distintos  $P \equiv \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$  num espaço contínuo, procura-se associar todos os demais pontos desse espaço com o membro mais próximo do conjunto  $P$ . O conjunto fechado de  $m$  pontos constitui o conjunto gerador do diagrama de Voronoi, com  $m \geq 2$ ”.

Desta forma, sendo  $\mu(X, Y)$  a variável que exprime a distância entre dois pontos numa métrica apropriada, e sendo  $X, Y \in \mathbb{R}^2$  pontos do plano, o diagrama de Voronoi é definido matematicamente pela Equação 1.

$$V(P_i) = \{X \in \mathbb{R}^2 \mid \mu(X, P_i) \leq \mu(X, P_j), j = 1, \dots, m\} \quad (1)$$

Ou seja, o diagrama nasce quando um plano com  $n$  pontos é partido em áreas de influência, de forma que cada região contenha um ponto gerador e cada ponto em uma dada região tenha a menor distância possível do seu ponto gerador do que de qualquer outro ponto (Weisstein, 2013).

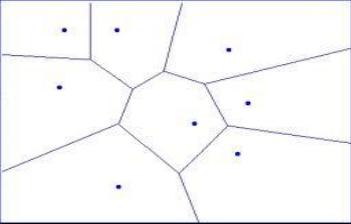
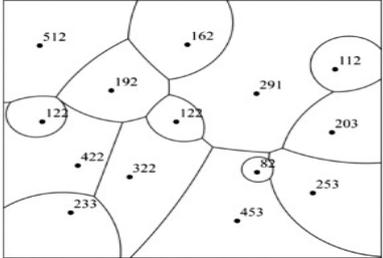
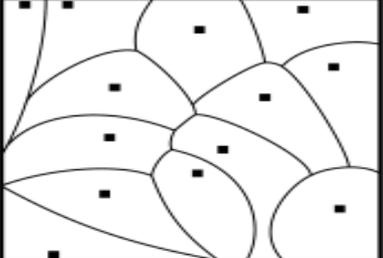
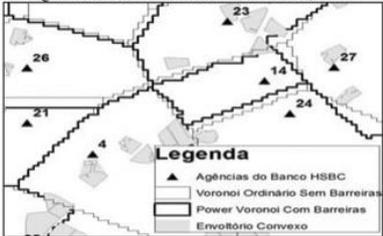
O exemplo mais simples dessa formulação é o diagrama de Voronoi ordinário (Voronoi-OD), também conhecido como polígonos de Thiessen, em que a distância entre dois pontos é a euclidiana, com as sub-regiões resultantes formadas por polígonos convexos. Quando somente a distância  $\mu$  não representa bem o processo de atração dos pontos geradores, outros atributos são considerados como uma ponderação para o cálculo da atração de cada um dos pontos. Nasce daí outras feições do diagrama, denominados de diagrama de Voronoi com pesos multiplicativos (Voronoi-PM), com pesos aditivos, pesos combinados e de potência (Novaes, 2007), resumidos na Figura 1.

O Diagrama Voronoi-PM, usado neste trabalho, configura-se pela atribuição de pesos  $w_i > 0$  a cada um dos pontos geradores, de forma que as suas particularidades sejam levadas em consideração (Gahegan & Lee, 2000). Ele tem a métrica definida na Figura 1, onde  $w_i$  é o peso,  $P_i$  um ponto no espaço e  $\|X - P_i\|$  a distância entre o ponto  $P_i$  e  $X$ . Caso se tenha dois pontos  $P_1$  e  $P_2$ , aos quais são atribuídos, respectivamente os pesos  $w_1$  e  $w_2$ , e caso se deseje saber qual a região de influência delimitada por cada um dos pontos, tem-se a Equação 2 da linha que define a região de influência de  $P_1$  e  $P_2$ .

$$\frac{\|X - P_1\|}{\|X - P_2\|} = \frac{w_1}{w_2} = k \quad (2)$$

Esta equação representa uma relação geométrica que foi estudada pelo geômetra grego Apolônio de Pérgamo e gera círculos denominados Círculos de Apolônio. Conforme explica Varhidy (2010): “o Círculo de Apolônio é o lugar geométrico dos pontos  $X$ , tais que para todo par de pontos distintos  $P_1$  e  $P_2$ , e todo número  $k$ ,  $k \in \mathbb{R}^*$ ,  $d(X, P_1)/d(X, P_2) =$

k. Em outras palavras são dados  $P_1$  e  $P_2$ , pede-se o lugar geométrico dos pontos cuja distância a  $P_1$  vale k vezes a distância a  $P_2$ .

<b>Voronoi Ordinário</b>		<b>VD</b>
Aplicações	Problemas onde é considerada somente a distância euclidiana	
Métrica $\mu(\mathbf{X}, P_i)$	$\ \mathbf{X} - P_i\ $	
Limites das subdivisões	Segmentos de reta	
<b>Voronoi Com Pesos</b>		
Aplicações	Problemas que envolvem atributos refletidos não apenas pela distância	
<b>Pesos Combinados</b>		
Métrica $\mu(\mathbf{X}, P_i)$	$\frac{1}{w_{i1}} \ \mathbf{X} - P_i\  - w_{i2}$	
Limites das subdivisões	Função Polinomial de quarto grau	
<b>Pesos Multiplicativos - Voronoi-PM</b>		
Métrica $\mu(\mathbf{X}, P_i)$	$\frac{1}{w_i} \ \mathbf{X} - P_i\ $	
Limites das subdivisões	Retas/círculos de Apolônio	
<b>Pesos Aditivos</b>		
Métrica $\mu(\mathbf{X}, P_i)$	$\ \mathbf{X} - P_i\  - w_i$	
Limites das subdivisões	Curva hiperbólica com focos em $P_i$ e $P_j$	
<b>Voronoi de potência</b>		
Aplicações	Solução de Problemas com barreiras	
Métrica $\mu(\mathbf{X}, P_i)$	$\ \mathbf{X} - P_i\ ^2 - w_i$	
Limites das subdivisões	Segmentos de reta	

