

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA DEFINIÇÃO DE PRÉ-CANDIDATOS A INSTALAÇÕES EM PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO

Cauê Sauter Guazzelli

Claudio Barbieri da Cunha

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo avaliar métodos para a definição de pré-candidatos para o Modelo Discreto de Localização de Instalações com Custo Fixo aplicado ao contexto logístico entendendo o impacto dos diferentes métodos para a construção do conjunto de pré-candidatos em problemas realistas. Instâncias criadas com base em dados reais da Região Sudeste do Brasil foram geradas e os resultados ótimos (obtidos considerando todos os pontos como pré-candidatos) foram analisados e comparados com os resultados dos métodos de definição de pré-candidatos propostos. O método que definiu como pré-candidatos os 40% pontos com maior demanda foi capaz de obter a solução ótima em 83% das instâncias. Para as demais instâncias, o valor da solução obtida pelo método foi de no máximo 0,29% pior que o valor da solução ótima.

ABSTRACT

The aim of this research is to evaluate methods for the definition of pre-candidates to the Discrete Fixed Charge Facility Location Model applied to logistical context, while understanding the impact of different methods for the construction of the set of pre-candidates in realistic problems. Instances based on real data of the Southeast region of Brazil were generated and the optimal results (obtained considering all points as pre-candidates) were analyzed and compared with the results of the methods of definition of pre-candidates. The method that consisted of defining as pre-candidates the 40% points with greater demand was able to obtain the optimal solution in 83% of instances. In all other instances, the value of the solution obtained by method was at maximum 0.29% worse than the optimal solution value.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho aborda a avaliação do impacto da qualidade de pré-candidatos em modelos discretos de localização aplicados em decisões de projeto ou configuração de redes logísticas.

De acordo com Novaes (1989), o problema da localização de instalações tem sido tratado de modo bastante amplo na literatura, envolvendo desde problemas mais simples de localização de uma única instalação até problemas bastante complexos, com várias instalações a serem localizadas, em diversos níveis de uma cadeia produtiva. As decisões de localização, no contexto do planejamento logístico, correspondem à determinação do número, localização e tamanho das instalações a serem usadas (Daskin, 1995).

Os modelos matemáticos mais comumente utilizados em processos de configuração de redes logísticas são do tipo discreto, cuja solução consiste na definição de quais locais deverão ser selecionados como futuras instalações logísticas, dado um número finito de locais candidatos pré-selecionados (Daskin, 1995).

Uma barreira que inspira a pesquisa científica sobre localização de instalações é que os modelos matemáticos resultam serem do tipo *NP-hard*, o que significa que os tempos de processamento requeridos para sua solução crescem exponencialmente com o tamanho do problema. Tal fato dificulta a resolução de problemas de maiores dimensões, de forma a se aproximar mais da realidade que procuram representar. Sendo assim, usualmente procura-se limitar o tamanho do problema a ser modelado, o que inclui o número de locais candidatos a instalações pré-determinados.

Em função disso, é importante definir a localização e quantidade mínima de locais pré-candidatos que asseguram que os resultados dos modelos de otimização sejam os ótimos (ou estejam suficientemente próximos ao valor ótimo) de forma a viabilizar a rodada dos modelos em termos de tempos de processamento computacional. Mais especificamente, o ponto chave para o problema é o de como definir, da melhor forma possível, o conjunto de pré-candidatos considerados nos modelos que representam a realidade da logística das empresas, de forma a se obter as soluções adequadas à realidade a um tempo de solução computacional razoável. Trata-se de um aspecto ainda pouco estudado na literatura científica de localização de instalações.

São analisados neste artigo dois métodos de identificação de pré-candidatos: seleção dos P pontos com maior demanda e determinação de P clusters a partir do qual se escolhem os pré-candidatos como o ponto de maior demanda de cada cluster. Para a análise dos métodos propostos foram geradas instâncias do Problema de Localização de Instalações com Custo Fixo (*Fixed Charge Facility Location Problem – FCFLP*), baseadas em dados reais da Região Sudeste do Brasil. Também é avaliado o impacto que um conjunto ruim de pré-candidatos pode ter no resultado do modelo de localização, o que levanta a importância de se aprofundar no estudo da definição de pré-candidatos considerados em modelos discretos de localização.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 é apresentada uma revisão bibliográfica relacionada ao tema. A seção 3 apresenta a metodologia aplicada ao estudo e na seção 4 os resultados são apresentados. A seção 5 apresenta as considerações finais. Ao final são apresentadas as referências bibliográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Daskin (1995) apresentou alguns modelos matemáticos discretos fundamentais de localização. Estes modelos servem como base para formulações derivadas que por sua vez abordam outras características das operações logísticas.