Fonte: Elaboração própria Baseado em Novaes, 2007; Devulapalli, 2012; Yongxi et al, 2012; e Carnasciali et al, 2011

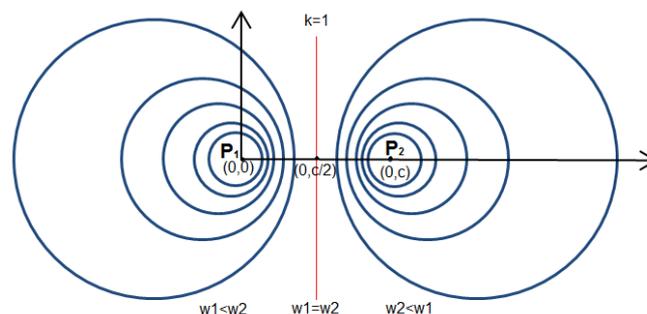
**Figura 1 - Modalidades do Diagrama de Voronoi**

Ao se desenvolver a equação 2, considerando que  $P_1 = (0,0)$ ,  $P_2 = (0,c)$  e  $X (x,y)$ , tem-se a equação de um círculo, que é mostrado na Figura 2. Estes círculos variam de posição conforme varia o valor de k.

Considerando, na Figura , que os pontos  $P_1$  e  $P_2$  sejam pontos de onde se partirá a geração

do diagrama de Voronoi-PM com pesos  $w_1$  e  $w_2$ , dois aspectos norteiam sua interpretação. Quando o valor de  $k=1$  ( $w_1 = w_2$ ) a região que separa dois pontos será uma reta, exatamente a mediatriz desses dois pontos. Quando o  $k$  começa a crescer (tendendo a infinito) ou diminuir (tendendo a zero), configura-se uma ocasião onde  $w_1 > w_2$  ou  $w_1 < w_2$ , o círculo começa então a se aproximar do ponto de menor peso. Formam-se então os círculos mais próximos de  $P_2$ , se  $w_1 > w_2$ , ou mais próximo de  $P_1$  se  $w_1 < w_2$ . No Voronoi-PM isto reflete na forma de linha de divisão sendo que a linha é côncavo para o ponto de menor peso e convexo para o maior.

A geração de Diagramas de Voronoi é possibilitada por um Sistema de Informação Geográfica – SIG, como por exemplo, o software ArcGIS. Ele possui ferramentas para análise espacial onde é possível incorporar extensões livremente desenvolvidas denominadas *Arc Script*, tal como a extensão *Weighted Voronoi Diagram Extension for ArcGIS* desenvolvida por Dong (2008), que possibilita a geração dos diagramas de Voronoi-PM. Este *ArcScript* foi desenvolvido usando Microsoft Visual Basic 6.0 e a ferramenta ArcObject 9.2 da ESRI e permite trabalhar com linhas, pontos e feições de polígonos; pode gerar diagramas de Voronoi ordinários e com pesos no formato de vetores; permite assimilar atributos não espaciais às feições do diagrama; e produz uma base de dados *raster* ordinários e com pesos.



**Figura 2 - Círculos de Apolônio**

### **3. MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE ESTAÇÕES FERROVIÁRIAS URBANAS**

Dos aspectos sugeridos por Vuchic (2005), o método desenvolvido neste trabalho considera a área de cobertura e os aspectos de integração no processo de localização de estações. A consideração destas duas variáveis permite a elaboração de um plano inicial de localização que depois pode ser aprimorando com a consideração dos aspectos operacionais e econômicos e da matriz origem destino, que pode ser feita, por exemplo, através do modelo de otimização inteiro-misto elaborado por Repolho *et al.*(2012).

O método desenvolvido para o plano inicial de localização é similar ao de Novaes (2007), contudo busca-se uma aplicação já integrada num sistema de informação geográfica e com atenção especial às possibilidades de integração à rede já existente e na identificação da área máxima de captação através do levantamento dos pontos de concentração de atividades ao longo do trecho estudado.

Para isso, o Método parte de um traçado pré-definido. Ao longo deste traçado são levantados os Polos Geradores de Viagens-PGV e a partir deles são gerados os Diagramas de Voronoi, ponderados pelo volume de viagens geradas por cada um dos PGVs. Os Diagramas permitem a identificação de áreas de concentração de atividades ao longo do corredor ferroviário e juntamente com esta identificação é analisada a rede de transporte na região. A partir disso pode-se propor um modelo de funcionamento para o corredor ferroviário. As etapas do método são: Montagem da Base de Dados (Etapa 1); Identificação e quantificação dos pólos geradores de viagens (Etapa 2), Geração dos Diagramas de Voronoi em um SIG (Etapa 3). Análise das potencialidades de integração (Etapa 4) e Elaboração do Modelo Funcional (Etapa 5).

A Etapa 1, Montagem da Base de Dados, consiste na delimitação da área abrangida pelo estudo e no levantamento e mapeamento de dados geográficos por intermédio de um Sistema de Informação Geográfica-SIG, como por exemplo, o software ArcGIS. Nesta fase são levantados e mapeados os componentes da rede de transporte existente no local – sistema viário, linhas de ônibus, pontos de terminais e paradas -, o traçado da ferrovia e as manchas urbanas das cidades diretamente influenciadas pelas estações a serem posicionadas.

A Etapa 2, Identificação e Quantificação dos Polos Geradores de Viagens, consiste no mapeamento em SIG dos PGVs, que são empreendimentos urbanos e regionais que surgiram em adensamentos urbanos. Eles foram considerados, pois conforme DENATRAN, (2001), esses locais alteram significativamente as condições de circulação de pessoas e veículos no sistema viário das áreas adjacentes aos mesmos, bem como o padrão das viagens em sua região de influência. Para o método são identificadas informações de PGVs como escolas, centros de saúde, universidades, shoppings e supermercados presentes em cada um dos adensamentos urbanos por onde passa a ferrovia.

Além da diversidade dos polos ao longo da linha é necessário conhecer seu comportamento quantitativo na geração de viagens. Para tanto, utilizam-se as equações do manual do DENATRAN (2001) que mensuram o volume de viagens geradas ( $V$ ) por cada categoria de PGV nos horários de pico, através de determinada variável, conforme Tabela 1.

Em seguida prossegue-se com a Etapa 3, Geração dos diagramas de Voronoi. Esta etapa permite a visualização de áreas de concentração de atividades que são possíveis locais para abrigar estações. Para isso, é utilizado o Diagrama de Voronoi com pesos Multiplicativos (Voronoi-PM), o que permite a consideração de um peso que faça a equivalência entre a atração de cada ponto gerador com a atração da demanda pelo sistema de transporte estudado. A ponderação foi feita pelo volume de viagens ( $V$ ) geradas por cada PGV.

Além da consideração do peso e da atração exercida por cada PGV, optou-se pelo Diagrama com pesos Multiplicativos devido a sua facilidade de uso incorporado ao software ArcGIS, possibilitada através do *Arc Script* desenvolvido por Dong (2008).

O método é prosseguido com a Etapa 4, análise das possibilidades de integração, onde é feito o mapeamento da rede de transportes existente – linhas e terminais de ônibus, estações de metroferroviárias, entre outros – dentro das áreas identificadas na etapa 3.

Por fim, procede-se com a Etapa 5 onde é proposta o Modelo Funcional para a linha de trem, que dependendo das características levantadas nas etapas anteriores pode assumir forma troncal, circular, entre outros.

#### **4. APLICAÇÃO PRÁTICA**

A metodologia foi testada no Eixo Sul da Região Metropolitana de Brasília, região que se desenvolve entre duas unidades federativas brasileiras (estado de Goiás e o Distrito Federal - DF), sendo os Municípios de Luziânia, Cidade Ocidental e Valparaíso de Goiás pertencentes ao Estado de Goiás e as Regiões Administrativas (RAs) de Santa Maria, Park Way, Núcleo Bandeirante, Guará, SIA e Plano Piloto, pertencentes ao DF.

Na região existe uma linha de trem de aproximadamente 70 quilômetros de extensão, infraestrutura em via singela e bitola métrica, sem eletrificação, atualmente usada para transporte de cargas. Há interesse, por parte do Governo Federal Brasileiro, em adaptar essa traçado ao transporte de passageiros, com a implantação de uma linha de trem urbano.

O estudo deu-se a partir de investigação prévia sobre o traçado e, portanto o método faz comparações entre o traçado atual e o proposto. Os dois traçados (o proposto e o atual), assim como as cidades e RAs ao longo da linha, são mostrados na Figura 6.

##### **4.1 Resultados**

A aplicação Etapa 1 do método forneceu como produto o Mapeamento do Pontos de Parada, Terminais e linhas de ônibus do DF. Estes dados foram providos pelo órgão gestor do transporte em Brasília e pela Secretaria de Estado de Habitação, Regularização e Desenvolvimento Urbano do Distrito Federal. Também foram levantados em mapeados em ArcGIS 10.1 os traçados da Ferrovia e as manchas urbanas influenciadas.

A etapa 2 consistiu na Identificação dos PGVs e no conhecimento de seu comportamento quantitativo na geração de viagens. Para tanto, utilizaram-se as equações presentes no manual do DENATRAN (2001), conforme Tabela 1

Os 10 principais PGVs da região, que apresentam os maiores valores de  $V$ , destacam-se os shoppings que apresentam altos valores de  $V$  entre 4000 e 18000 para os PGVs da região .