O chamado modelo de cobertura tem o objetivo de identificar o menor conjunto de instalações que garantam que todos os pontos de demanda tenham a distância da instalação mais próxima menor ou igual ao tempo máximo definido T . Na formulação clássica deste modelo o custo fixo não é considerado, senão indiretamente, por meio da busca da quantidade mínima de instalações necessárias. Tampouco o custo de transporte é representado neste tipo de modelo.

Farahani *et al.* (2012) apresentam uma revisão completa sobre este tipo de modelo, apresentando o problema clássico e algumas variações e investigando soluções e aplicações. Segundo os autores, a pesquisa tenta revisar todos os aspectos de problemas de cobertura abrangendo detalhadamente os trabalhos desenvolvidos nas duas décadas anteriores.

Uma alternativa ao modelo de cobertura é o modelo de P -centros, que considera a quantidade de instalações dada *a priori* de forma exógena. Seu objetivo então é a busca de uma configuração que minimize o tempo (ou distância) máximo entre um ponto de demanda e a instalação mais próxima. O objetivo deste problema pode ser representado também, no contexto logístico, como o de minimizar o pior nível de serviço, dado uma quantidade de instalações estipulada (que pode ser considerada como uma forma de estimar o custo fixo da operação).

O modelo de P -medianas é uma evolução do modelo de P -centros, e tem como função objetivo a minimização da distância total ponderada entre as instalações e os pontos de demanda a estas alocadas. Além de fornecer soluções com o nível de serviço global melhor, este tipo de modelo também desempenha uma melhor aproximação ao objetivo de minimizar o custo operacional, retratado neste caso pela menor distância geral (ou tempo geral) entre as instalações logísticas e os clientes.

Uma vez que os custos de transporte de maneira geral apresentam uma relação direta com o momento de transporte gerado (distância \cdot quantidade), é possível utilizar a distância como uma aproximação do custo de transporte por unidade transportada. Dessa forma, a solução ótima obtida por este modelo pode ser interpretado, no contexto logístico, como a solução de menor custo de transporte (e melhor nível de serviço), dado um número de instalações abertas definido a priori (que pode ser considerada como uma forma de estimar o custo fixo da operação).

Para mais detalhes sobre modelos dos tipos P -centros e P -medianas, recomenda-se o trabalho de Reville *et al.* (2008). Exemplos de aplicação ao caso logístico podem ser observados em An *et al.* (2014). Como um exemplo de aplicação, Dantrakul *et al.* (2014) utilizam modelos de P -centros e P -medianas como parte de heurísticas de solução para problemas de localização de plantas de força por combustão de biomassa e locais de armazenagem de resíduos de agricultura.

Apesar de ser capaz de representar de forma adequada uma série de sistemas físicos reais, a necessidade de que a quantidade de instalações a serem selecionadas deve ser definida *a priori* (igual a P) pode não ser apropriadas para algumas situações que envolvem a localização de instalações.

Uma das extensões possíveis do problema das P -medianas que tem o objetivo de gerar modelos que representam de uma forma melhor operações reais é a consideração direta dos custos fixos de cada instalação aberta, que são decorrentes de fatores que não dependem do volume movimentado, como custos de aluguéis e de funcionários não ligados diretamente à operação.

O problema que trata a localização considerando estes custos fixos é denominado Problema de Localização de Instalações com Custo Fixo (*Fixed Charge Facility Location Problem* – FCFLP), que para casos configuração de redes logísticas de uma camada também é conhecido como Problema de Localização de Planta Simples (*Simple Plant Location Problem*) (Hansen, 1976) ou Problema de Localização de Armazéns (*Warehouse Location Problem*) (Baumol e Wolfe, 1958).

Ao ser considerado um custo fixo associado a cada unidade selecionada, o custo fixo total da solução reduz conforme P diminui. Por outro lado, como a hipótese considerada até então diz que o custo de transporte entre dois pontos tem relação direta com sua distância, é possível deduzir que de uma maneira geral o custo de transporte do problema diminui conforme P aumenta. Dessa forma, em problemas P -medianas ou P -centros do tipo vértex (quando o conjunto de pré-candidatos e o conjunto de clientes são iguais) a solução de mínimo custo de transporte é quando $P = |A|$, isto é, todos os pré-candidatos são selecionados.

Estas relações implicam que o modelo é capaz de definir endogenamente a quantidade ideal de instalações que minimiza o custo global, obtendo o equilíbrio entre custo fixo e custo de transporte. Este efeito é representado na Figura 1 para um exemplo genérico da variação dos custos em função da quantidade de instalações selecionadas.

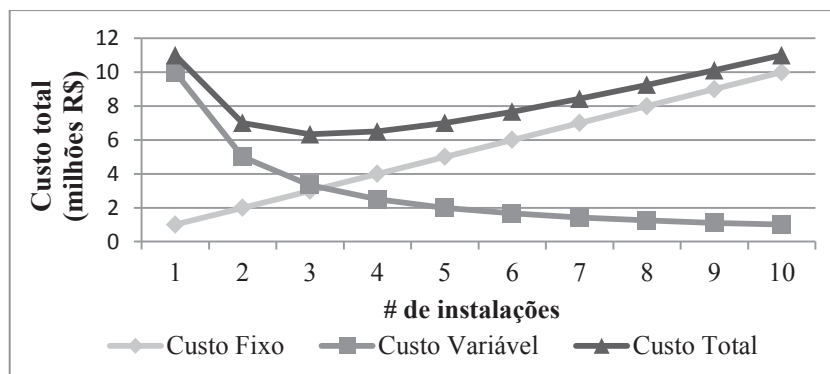


Figura 1: Exemplo de custo total com aumento de instalações

Segundo Reville *et al.* (2008), modelos de localização discreta assumem que existe um conjunto discreto de pontos de demanda L , e um conjunto discreto de candidatos C . É padrão em pesquisas científicas sobre localização que os modelos estudados e propostos assumam um dado conjunto de candidatos conhecido previamente. Para todos os problemas apresentados nesta revisão, se assume que os conjuntos C e L são definidos:

Em alguns casos todos os pontos de demanda são definidos como candidatos, conhecido como o problema vértex (Quevedo-Orozco e Ríos-Mercado, 2013). Essa abordagem é pouco utilizada em problemas realistas, uma vez que a quantidade de candidatos aumenta a quantidade de variáveis dos modelos (mais variáveis binárias de abertura e mais variáveis de quantidade transportada ou alocação). Como os modelos de localização são *NP-hard*, o tempo de processamento de alguns modelos pode ser muito grande.

Apesar da recente evolução em modelos matemáticos que consideram muitos aspectos de operações físicas reais, a literatura científica não abordou até o momento métodos para definição dos pré-candidatos. Uma das poucas referências ao estudo de definição de pré-candidatos considera o problema de forma a obter pontos de alto valor dentro de cada agrupamento de atividade (*high value cluster*), como encontrado em Bandyopadhyay e Singh (2012).

Simchi-Levi *et al.* (2000), por sua vez, apontaram sobre a importância de se identificar locais potenciais de forma eficaz. Os autores sugerem que sejam definidos como candidatos os locais que satisfaçam as seguintes condições: condições geográficas e de infraestrutura; existência de mão-de-obra e recursos naturais; existência de zonas industriais e regulação de impostos; questões de interesse público.

Apesar dos trabalhos citados, não são encontrados na literatura até o momento estudos que propõem uma metodologia para identificar pontos com maior potencial para abrigarem instalações logísticas que devem ser utilizados como candidatos nos modelos de otimização.

3. METODOLOGIA

A avaliação dos métodos para definição de pré-candidatos consiste na comparação das soluções de uma gama de problemas de localização obtidas considerando todos os pontos de demanda como potenciais instalações ($C=L$) com as soluções que consideraram subconjuntos dos pontos de demanda como potenciais instalações ($C \subset L$). Os subconjuntos C são definidos por cada um dos métodos avaliados. Um esquema da metodologia utilizada para a avaliação dos métodos é apresentado na Figura 2.

Inicialmente um modelo de programação linear inteira mista foi desenvolvido para solucionar o FCFLP. Posteriormente foram criadas instâncias com base em dados reais da Região SE do Brasil. Todas as instâncias foram solucionadas por meio do modelo desenvolvido, primeiramente com o modelo vértex, onde foram considerados todos os pontos de demanda como pré-candidatos e posteriormente por meio de dois métodos propostos de definição de pré-candidatos. Por fim os resultados dos modelos para cada instância foram comparados, o que permitiu que os métodos propostos fossem avaliados.



Figura 2: Metodologia utilizada na análise de métodos de definição de pré-candidatos

3.1 O Modelo de Localização de Instalações com Custo Fixo

O Problema de Localização de Instalações com Custo Fixo consiste em buscar uma solução de mínimo custo associada à seleção de um subconjunto de instalações que serão abertas, dado um conjunto de pré-candidatos C . Além disso, se deve definir a quantidade de produto que cada cliente l recebe de cada uma das c instalações abertas. O custo total da solução é composto por uma parcela fixa, em função da quantidade de instalações abertas, e de um custo variável, associado ao custo de transporte unitário entre a única origem até as instalações c mais o custo de transporte unitário entre as instalações c e os clientes l .