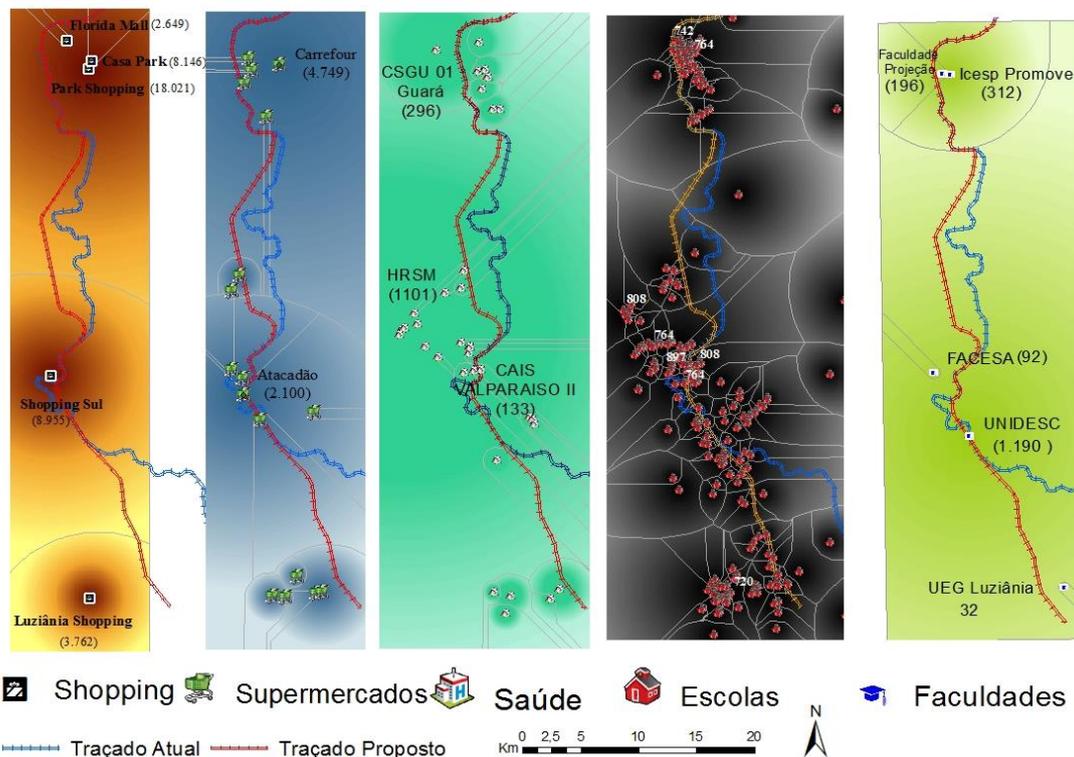
Partindo-se da Localização dos PGVs e do valor de volume de viagens geradas ( $V$ ), procedeu-se com a etapa 3, onde foram gerados os respectivos diagramas de Voronoi com pesos multiplicativos para cada categoria de PGV separadamente (Figura 2)

A fim de identificar áreas de maior concentração e abrangência de PGVs, que são locais

com potencial para abrigar estações, os procedimentos de geração dos diagramas foram repetidos para todos os PGVs juntos e para todos os PGVs sem shoppings, pois estes apresentaram valores altos para o volume de viagens frente aos de outros PGVs, resultando respectivamente na Figura 3 (a) e na Figura 3 (b).

Tipo de PGV	Fonte	Variável Utilizada	Equação
Escola	Instituto Nacional de Pesquisas Educacionais	Nº de Salas Utilizadas (NSU)	$V = 22,066 \text{ NSU} + 102,186$
Universidade	Secretaria das Faculdades	Nº de Alunos (NA)	$V = 0,432 \text{ NA} - 106,303$
Hospital	DataSUS	Nº de Funcionários (NF)	$V = 0,483 \text{ NF} + 36,269$
Supermercado	Levantamento <i>in loco</i>	Área Total Construída (AC)	$V = 16,53 / 100 \text{ m2 de AC}$
Shopping	Administração Shoppings	Área Bruta Locável (ABL)	$V = 1732,7276 + 0,3054 \text{ ABL}$

**Tabela 1 - Informações sobre os Polos Gerados de Viagens**

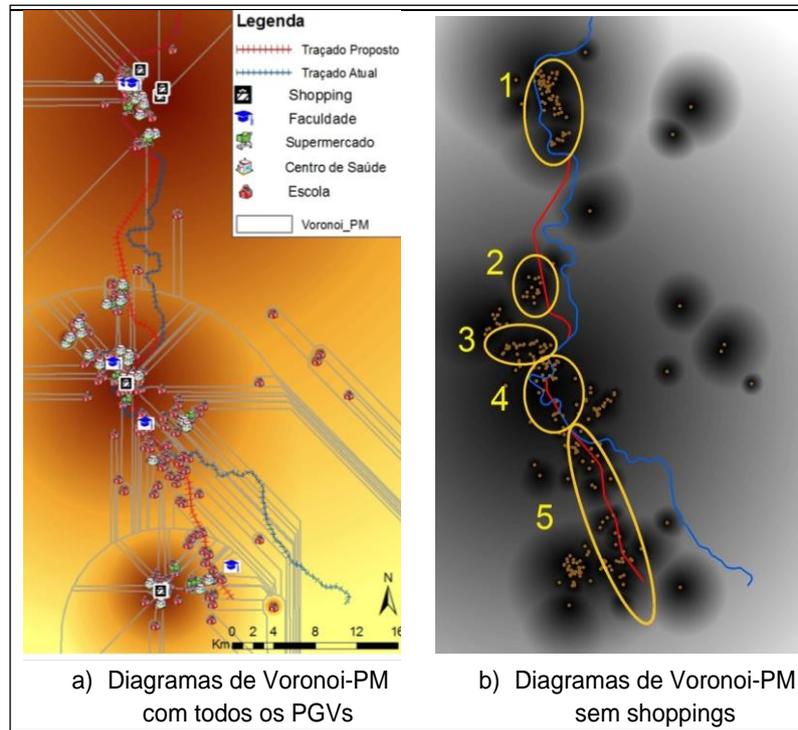


**Figura 2 - Diagramas de Voronoi-PM para cada categoria de PGV**

O diagrama da Figura 3 (a) permite a visualização de três principais regiões de influência dos PGVs. Por sua vez, a Figura, 3 (b) possibilita a identificação de áreas secundárias de concentração de atividades, as quais estão identificadas nas elipses de 1 a 5.