O FCFLP pode ser formulado como:

Conjuntos:

C : conjunto de locais pré-candidatos a pontos de distribuição;

L : conjunto de clientes;

Parâmetros:

c_{cl} : custo de transporte unitário entre o candidato c e o cliente l , com $c \in C$ e $l \in L$

ca_c : custo de transporte unitário entre a origem e o candidato c , com $c \in C$

cf_c : custo fixo do candidato c , com $c \in \mathbf{C}$

d_l : demanda do cliente l , com $l \in \mathbf{L}$

D : número grande, neste caso podendo ser a soma da demanda de todos os clientes

As variáveis de decisão são:

$$z_c = \begin{cases} 1 & \text{se o candidato } c \text{ será aberto} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}, \text{ com } c \in \mathbf{C}$$

q_{cl} = quantidade de produto enviado do candidato c até o cliente l , com $c \in \mathbf{C}$ e $l \in \mathbf{L}$

Minimizar:

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} cf_c \cdot z_c + \sum_{c \in \mathbf{C}} \sum_{l \in \mathbf{L}} (ca_c + c_{cl}) \cdot q_{cl} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} q_{cl} = d_l, l \in \mathbf{L} \quad (2)$$

$$q_{cl} \leq D \cdot z_c, c \in \mathbf{C} \text{ e } l \in \mathbf{L} \quad (3)$$

$$q_{cl} \geq 0, c \in \mathbf{C} \text{ e } l \in \mathbf{L} \quad (4)$$

A função objetivo (1) representa o custo total da operação, composto pelos custos fixos das instalações e os custos variáveis de transporte. As restrições (2) garantem que todos os clientes recebam quantidade igual à sua demanda. Já as restrições (3) garantem que apenas as instalações selecionadas forneçam produtos para os clientes e as restrições (4) garantem a não negatividade das variáveis contínuas.

3.2 Instâncias

Foram construídas 12 instâncias que consistem no problema de localização de centros de distribuição para atendimento da Região Sudeste do Brasil, abastecidos por uma única fábrica, capaz de produzir toda a demanda da região. Para tal, foram levantados dados de população levantados no Censo 2010 de cada uma das 147 microrregiões definidas pelo IBGE dos estados de SP, RJ e MG.

Foi considerado que a demanda total era de dez mil unidades de um único tipo de produto e que cada microrregião consistia em um ponto de demanda. A demanda total foi distribuída pelas 147 microrregiões com base na população.

Uma matriz de distância rodoviária entre todos os pontos foi construída. A distância média ponderada pelo volume entre todos os pontos foi de 423,85 km. A microrregião com a menor distância ponderada entre todos os demais pontos foi a de Pouso Alegre, situada no sul de Minas Gerais, que foi definida como local da fábrica que abastece todos os CDs.

Para as 12 instâncias, o custo unitário de transporte primário foi definido como o de um real por km (R\$ 1,00/km) por produto transportado. As instâncias se diferenciam pelos custos fixos e custos unitários de transporte secundário. Foram definidos três valores de custo fixo

(R\$ 4.238.543; R\$ 423.854 e R\$ 42.385) e quatro valores de custo unitário de transporte secundário (1; 1,5; 2 e 4 reais por km por produto transportado), conforme mostrado na Figura 3.

Identificação da instância	11	12	13	14	21	22	23	24	31	32	33	34
Demanda total (unidades)	10.000											
# de pontos (clientes)	147											
Custo do transporte primário (R\$/produto/km)	1											
Custo fixo (R\$/unidade)	R\$ 4.238.543				R\$ 423.854				R\$ 42.385			
Custo do transporte secundário (R\$/produto/km)	1	1,5	2	4	1	1,5	2	4	1	1,5	2	4

Figura 3: Características das instâncias testadas

As relações entre custo primário (fábrica→CD), custo secundário (CD→cliente) e custo fixo foram alteradas nas instâncias para que elas retratassem diferentes tipos de operações reais.

É esperado que quanto maior o custo fixo, menor a quantidade de instalações na solução ótima. Os valores de custo fixo foram definidos com base na demanda total, no custo primário e na distância média entre todos os pontos de demanda. O custo fixo das quatro primeiras instâncias equivale a 100% do *custo padrão médio do transporte primário*, definido como sendo o custo unitário de transporte primário vezes a demanda total vezes a distância média ponderada entre todos os pontos. O custo fixo das quatro seguintes instâncias equivale a 10% do mesmo valor e o das quatro últimas instâncias a 1% do valor.

Por outro lado, quanto maior o custo unitário do transporte secundário em relação ao transporte primário é esperado que a quantidade de instalações na solução ótima seja maior de forma a reduzir a necessidade de percorrer longos trajetos dos CDs até os clientes. Os valores do custo unitário de transporte secundário foram definidos para retratar os diferentes tipos de veículos utilizados em operações logísticas. Algumas operações podem utilizar veículos maiores, iguais aos veículos normalmente utilizados no transporte primário, e outras operações podem necessitar de veículos com capacidade muito menor, que apresentam custos unitários de transporte maiores.

3.3 Métodos de identificação de pré-candidatos

Foram avaliados dois métodos para a obtenção de pré-candidatos, sendo que para cada um deles foram simulados três cenários, considerando 15, 30 e 60 pré-candidatos, que representam respectivamente 10%, 20% e 40% da quantidade de pontos de demanda.

O conceito utilizado no levantamento dos pré-candidatos é que os custos secundários serão mais baixos quando os CDs forem localizados mais próximos das demandas. Dessa forma, surgem naturalmente como pré-candidatos locais com maior demanda.

3.3.1 Método 1: Seleção dos P pontos com maior demanda

O primeiro método consiste na definição dos pré-candidatos como os P pontos com maior demanda.

Embora este método deva ser capaz de propor um bom conjunto de pré-candidatos quando a demanda é mais concentrada em grandes cidades, pode deixar de sugerir pré-candidatos que,

embora com demanda pequena, são localizadas em locais muito afastados das regiões com maior demanda, o que poderia causar sua seleção na solução ótima.

3.3.2 Método 2: Pré-Seleção dos pontos de maior demanda dos *P*-clusters

O segundo método consiste na criação de *P*-clusters e na definição dos pré-candidatos como o ponto de maior demanda de cada *cluster*. Esta abordagem tem o objetivo de sanar o problema do método 1, ao identificar pré-candidatos que se localizam mais longe dos principais centros de demanda e que se destacam em sua região.

Os *clusters* são definidos com base em um algoritmo randômico que utiliza as distâncias euclidianas entre os pontos. O algoritmo consiste em uma fase de construção inicial e uma fase de melhoria, cujo pseudocódigo é apresentado na Figura 4.

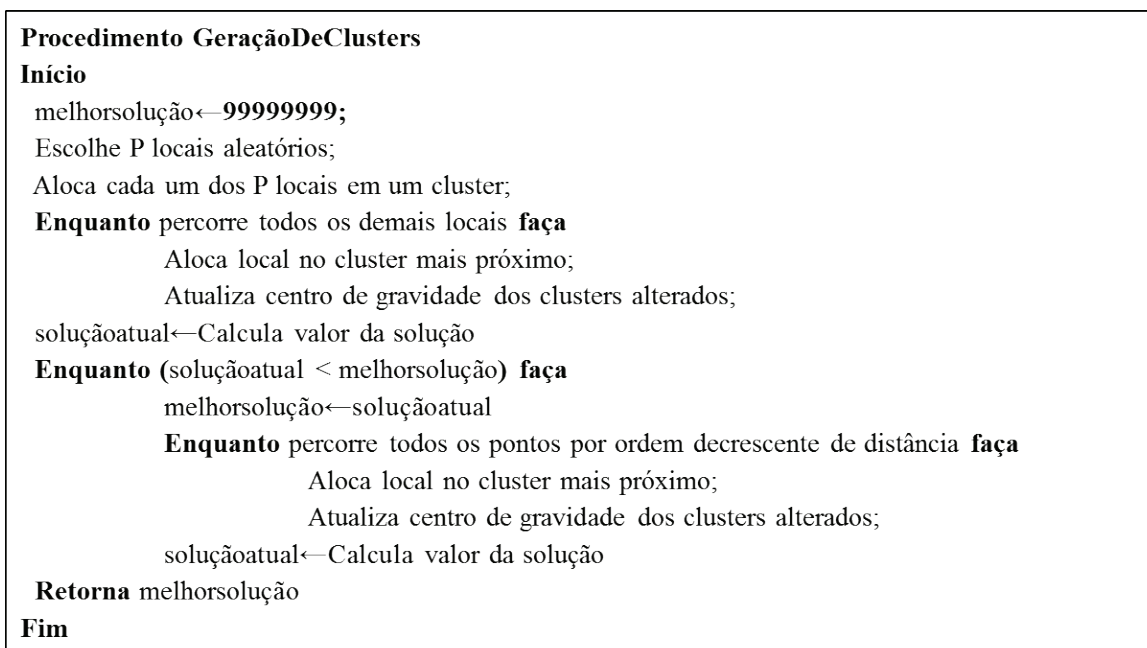


Figura 4: Pseudocódigo para geração de *clusters*

Na fase de construção são selecionados aleatoriamente *P* locais, associando cada um deles a um cluster. Em seguida são percorridos todos os demais locais e alocados ao *cluster* com o centro de gravidade mais próximo.

Na fase de melhoria percorrem-se todos os pontos ordenados pela maior distância entre cada um e o centro de gravidade do *cluster* a que pertence. Se existe algum centro de gravidade de outro *cluster* mais próximo, o ponto é realocado para o novo *cluster*. O processo de melhoria é feito até que em uma iteração a solução não se altere.

A Figura 5 apresenta três mapas que mostram os resultados das rodadas do método de geração de *clusters* com 15, 30 e 60 *clusters*.