Identificadas, na etapa anterior, áreas de concentração de atividades, realizou-se a análise dos pontos de integração. Para isso, foram identificados os componentes da rede de

transporte na região, sendo eles linhas de ônibus, a linha do metrô DF, as linhas de BRT e de Veículo Leve sobre Trilhos -VLT (previstas no Plano Diretor de Transporte e Mobilidade do DF – PDTU/DF) e as vias que cruzam o traçado do trem e podem ser usadas como vias de alimentação. Esse levantamento está e ilustrado na Fig. 4.



**Figura 3 - Diagramas de Voronoi-PM gerados a partir dos PGVs**

## 5. DISCUSSÃO

### 5.1 Análise dos Resultados

O primeiro ponto a ser observado nos resultados é a considerável influência exercida pelos shoppings frente a outros PGVs na geração de viagens na região, com volume de viagens geradas nos horários de pico variando de 4000 a 18000. Apesar de notório que a quantidade de fluxo de viagens geradas depende muito mais do porte do estabelecimento do que do tipo, ao se analisar a grande influência dos shoppings é possível notar a presença de certa hierarquização entre os Polos Geradores de Viagens.

No que diz respeito aos resultados mostrados na Figura 6, o primeiro ponto a ser comentado é sobre a concordância das formas geométricas com o apresentado na literatura pesquisada sobre os Diagramas de Voronoi-PM. Observa-se, por exemplo, na figura dos shoppings que os polos denominados Luziânia shopping e Shopping Sul tem valores de  $V$ , respectivamente, 3762 e 8995. A envoltória da área de influência é então uma curva que é parte de um círculo (o círculo de Apolônio) e se mantém côncava para o Luziânia Shopping, que tem menor valor de  $V$  e convexa para o Shopping Sul, com maior valor de ponderação.

Além disso, sabe-se que quando muitos pontos são analisados conjuntamente, o diagrama se constrói de forma iterativa, onde a área de influência de cada ponto gerador será delimitada de acordo com o comportamento relativo de cada um dos pontos com os pontos ao redor, o que é refletido pela relação  $k$  entre os pesos. Assim, nota-se que existem dois padrões de diagramas que podem ser analisados.

O primeiro padrão, tem o valor de  $k$  (relação entre pesos) próximo a 1, o que corresponde à feição do diagrama representada pela pequena variação entre valores dos pesos. Nesta categoria, os pontos geradores do diagrama tem região de influência bem delimitadas, o que reflete na influência local desses pontos. O melhor exemplo deste caso é o diagrama das escolas (Figura 2). Devido o grande número de pontos e também devida a baixa diferença entre o valores de ponderação dos pontos, a região de influência de cada escola fica bem delimitada.

O segundo padrão se configura pela grande diferença entre os valores de peso, gerando valores de  $k$  quase nulos ou muito altos. Neste caso, é possível identificar o ponto gerador de maior peso exercendo sua grande influência sob os demais pontos, ofuscando-os e distorcendo radialmente as linhas do diagrama. Observa-se este fenômeno no diagrama de saúde (Figura 2). Devido ao seu alto valor de  $V$  (geração de 1101 viagens diárias) frente aos demais, o hospital denominado HRSM distorce as linhas de delimitação dos centros de saúde mais próximos, que tem sua região de influência diminuída. Pode-se observar o mesmo aspecto nos pontos próximos ao Carrefour e ao Park Shopping e no diagramas de universidades.

Outro aspecto gerado pela discrepância entre pesos é o fato do ponto de maior peso englobar os pontos de menores pesos mais próximos. Isso acontece, pois, chega-se a uma diferença tão alta entre os valores de ponderação, que o ponto de menor peso passa a não ter relevância nenhuma naquela região. Isso pode ser notado pelos pontos englobados pelo HRSM e em alguns pontos do diagrama das escolas.

Por sua vez, no diagrama de Voronoi-PM para todos os polos geradores de viagens – Figura 3 (a) - é possível notar três regiões de influência predominantes, delimitadas principalmente pelos shoppings, que como já mencionado, apresentam os maiores volume de viagens dentre todos os PGVs.

A primeira região de influência, representada pelo círculo maior é delimitado principalmente pela presença do Park Shopping ( $V=18020$ ), do Shopping Casa Park ( $V=8146$ ), do Shopping Florida ( $V=2641$ ) e do Hipermercado Carrefour ( $V=4748$ ). Eles têm os maiores valores absolutos da região, exercendo influência em toda a área de estudo, como pode ser notado pelo grande círculo e pelas linhas distorcidas.

A segunda região de influência, localizada na Cidade de Valparaíso, tem predominância do shopping Sul ( $V=8954$ ) e do Hipermercado Atacadão ( $V = 2100$ ). O terceiro círculo se

localiza na região central de Luziânia, tendo o Luziânia Shopping ( $V=3761$ ) como principal polo. Esta região não é interceptada pela linha atual do trem, o que indica uma necessidade de revisão do traçado.

Estas três grandes regiões de influência deixam claro que na região abrangida pelo trem, três grandes áreas devem ser consideradas. Estas regiões são fortes candidatas a abrigar as principais estações da futura linha de trem urbano.

O elevado valor de  $V$  dos shoppings frente ao baixo valor de  $V$  para outros polos torna necessário que seja analisado o diagrama de Voronoi-PM sem os shoppings Figura 3(b). Neste diagrama, nota-se que, mesmo mantendo ainda um ponto de predominância absoluta, o polo Hipermercado Atacadão, no Valparaíso, é possível identificar na Figura 3(b) as regiões de influência bem delimitadas. Isto permite identificar outras prováveis áreas de localização de estação fora daquelas determinadas pelos shoppings, que são mostradas nas elipses 1 a 5.