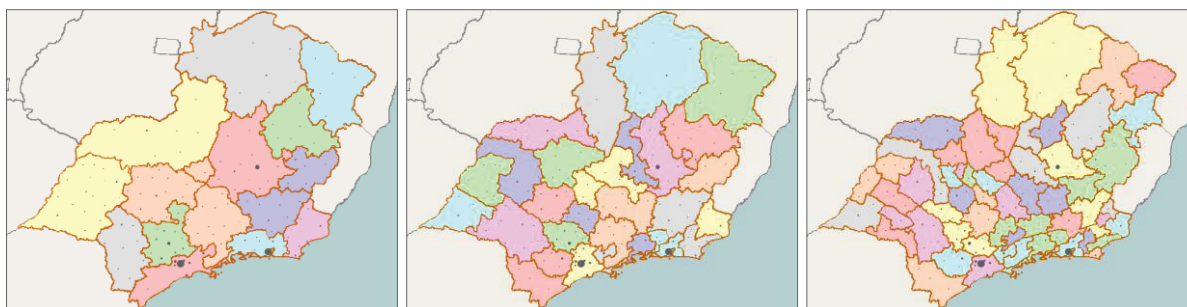


Figura 5: Resultados da criação de clusters do método 2 com 15, 30 e 60 clusters

3.3.2.1 Cluster definidos como mesorregiões do IBGE

Para o segundo método, foi simulado um cenário adicional, onde cada *cluster* representava o grupo de microrregiões contidas na mesma mesorregião, também definida pelo IBGE. No total existem 34 mesorregiões na região considerada, sendo que como pré-candidatos para este cenário foi escolhida a microrregião com maior demanda de cada uma das mesorregiões existentes.

4. RESULTADOS

O modelo foi aplicado por meio de um programa computacional desenvolvido em linguagem C#, que utilizou o Gurobi 6.0.0 como otimizador. Todas as instâncias foram rodadas em uma máquina ASUS[®] com processador Intel[®] Core™ i5-3317U CPU @ 1.70GHz, 3.60GB de memória, 64-bit e sistema operacional Windows 7.

Cada uma das 12 instâncias definidas foi solucionada oito vezes. Primeiramente foram rodados modelos considerando todos os pontos de demanda como pré-candidatos (Modelos Vértex). Depois as instâncias foram solucionadas mais sete vezes, sendo três delas pelo método 1 (M1-15C, M1-30C e M1-60C), com 15, 30 e 60 pré-candidatos, três delas pelo método 2 com definição de *clusters* (M2-15C, M2-30C, M2-60C), com 15, 30 e 60 pré-candidatos, e uma pelo método 2 com mesorregiões do IBGE (M2-Meso), com 34 pré-candidatos.

Tabela 1: Quantidade de instalações abertas em cada instância por cada método

Instância	Vértex	M1-15C	M1-30C	M1-60C	M2-15C	M2-30C	M2-60C	M2-Meso
Ins11	1	1	1	1	1	1	1	1
Ins12	1	1	1	1	1	1	1	1
Ins13	1	1	1	1	1	1	1	1
Ins14	2	2	2	2	2	2	2	2
Ins21	3	3	3	3	3	3	3	3
Ins22	4	4	4	4	4	4	4	4
Ins23	4	4	4	4	4	4	4	4
Ins24	4	4	4	4	4	4	4	4
Ins31	10	7	9	10	9	9	11	9
Ins32	12	9	13	12	12	12	12	12
Ins33	15	10	15	15	13	15	15	15
Ins34	15	11	15	15	14	15	15	15

Conforme esperado, a quantidade de CDs abertos foi menor nas primeiras instâncias (com custo fixo maior) e maior nas últimas instâncias (com custo fixo menor). Além disso, as soluções ótimas também apresentaram maior quantidade de CDs quando o custo unitário de transporte secundário aumentou. A Tabela 1 apresenta a quantidade ótima de CDs abertos em

cada uma das instâncias, bem como quantos CDs foram abertos pelos modelos carregados com os pré-candidatos definidos por cada método avaliado.

Considerando todas as instâncias, as soluções ótimas (obtidas pelos modelos vértex) selecionaram um total de 21 locais diferentes, sendo que São Paulo-SP (o ponto de maior demanda) foi selecionado em para todas as instâncias, o Rio de Janeiro-RJ (segunda maior demanda) foi selecionado 9 vezes (75% das instâncias) e Belo Horizonte-MG (terceira maior demanda) foi selecionado 8 vezes (67% das instâncias).

Os pontos que foram selecionados para pelo menos uma das instâncias que tinham demandas menores foram Lins-SP (102ª maior demanda), Cataguases-MG (75ª maior demanda), Birigüí-SP (56ª maior demanda). A Figura 6 mostra os pontos que fizeram parte de pelo menos uma das soluções ótimas das instâncias, sendo que o tamanho de cada ponto representa a quantidade de vezes que cada ponto foi selecionado.