O posicionamento das estações nas áreas identificadas pela Figura 3 (a) e (b) deve ser feito analisando os aspectos viários e as possibilidades de integração oferecidas por terminais, linhas metroferroviárias e de ônibus existentes na região e levantadas na Etapa metodológica 4. Este procedimento permitiu o posicionamento das estações nos pontos ilustrados na Fig. 4 e descritos na Tabela 4.

## **5.2 Modelo Funcional Proposto**

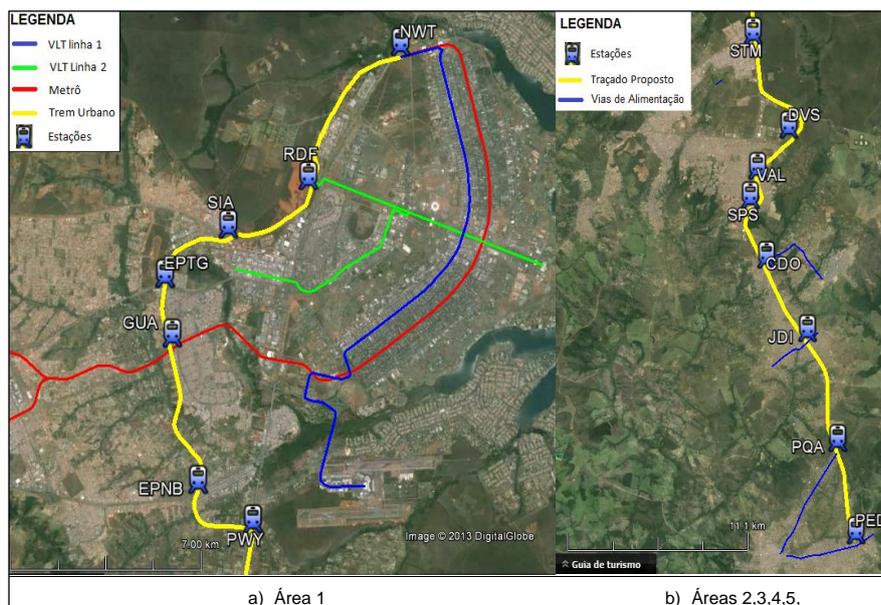
O Modelo Funcional proposto consiste em uma estrutura tronco-alimentadora em forma de um “T”, (Figura 5), onde as estações são classificadas, em função do seu grau de adensamento e sua importância para integração. O eixo troncal do “T” é uma representação da linha do trem urbano e o eixo de distribuição representa as linhas de metrô, ônibus e metrô leve, responsáveis pela repartição dos passageiros no centro de Brasília.

Para o modelo funcional são propostos 4 níveis de estações. Os três primeiros níveis correspondem aos três grandes círculos gerados no diagrama de Voronoi-PM mostrados na Figura 3(a). O quarto nível corresponde àquelas estações localizadas fora da região principal de influência dos PGVs, onde os polos são raros e esparsos. Estas estações tem como característica principal o acesso por carro (modelo *park and ride*) ou linha de ônibus alimentadora.

Em de cada nível, tem-se ainda, estações principais e secundárias. As principais são aquelas localizadas em regiões de grande concentração de PGVs com alto valor de  $V$ , e por isso são caracterizadas por um acesso predominantemente a pé. As secundárias podem ter acesso a pé e por linha alimentadora de ônibus. As estações finais estão na Figura 6.

As estações de nível 1 são importante no modelo funcional, pois são representadas pelas últimas estações da linha onde os passageiros desembarcarão (no caso de viagens de ida e

considerando regime pendular) a fim de se dirigirem ao destino final, principalmente à região central de Brasília.



**Fig. 4 - Áreas com potenciais de Integração**

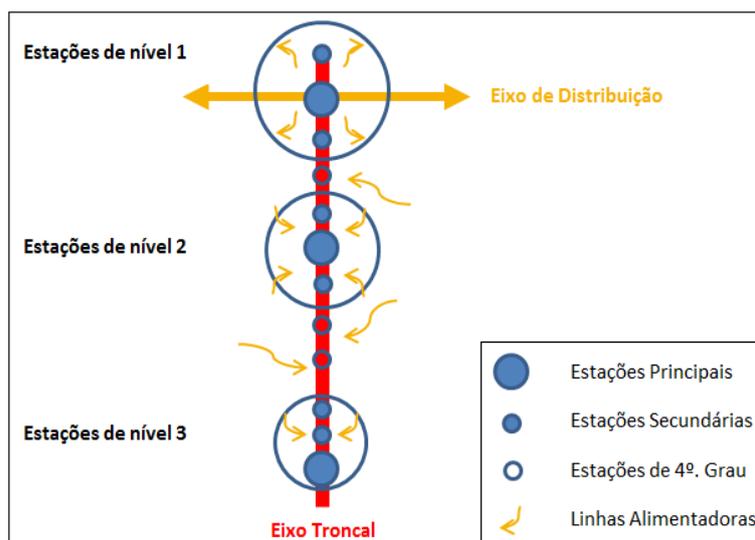
Área	Estação	Comentários
1	NWT	Futuro terminal do Noroeste, onde serão integrados a linha de expansão do metrô, a linha 1 do VLT e o BRT previstos no PDTU/DF.
	RDF	Terminal existente com linhas de ônibus que levam ao centro de Brasília. Futuro terminal da Linha 2 do VLT.
	SIA	Ponto de interceptação com via por onde passam linhas de ônibus e proximidade com a futura linha 2 do VLT.
	EPTG	Interceptação com corredor de ônibus expresso.
	GUA	Ponto de integração com o Metrô.
	EPNB	Integração com terminal rodoviário.
	PWY	Integração com corredor de BRT e com Aeroporto (Linha 1 do VLT).
2	STM	Integração com corredor de BRT.
3 e 4	DVS	Interceptação com rodovia/avenida a ser usada como via de alimentação/distribuição.
	VAL	
	OCI	
5	JDI	
	PQA	
	PED	

**Tabela 2 - Áreas Potenciais para Integração**

Tem-se a estação de nível 1 principal, representada pela estação de integração como o metrô (GUA) e as estações de nível 1 secundárias (SIA, EPTG, EPNB e NWT), que continuam mantendo a função de distribuir passageiros, porém em menor volume e majoritariamente pelo modo rodoviário.

As estações de nível 2 são as localizadas na cidade de Valparaíso, advindas do círculo

central da Figura 3 (a). A estação de nível 2 principal é a estação SPS e as estações secundárias são DVS, VLP e CDO.



**Figura 5 - Estrutura Conceitual do Modelo**

As estações de nível 3 se localizam no início da linha, no Município de Luziânia. A estação de nível 3 principal (LZA) localizar-se-ia na região central do município de Luziânia, porém um estudo mais aprofundado de demanda deve confirmar a necessidade de uma adequação ao traçado e a presença da estação no centro de Luziânia. As estações de nível 4, por sua vez, são as estações PWY, JDI, STM, PQA e PED.

Sendo assim, considerando-se o traçado proposto por Mendes (2013) (com as extensões até o NWT e até o LUC), tem-se o resultado final do modelo funcional mostrado na Figura 6 e na Tabela 3, que traz as estimativas operacionais da linha com os valores para o traçado proposto estendido e para o traçado atual até a Estação Cidade Ocidental.

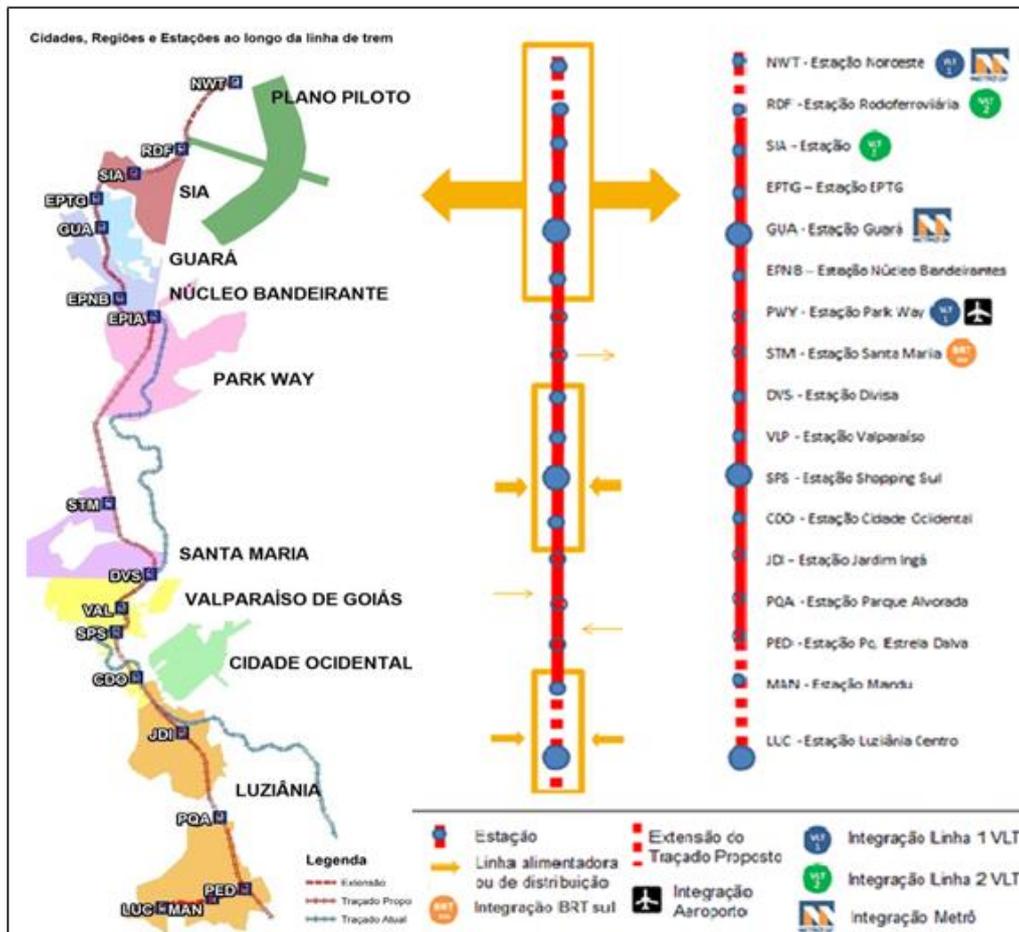
O traçado proposto tem um total de 17 estações, comprimento de 75 km e tempo de viagem estimado de 62 minutos. O traçado atual tem uma área de cobertura menor, com 11 estações, comprimento de aproximadamente de 62 km e tempo estimado de 53 minutos até a Cidade Ocidental. Estes valores indicam que o traçado proposto é mais adequado frente ao traçado atual, que apresenta maior extensão (devido sua sinuosidade) e uma menor área de cobertura. É importante ressaltar que a diferença de tempo deve-se a maior quantidade de estações (5 estações a mais) no traçado proposto uma vez que este aproxima-se mais da área urbana de Luziânia enquanto o traçado atual passa somente pela área industrial, que é pouco adensada.