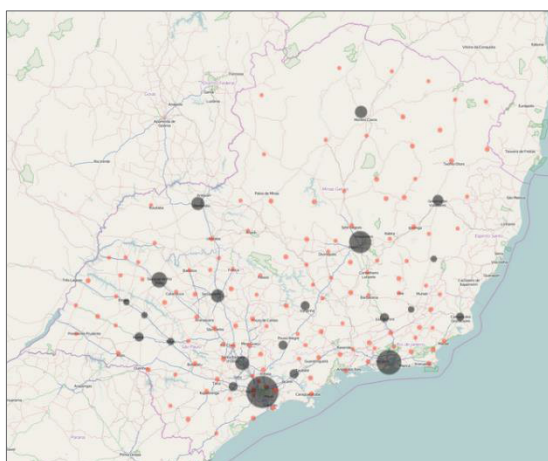


Figura 6: Pontos selecionados para as soluções ótimas dos problemas

Foi possível notar que os pontos com demanda alta não selecionados em soluções ótimas em nenhuma das instâncias se encontram próximos a outros pontos de grande demanda, como é o caso de Osasco, Santos, Guarulhos, Moji Das Cruzes e Itapecerica da Serra que se localizam relativamente próximos a São Paulo, fazendo com que os modelos atendam essas regiões a partir de uma instalação localizada na microrregião de São Paulo.

Como pode ser observado pela Tabela 2, todos os métodos foram capazes de obter modelos cujas soluções eram iguais às soluções ótimas para as instâncias de 11 a 14 e de 21 a 24. O método 1 considerando 60 pré-candidatos (M1-60C) também foi capaz de construir modelos cuja solução era a ótima para as instâncias 33 e 34 e muito próximas da ótima para as instâncias 31 e 32 (0,29% e 0,12% de diferença, respectivamente). Os métodos M2-60C, M2-Meso e M2-30C também obtiveram bom desempenho, sendo capazes de construir modelos cujas soluções diferiam em no máximo 1,1% da solução ótima para as instâncias de 31 a 34.

Tabela 2: Valor da Função objetivo e diferença dos métodos avaliados

Instâncias	Vértex (R\$)	Diferença percentual: solução ótima (vertex) x demais métodos						
		M1-15C	M1-30C	M1-60C	M2-15C	M2-30C	M2-60C	M2-Meso
Ins11	7.318.697	-	-	-	-	-	-	-
Ins12	8.857.703	-	-	-	-	-	-	-
Ins13	10.396.944	-	-	-	-	-	-	-
Ins14	16.138.206	-	-	-	-	-	-	-
Ins21	2.594.939	-	-	-	-	-	-	-
Ins22	3.225.541	-	-	-	-	-	-	-
Ins23	3.735.091	-	-	-	-	-	-	-
Ins24	5.774.671	-	-	-	-	-	-	-
Ins31	1.054.482	7,39%	2,22%	0,29%	1,75%	0,49%	0,64%	1,04%
Ins32	1.351.190	12,31%	2,16%	0,12%	1,29%	1,21%	0,18%	0,84%
Ins33	1.610.253	16,89%	1,64%	-	2,04%	0,88%	0,41%	0,41%
Ins34	2.584.994	28,75%	2,04%	-	4,78%	1,10%	0,52%	0,52%

É possível observar que o método 1 (M1-60C) não foi capaz de obter a solução ótima para as instâncias onde o custo fixo e custo secundário eram baixos em relação ao custo primário, uma vez que este tipo de característica nos custos motivou a abertura de instalações em pontos como Lins-SP e Cataguases-MG, que tinham boa localização em relação a outros pontos mas baixa demanda, e por isso não foram selecionados pelo método 1 (M1-60C).

A Tabela 3 mostra os tempos de processamento para a solução de cada uma das instâncias pelos modelos construídos por cada um dos métodos apresentados. Os modelos vértex apresentaram altos tempos de processamento, sendo que em uma instância (Ins21), o processamento foi interrompido por limite de tempo, definido em 2,5h e a melhor solução encontrada até o momento foi utilizada. Os tempos de processamento de todos os modelos gerados pelos diferentes métodos de definição de pré-candidatos foram significativamente menores em todas as instâncias.

Tabela 3: Tempo de processamento de cada instância por cada método avaliado (segundos)

Instância	Vértex	M1-15C	M1-30C	M1-60C	M2-15C	M2-30C	M2-60C	M2-Meso
Ins11	72,9	0,6	2,9	6,9	0,6	1,4	5,2	1,1
Ins12	235,4	1,2	2,8	9,3	0,7	1,5	7,0	1,4
Ins13	565,6	1,1	4,1	16,8	0,7	2,4	15,2	1,9
Ins14	865,3	1,3	14,1	473,1	0,8	8,9	151,4	5,2
Ins21	9.000,0*	0,8	6,4	51,1	0,6	4,5	59,0	3,0
Ins22	6.995,4	0,6	7,4	67,5	0,4	2,7	61,0	2,7
Ins23	7.354,2	0,6	4,2	42,7	0,4	1,8	35,3	2,0
Ins24	199,2	0,3	2,0	35,4	0,3	1,6	21,1	1,2
Ins31	140,2	0,2	2,4	26,2	0,2	1,0	11,1	4,9
Ins32	77,4	0,2	0,8	18,6	0,1	0,5	7,5	2,7
Ins33	109,3	0,2	0,7	13,8	0,1	1,1	11,8	1,1
Ins34	146,0	0,2	0,6	17,9	0,1	1,0	12,4	1,0