Os valores de tempo são apresentados levando-se em conta as informações de velocidade média de trem urbano ( $V=70$  km/h, considerando as paradas) apresentadas por Fleming (s.d). Sugere-se que seja feito estudo detalhado da quantidade de estações e espaçamento, conforme indica Vuchic (2005), a fim de se determinar as velocidades e tempos de viagem para a linha. Este estudo deve considerar ainda a Matriz Origem destino da região.

Especificações	Traçado Proposto	Traçado Atual
Comprimento total do traçado	75	61,67*
Total de Estações	17	11
Média de Espaçamento (km)	4,68	6,16
Densidade de Estações (sta/km)	0,23	0,18
Tempo Total Estimado	62	53*

**Tabela 3 - Especificação das estações**

\*Até a estação Cidade Ocidental



**Figura 6 - Estações ao longo da Linha e Modelo Funcional**

## 6. CONCLUSÃO

O método revela-se adequado para estudos de localização de estações de trem urbano, pois facilita a identificação das áreas de atratividade e de concentração de atividades de uma região, além das possibilidades de integração oferecidas pela rede de transportes. O método também se mostra uma etapa importante no processo de planejamento de linhas de trem urbano, que ainda deve considerar os aspectos operacionais e econômicos de sua implantação e a matriz origem destino da região.

A aplicação do método para o Eixo sul da RMB resultou em um modelo de transporte que pode fazer frente a crescente demanda por transporte no Eixo Sul da RMB e pode beneficiar mais de 700.00 habitantes. O modelo ainda se mostra uma alternativa de transporte integrado que pode melhorar o acesso dos moradores das cidades do estado de

Goiás ao centro de Brasília, além de ser uma proposta sustentável, a medida que diversifica as opções para os usuários do transporte individual.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se que seja feita a atualização da Matriz Origem Destino trazida no PDTU/DF de forma que a demanda de viagens seja considerada isoladamente para cada uma das cidades do Estado de Goiás. Sugere-se ainda que seja construído um modelo de otimização levando-se em conta esta demanda juntamente com os aspectos operacionais e econômicos da linha de trem urbano.

## REFERÊNCIAS

- CARNASCIALI, A., DELAZARI, L., & SANTOS, D. (2011). Determinação de áreas de abrangência de agência bancária pelo diagrama de Voronoi com obstáculos. *Boletim de Ciências Geodésicas*.
- DENATRAN (2001) *Manual de procedimentos para o tratamento de polos*, Departamento Nacional de Trânsito, Brasília.
- DEVULAPALLI, R. (2012). *Dividing a Territory Among Several Facilities*, Geographic resource allocation, University of Minnesota.
- DONG, P., (2008). *Generating and updating multiplicatively weighted Voronoi diagrams for point, line and polygon features in GIS*. Computers & Geosciences, Vol. 34, p. 411-421.
- GAHEGAN, M., & LEE, I. (2000). *Data structure and algorithms to support interactive spatial analysis using dynamic Voronoi diagrams*. (E. S. Ltd, Ed.) Computers, Environment and Urban Systems, pp. 509-537.
- FLEMING, G. (S.D.). *The Northeast Florida Leadership Academy - NFRLA*. Fonte: Commuter Rail Overview: [http://www.nefrla.com/What\\_is\\_Commuter\\_Rail.pdf](http://www.nefrla.com/What_is_Commuter_Rail.pdf)
- HORNER, M. W., & GRUBESIC, T. H. (2001). *A GIS-based planning approach to locating urban terminal*. Transportation 28, pp. 55-77.
- NOVAES, A. G. (2007). *Resolução de Problemas de Transporte com Diagramas de Voronoi*, XXI ANPET, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, RJ.
- PDTU. (2011). *Plano Diretor de Transporte Urbano e Mobilidade do Distrito Federal e Entorno*. Secretaria de Estado de Transportes, Altran-TCBR, Brasília.
- REPOLHO, H.M.; ANTUNES, A.P.; CHURCH, R.L. (2012). *Optimal Location of Railway Stations: The Lisbon-Porto High-Speed Rail Line*, *Jornal of Transportation Science*, v.47, i3, p. 330-343
- SILVA, A. H. (2008). *Determinação da Área de Estudo de Captação de uma Estação de Metrô por meio da utilização do Modelo Prisma Espaço-Tempo e Padrões de Viagens*. Dissertação de Mestrado em Transportes, Universidade de Brasília, Brasília.
- VUCHIC, V. R. (2005). *Urban Transit: Operations, planning and economics*, John Wiley & Sons, INC, Hoboken, New Jersey.
- WEISSTEIN, E. W. (2013). *Voronoi Diagram*. Acesso em 24 de Abril de 2013, disponível em Wolfram Math World: <http://mathworld.wolfram.com/VoronoiDiagram.html>
- YONGXI, G., GUICAI, L., YUAN, T., & YAOYU, L. (2012). *A vector-based algorithm to generate and update multiplicatively weighted Voronoi diagrams for points, polylines, and polygons*. Computers & Geosciences, pp. 118-125.