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste artigo foi avaliar algumas abordagens e métodos para a definição de pré-candidatos em modelos discretos de localização de instalações no contexto logístico, entendendo o impacto que diferentes métodos de construção do conjunto de pré-candidatos teria em problemas realistas.

Para tal, foram construídas instâncias de problemas de localização com base em dados reais da Região Sudeste do Brasil. Um modelo computacional foi implementado e alguns métodos foram aplicados na definição dos conjuntos de pré-candidatos. Os resultados das rodadas de otimização para todas as instâncias foram comparadas às soluções do modelo vértex, onde todos os pontos eram definidos como pré-candidatos.

Todos os métodos foram capazes de propor um conjunto de pré-candidatos que faziam parte da solução ótima (vértex) nas instâncias 11 a 14 (com custo fixo igual a 100% do custo padrão médio do transporte primário) e 21 a 24 (com custo fixo igual a 10% do custo padrão médio do transporte primário).

Para as demais instâncias, com custo fixo menor (e como se esperava, maior quantidade de instalações nas soluções ótimas), o método M1-60C também resultou nas soluções ótimas para as instâncias 33 e 34 (com custo unitário secundário respectivamente 2 e 4 vezes mais caros que o primário). Para as instâncias 31 e 32, o método M1-60 também teve o melhor desempenho em relação aos demais métodos, obtendo soluções com funções objetivo 0,29% e 0,12% piores que a solução ótima, respectivamente.

Esta pesquisa se limitou a um número não elevado de instâncias construídas com base em dados da Região SE do Brasil e a utilização de métodos de definição de pré-candidatos relativamente simples. Sugere-se como extensão desse estudo, a avaliação dos métodos apresentados a outras instâncias, que representem operações reais e/ou instâncias utilizadas na literatura, bem como a proposição e avaliação de novos métodos para a definição do conjunto de pré-candidatos dos modelos de localização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- An, Y.; B. Zeng; Y. Zhang e L. Zhao (2014) Reliable p-median facility location problem: two-stage robust models and algorithms. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 64, p. 54–72. DOI:10.1016/j.trb.2014.02.005.
- Bandyopadhyay, M. e M. Singh (2012) Spatial Pattern Analysis for finding Weighted Candidate Set for p-median Problem in Locating Emergency Facilities. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, v. 2, n. 5, p. 69–74.
- Baumol, W. J. e P. Wolfe (1958) A warehouse-location problem. *Operations research*, v. 6, n. 2, p. 252–263.
- Dantrakul, S.; C. Likasiri e R. Pongvuthithum (2014) Applied p-median and p-center algorithms for facility location problems. *Expert Systems with Applications*, v. 41, n. 8, p. 3596–3604. DOI:10.1016/j.eswa.2013.11.046.
- Daskin, M. S. (1995) *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*. Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications. John Wiley & Sons, Berlin.
- Farahani, R. Z.; N. Asgari; N. Heidari; M. Hosseini e M. Goh (2012) Covering problems in facility location: A review. *Computers & Industrial Engineering*, v. 62, n. 1, p. 368–407.
- Hansen, P. (1976) The simple plant location problem. *Omega*, v. 4, n. 3, p. 347–349. DOI:10.1016/0305-0483(76)90027-X.
- Novaes, A. G. (1989) *Sistemas logísticos: transporte, armazenagem e distribuição física de produtos*. Edgard Blücher, São Paulo.
- Quevedo-Orozco, D. R. e R. Z. Ríos-Mercado (2013) A New Heuristic for the Capacitated Vertex p-Center Problem. *Advances in Artificial Intelligence* (p. 279–288). Springer-verlag Berlin Heidelberg.
- Revelle, C. S.; H. Eiselt e M. S. Daskin (2008) A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. *European Journal of Operational Research*, v. 184, n. 3, p. 817–848. DOI:10.1016/j.ejor.2006.12.044.
- Simchi-Levi, D.; P. Kaminsky e E. Simchi-Levi (2000) *Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Case Studies*. The McGraw-Hill Companies, Inc.

Cauê Sauter Guazzelli (caue @inpo.eng.br)
Claudio Barbieri da Cunha (cbcunha@usp.br)
Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Almeida Prado, trav.2 n°. 83 – São Paulo, SP, Brasil